

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

***LUIZ EDUARDO FRIEDENBERG DE LEMOS***

**DEGRADAÇÃO PREMATURA DA ISOLAÇÃO PAPEL-ÓLEO EM  
TRANSFORMADORES E REATORES DE POTÊNCIA DEVIDO A AÇÃO DE  
ENXOFRE CORROSIVO**

**Porto Alegre**

**2015**

**LUIZ EDUARDO FRIEDENBERG DE LEMOS**

**DEGRADAÇÃO PREMATURA DA ISOLAÇÃO PAPEL-ÓLEO EM  
TRANSFORMADORES E REATORES DE POTÊNCIA DEVIDO A AÇÃO DE  
ENXOFRE CORROSIVO**

*Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Escola de Engenharia da UFRGS como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Área de Concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais.*

***Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ruth Marlene Campomanes Santana.***

**Porto Alegre**

**2015**

**LUIZ EDUARDO FRIEDENBERG DE LEMOS**

**DEGRADAÇÃO PREMATURA DA ISOLAÇÃO PAPEL-ÓLEO EM  
TRANSFORMADORES E REATORES DE POTÊNCIA DEVIDO A AÇÃO DE  
ENXOFRE CORROSIVO**

**Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.**

---

**Prof.<sup>a</sup> Dra. Ruth Marlene Campomanes Santana**

---

**Prof. Dr. Telmo Roberto Stronhaecker**

**Aprovado em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_**

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Luis Ricardo Pedra Pierobon – IFSUL \_\_\_\_\_**

**Profa. Dra. Nara Regina Atz – IFRGS \_\_\_\_\_**

**Dra. Bianca Bairros Rabello Da Silva – UFRGS \_\_\_\_\_**

## **DEDICATÓRIA**

À minha família, pelo apoio  
e incentivo constantes.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao PPGE3M que me proporcionou o privilégio de participar do seu conceituado programa de pós-graduação.

A minha orientadora, professora Dr<sup>a</sup> Ruth Marlene Campomanes Santana por sua atenção constante, incentivo e paciência.

A Professora Dr<sup>a</sup> Jane Zopas Ferreira que assinou minhas solicitações de matrícula enquanto aluno especial.

A todos os professores do PPGE3M e colegas com quem tive a oportunidade de conviver durante o curso das disciplinas do programa.

Ao colega André Luis Catto, pela ajuda na preparação das amostras e realização dos testes de MEV e EDS no cobre e papel Kraft.

Ao LAPOL pela utilização de seus laboratórios.

Ao CME pela utilização de seus equipamentos.

Aos Sr's Pinheiro, Harri e colaboradores do laboratório LABOIL, de Ivoti, que gentilmente realizaram os testes de cromatografia gasosa do óleo mineral isolante.

“Prestemos um tributo à técnica e à ciência, que impulsionadas pela determinação e pela perseverança, nunca haverão de encontrar qualquer barreira que as detenham”

## **TRABALHOS PUBLICADOS**

- LEMOS, L.E.F, SANTANA, R.M.C. Propriedades de óleos isolantes de transformadores e a proteção do meio ambiente. IX Simpósio internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre, Brasil, 2014.

## RESUMO

A ação de compostos sulfúricos presentes no óleo isolante de transformadores e reatores de potência ajuda na sua estabilidade à oxidação, porém, com o passar do tempo, provoca a corrosão do cobre, o que leva o equipamento à falha. O teor de enxofre, presente no óleo bruto, foi então reduzido, porém aditivos colocados no óleo isolante para combater a oxidação, particularmente o dibenzil dissulfeto (DBDS), ocasionou falhas prematuras em vários transformadores e reatores no mundo todo. A reação do DBDS com o cobre do condutor forma o composto sulfeto de cobre I ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), o que ocasiona a redução da rigidez dielétrica da isolação sólida, composta basicamente por papel Kraft. Nesse sentido, este trabalho visa avaliar a degradação prematura da isolação papel-óleo em transformadores e reatores de potência devido a ação de enxofre corrosivo gerado pelo DBDS (dibenzil dissulfeto). Amostras de papel, óleo e cobre antes e após envelhecimento foram caracterizadas por ensaios físicos, químicos e térmicos. A cromatografia gasosa do óleo após teste de aumento de temperatura mostrou evolução de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  e  $\text{C}_2\text{H}_6$  na amostra com DBDS, ao passo que na amostra do óleo normal não houve geração de gases, e na amostra passivada, retornou a valores ainda inferiores àqueles obtidos para o óleo normal. O papel Kraft envelhecido apresentou um decréscimo na sua estabilidade térmica ( $80^\circ\text{C}$ ) quando comparado com o papel novo, indicando início da degradação deste material em temperatura inferior ao papel novo, sendo que no FTIR uma banda de grupos funcionais amins e amidas e as bandas dos grupos nitrila, que aparecem no papel novo, não se verificaram na amostra envelhecida. O cobre nu, imerso no óleo mineral isolante (OMI) com DBDS, apresentou contaminação por  $\text{Cu}_2\text{S}$ , o que mostrou ser o OMI corrosivo, e a amostra de cobre imersa em OMI com DBDS e passivado, resultou não corrosivo, o que mostra o efeito protetor do passivador.

Palavras-chave: Transformador de potência. Reator de potência. Degradação. Isolação. Enxofre corrosivo.

## ABSTRACT

Power transformers and reactors are equipments of vital importance for any electrical power grid, which intends to provide electrical energy efficiently and reliably in order to face the needful demands for economic development and life quality improvement. Sulfur compounds present in the oils, improves its oxidation stability, however, its reaction with copper, over the time, provoking corrosion, has proved to be harmful to the equipments. A few years ago, sudden failures, especially involving step up transformers and reactors, have been concerning people responsible for the electrical power grids worldwide. Researches pointed out to the inhibitor of oxidation dibenzyl disulfide (DBDS) as the root of the problem. The DBDS reacts with the copper forming copper sulfide,  $\text{Cu}_2\text{S}$ , reducing considerably the dielectric strength of the Kraft paper, leading the insulation to fail prematurely. As a result, there are high economic losses and equipments unavailability as well. Regarding the scenario presented, this work intends to assess the power transformers and reactors paper-oil insulation premature degradation due to copper sulfide jeopardy, arose by DBDS. Kraft paper, oil and copper new samples and after being aged, were characterized by physical - humidity, grammage and density (paper and oil), MEV (paper and copper) - chemical – corrosivity and DGA (oil), FTIR (paper) – and thermal tests – TGA (paper). The test of oil corrosivity showed to be neutral for the normal oil sample, and harmful to copper for the oil sample inhibited with DBDS, as well as the protection exerted by the passivated oil sample. The results of DGA after the test with high temperature, showed an evolution of  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  and  $\text{C}_2\text{H}_6$  in the sample inhibited with DBDS, whilst in the normal oil sample there was no gas generation, and in the oil sample passivated the gas concentrations resulted even lower than in the normal oil sample. The aged Kraft paper presented a decrease in its termic stability ( $80^\circ\text{C}$ ) in comparison with the new Kraft paper, what indicates the degradation beginning of this material occurs at a lower temperature in relation of the new paper. Regarding the Fourier Infrared test (FTIR), one band of amines and amides functional groups, and the nitrile groups, which were shown in the new paper sample, could not be figured out in the aged paper. The copper immersed in oil with DBDS, showed  $\text{Cu}_2\text{S}$  contamination, what asserts the oil as corrosive, on the other

hand, the copper sample immersed in passivated oil was clean, what has proved the passivator protection.

Keywords: Transformers. Reactors. Degradation. Insulation. Corrosive sulfur.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais utilizados nos transformadores de potência .....	20
Figura 2 – Circuito equivalente simplificado de um transformador .....	24
Figura 3 – Reatores instalados em subestações para redução da tensão .....	25
Figura 4 – Manufatura dos enrolamentos do transformador .....	26
Figura 5 – Condutor de cobre utilizado na confecção de espiras em transformadores, envolto em papel Kraft isolante.....	26
Figura 6 – Corte a 45° das chapas do núcleo magnético de um transformador (a) e montagem das bobinas no núcleo com detalhe do acabamento da chaparia do núcleo em corte a 45° (b).....	29
Figura 7 – Cadeia parafínica linear (a) e ramificada (b).....	30
Figura 8 – Cadeia naftênica fechada com cadeia lateral, contendo um anel (a) e mais de um anel (b) .....	31
Figura 9 – Hidrocarbonetos aromáticos com um ciclo benzênico (a) e mais de um ciclo benzênico (b), apresentando cadeia lateral .....	31
Figura 10 – Formação de produtos de oxidação de um OMI .....	33
Figura 11 – Estrutura molecular de alguns inibidores de oxidação .....	34
Figura 12 – Estrutura química da macromolécula da celulose .....	40
Figura 13 – Molécula da celulose parcialmente cianoetilada .....	41
Figura 14 – Variação da resistência à tração do papel Kraft convencional e termoestabilizado em função do tempo .....	42
Figura 15 – Monômero da aramida .....	42
Figura 16 – Ligações químicas da glicose e da celulose .....	43
Figura 17 – Ilustração de descargas parciais em cavidades do papel Kraft isolante submetido a uma tensão .....	47
Figura 18 – Representação da isolação sem perdas (ideal) (a), nova (real) (b) e em deterioração (c) .....	47
Figura 19 – Condição ideal (perda nula) (a) e real (com perda) (b) .....	48
Figura 20 – Ilustração da reação do DBDS com o cobre formando Cu <sub>2</sub> S.....	51
Figura 21 – Papel sem contaminação (1), papel (2) e cobre (3) contaminados por Cu <sub>2</sub> S .....	52
Figura 22 – Superfície do cobre normal (a) e contaminado com Cu <sub>2</sub> S (b) .....	52

Figura 23 – Código de cores da ASTM 1275 para definição de corrosividade .....	54
Figura 24 – Amostras de tiras de cobre classificadas pelo código de cores ASTM .	54
Figura 25 – EDS da superfície de uma tira de cobre imersa em OMI contendo DBDS .....	55
Figura 26 – Curto-circuito entre espiras devido ação de enxofre corrosivo .....	56
Figura 27 – Passivador impedindo a contaminação do DBDS com o cobre .....	57
Figura 28 – Estrutura química do tolutriazol usado na passivação .....	57
Figura 29 – Ilustração da molécula do passivador TTA na proteção da camada de cobre .....	58
Figura 30 – Condutor de cobre e as 14 camadas de papel Kraft isolante (a), detalhe das duas últimas camadas de papel (b), detalhe da 14 <sup>a</sup> camada de papel (camada junto ao condutor de cobre) (c).....	59
Figura 31 – Segmento da tira de cobre utilizada na confecção das espiras dos transformadores.....	60
Figura 32 – OMI de base naftênica sem DBDS (a), com DBDS (b) e passivador do OMI (c).....	60
Figura 33 – 42 amostras de papel Kraft, 03 de cada uma das 14 camadas.....	61
Figura 34 – Amostras de cobre nu e isolados imersos no óleo antes do envelhecimento.....	63
Figura 35 – Espessura do papel Kraft por camada antes do envelhecimento.....	67
Figura 36 – Gramatura do papel Kraft por camada antes do envelhecimento.....	67
Figura 37 – Densidades do OMI em 4 condições .....	68
Figura 38 – Espectro de EDS da superfície do cobre nu imerso em óleo normal após 72 h em estufa à 140°C .....	69
Figura 39 – Micrografias da superfície do cobre nu imerso em OMI normal após 72 h em estufa a 140°C: 1000X (a) 5000X (b).....	69
Figura 40 – Espectro de EDS da superfície do cobre nu imerso em óleo inibido com DBDS após 72 h em estufa à 140°C.....	70
Figura 41 – Micrografias da superfície do cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS após 72 h em estufa a 140°C : 1000X (a) 5000X (b) .....	70
Figura 42 – Espectro de EDS da superfície do cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol após 72 h em estufa a 140°C .....	71

Figura 43 – Micrografias da superfície do cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol após envelhecimento por 72 h em estufa a 140°C: 1000X (a) 5000X (b) .....	72
Figura 44 – Espectro de EDS da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com o cobre (camada 14) imerso em OMI normal após 72 h em estufa à 140°C.....	72
Figura 45 – Micrografias da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com o cobre (camada 14) imerso em óleo normal, após envelhecimento por 72 h em estufa a 140°C: 100X (a) 1000X (b).....	73
Figura 46 – Espectro de EDS da superfície da camada do papel Kraft isolante junto ao cobre (camada 14) imerso em OMI inibido com DBDS após 72 h em estufa à 140°C .....	74
Figura 47 – Micrografias da superfície da camada de papel Kraft em contato com o cobre (camada 14) imerso em OMI inibido com DBDS, após envelhecimento em estufa por 72 h a 140°C: 100X (a) 1000X (b).....	74
Figura 48 – Espectro de EDS da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com o cobre (camada 14) imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol envelhecido em estufa por 72 h a 140°C.....	75
Figura 49 – Micrografias da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com o cobre (camada 14) imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol, após envelhecimento em estufa por 72 h a 140°C: 100X (a) 1000X (b)..	76
Figura 50 – Amostras de óleos, tiras de cobre nu e isolado após envelhecimento por 72 h em estufa a 140°C .....	77
Figura 51 – Amostras de cobre isolado (1) e nu (2) imersas em óleo normal após teste de aquecimento, dentro do frasco (a) e fora do frasco (b) .....	77
Figura 52 – Amostras de cobre isolado (1) e nu (2) retirados de frascos com óleo inibido com DBDS após teste de aquecimento.....	78
Figura 53 – Amostras de cobre isolado (1) e nu (2) retirados de frascos com OMI inibido com DBDS e passivado com Irgamet 39 após teste de aquecimento .....	79
Figura 54 – Papel Kraft isolante aberto, retirado da amostra de OMI inibido com DBDS, após teste de aquecimento. 14 camadas (a) e 14ª camada (b).....	79
Figura 55 – Perfil de gases dissolvidos no OMI.....	84
Figura 56 – FTIR do papel novo e envelhecido por uma semana em estufa a 140°C .....	85

Figura 57 – Curva da análise termogravimétrica .....	86
Figura 58 – Primeira derivada da curva do TGA.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição de hidrocarbonetos nos OMIs .....	31
Tabela 2 – Laudo cromatográfico de OMI em boas condições, com degradação e após falha .....	36
Tabela 3 – Laudo de análise físico-química de óleo mineral isolante .....	39
Tabela 4 – Fator de potência e fator de perdas dielétricas para valores de $\varphi$ e $\delta$ ....	50
Tabela 5 – Resultados das propriedades físicas do papel Kraft .....	66
Tabela 6 – Cromatografia do óleo normal sem aquecimento .....	80
Tabela 7 – Cromatografia do óleo normal aquecido 72 h em estufa a 140°C.....	81
Tabela 8 – Cromatografia do óleo com DBDS aquecido durante 72 h a 140°C .....	82
Tabela 9 – Cromatografia do óleo passivado aquecido durante 72 h em estufa a 140°C.....	83
Tabela 10 – Resultados da análise de TGA das amostras de papel Kraft novo e envelhecido, imerso em óleo, como isolante de tira de cobre, aquecido em estufa a temperatura 140°C por 168 h .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS

CG	Cromatografia gasosa
DBDS	Dibenzil- Dissulfeto
DBPC	Di-terc-butil-p-cresol
DGA	Dissolved gas analysis
EDS	Espectroscopia por dispersão de energia
2-FAL	Teor de furfuraldeído
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
GP	Grau de polimerização
j	Notação de número complexo
MEV	Microscopia Eletrônica de varredura
OMI	Óleo mineral isolante
$R_1$	Resistência elétrica do circuito primário do transformador
$R_2$	Resistência elétrica do circuito secundário do transformador
TGA	Análise termogravimétrica
$X_{L1}$	Reatância indutiva do circuito primário do transformador
$X_{L2}$	Reatância indutiva do circuito secundário do transformador
$Z_1$	Impedância do circuito primário do transformador
$Z_2$	Impedância do circuito secundário do transformador

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
3.1	PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	23
3.2	PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DO REATOR DE POTÊNCIA .....	24
3.3	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE INTERESSE DOS TRANSFORMADORES E REATORES DE POTÊNCIA.....	25
3.4	MATERIAIS CONDUTORES .....	27
3.5	MATERIAIS MAGNÉTICOS .....	28
3.6	MATERIAIS ISOLANTES .....	30
3.6.1	Óleo mineral isolante (OMI) .....	30
3.6.1.1	<i>Oxidação do óleo mineral isolante (OMI).....</i>	<i>32</i>
3.6.1.2	<i>Inibidores da oxidação do óleo mineral isolante (OMI).....</i>	<i>33</i>
3.6.1.3	<i>Cromatografia gasosa (CG) do óleo mineral isolante (OMI).....</i>	<i>34</i>
3.6.1.4	<i>Cromatografia líquida do óleo mineral isolante (OMI).....</i>	<i>37</i>
3.6.1.5	<i>Análise Físico-Química do óleo mineral isolante (OMI) .....</i>	<i>38</i>
3.6.2	Papel Kraft.....	40
3.6.2.1	Grau de polimerização do papel.....	42
3.8	DEGRADAÇÃO DA ISOLAÇÃO PAPEL-ÓLEO .....	43
3.7.1	Degradação natural .....	43
3.7.2	Degradação prematura.....	50
4	<b>EXPERIMENTAL.....</b>	<b>59</b>
4.1	MATERIAIS .....	59
4.1.1	Papel Kraft.....	59
4.1.2	Cobre .....	59
4.1.3	Óleo mineral isolante (OMI) sem e com DBDS e o passivador.....	60
4.2	METODOLOGIA .....	60
4.2.1	Caracterização .....	60

4.2.2	Ensaio físico.....	61
4.2.2.1	<i>Umidade do papel.....</i>	61
4.2.2.2	<i>Gramatura do papel Kraft isolante.....</i>	61
4.2.2.3	<i>Densidade do papel Kraft isolante.....</i>	62
4.2.2.4	<i>Densidade do óleo mineral isolante (OMI).....</i>	62
4.2.2.5	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</i>	62
4.2.3	Ensaio químico.....	63
4.2.3.1	<i>Corrosividade do OMI.....</i>	63
4.2.3.2	<i>Análise de Cromatografia Gasosa.....</i>	64
4.2.3.4	<i>Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i> .....	64
4.2.4	Ensaio térmico.....	64
4.2.4.1	<i>Análise Termo Gravimétrica (TGA).....</i>	64
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	65
5.1	PROPRIEDADES FÍSICAS.....	65
5.1.1	Umidade, espessura, gramatura e densidade do papel kraft.....	65
5.1.2	Densidade do OMI.....	67
5.2	Propriedades morfológicas do cobre e do papel Kraft, MEV e EDS ....	68
5.2.1	Cobre nu imerso em OMI normal.....	68
5.2.2	Cobre nu imerso em óleo inibido com DBDS.....	69
5.2.3	Cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol.....	71
5.2.4	Papel Kraft junto a tira de cobre isolado, imerso em OMI normal.....	72
5.2.5	Papel Kraft junto a tira de cobre, imerso em OMI com DBDS.....	73
5.2.6	Papel Kraft junto a tira de cobre, imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol.....	75
5.3	PROPRIEDADES QUÍMICAS.....	76
5.3.1	Corrosividade do OMI normal, OMI com o inibidor de oxidação (DBDS), OMI com inibidor de oxidação (DBDS) e passivado com tolutriazol (Irgamet 39).....	76
5.3.1.1	<i>Corrosividade do OMI normal.....</i>	77
5.3.1.2	<i>Corrosividade do OMI inibido com DBDS.....</i>	78
5.3.1.3	<i>Corrosividade do OMI inibido com DBDS e passivado com Irgamet 39</i> .....	78

5.3.2	Papel Kraft isolante da amostra imersa em OMI inibido com DBDS....	79
5.3.5	Cromatografia gasosa de OMI normal sem aquecimento, OMI normal aquecido, OMI inibido com DBDS aquecido, OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol aquecido .....	80
5.3.6	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	84
5.4	PROPRIEDADES TÉRMICAS .....	Erro! Indicador não definido.85
5.4.1	TGA .....	85
6	CONCLUSÕES.....	888
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS .....	90

## 1 INTRODUÇÃO

No ano 600 AC Tales de Mileto, um dos sete sábios gregos, ao esfregar âmbar, um tipo de resina, em tecido, observou que pedaços de palha eram atraídos pelo âmbar. O fenômeno foi chamado de *eletricidade*, proveniente da palavra âmbar que em grego significa *elektron* [1].

Desde aqueles anos distantes o conhecimento e a utilização da eletricidade têm se multiplicado enormemente, com grandes avanços reportados a partir do século XVII. No século XIX várias equações, leis e relações fundamentais foram estabelecidas e servem de base até hoje para a fabricação dos principais equipamentos que são utilizados na produção, transmissão e distribuição de energia elétrica.

O progresso de uma nação pode ser medido pelo grau de aproveitamento de suas fontes de energia. Um sistema elétrico de potência consiste basicamente da produção, transmissão e distribuição da energia elétrica, desde sua fonte, seja ela qual for, hidráulica, térmica, nuclear, eólica, solar, biomassa, até seu consumo final, onde será convertida em outras formas de energia, como luminosa, calorífica, mecânica, química, traduzindo-se desta forma num sistema de conversão de energia [2].

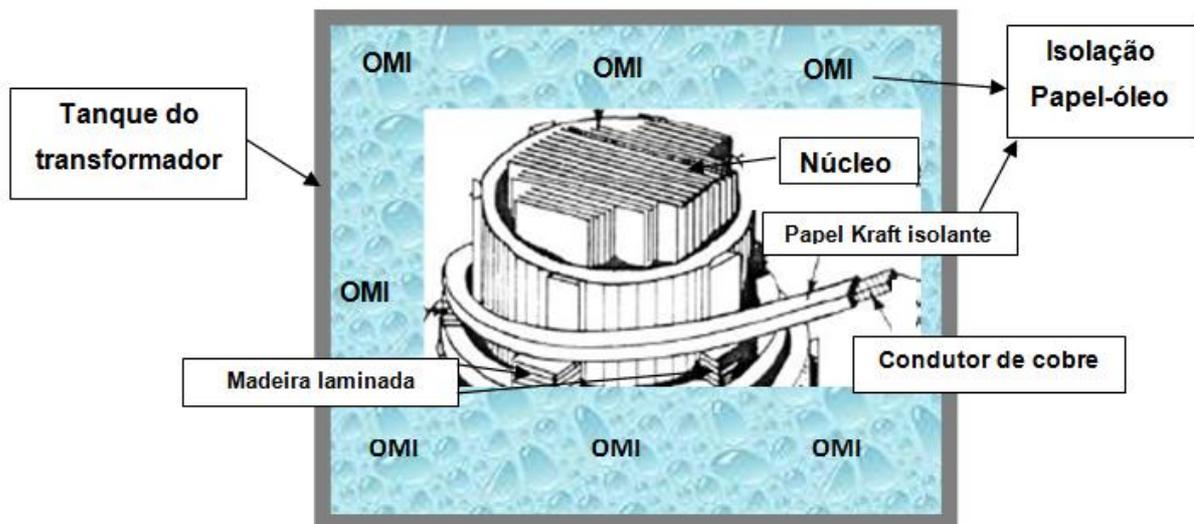
As subestações elevadoras, interligadoras e distribuidoras, espalhadas estrategicamente em diversos locais do sistema interligado, utilizam vários equipamentos para viabilizar o transporte dos grandes blocos de energia, desde sua produção nas usinas, até seu consumo pelas cargas, principalmente, nas cidades e indústrias. Estes equipamentos servem para medição, controle e proteção, como voltímetros, amperímetros, wattímetros, varímetros, baterias, no-breaks e relés, entre outros, que normalmente ficam instalados nas salas de comando e prédios centrais ou locais, das subestações de alta tensão. Os pára-raios, transformadores de potencial, de corrente e de potência, reatores de potência, chaves seccionadoras e disjuntores, entre outros, tem cada um sua função específica, estando ligados diretamente na alta tensão, e localizados nos pátios das subestações. Dentre todos estes equipamentos podemos dizer que o transformador de potência é o mais importante, tanto por sua função de elevar e rebaixar os valores de tensão e corrente, como pelo seu custo [3].

A Engenharia de Materiais assume um lugar de destaque neste campo, pois os materiais isolantes, condutores e magnéticos empregados na construção de equipamentos de alta tensão são a base de um projeto que intenciona ser bem sucedido, conferindo durabilidade aos equipamentos, podendo assim entregar alta qualidade e confiabilidade ao sistema.

Especificamente nos transformadores e reatores de potência, além dos materiais, magnético do núcleo e condutor dos enrolamentos, o sistema de isolamento é composto por: óleo mineral isolante (OMI), papel Kraft, papelão com fibra de algodão, madeira laminada, papel nomex (poliamida) e vernizes, dependendo de cada projeto [4–6], como pode ser visto na Figura 1.

O tempo de vida útil da isolação papel-óleo é determinado fundamentalmente pelo papel, pois o mesmo não pode ser substituído, ao contrário do óleo que pode ser substituído ou tratado, restabelecendo suas propriedades dielétricas [6,7].

Figura 1 – Materiais utilizados nos transformadores de potência [6]



Na degradação da isolação papel-óleo, a temperatura, umidade e oxidação, juntamente com o processo de descargas parciais, atuam continuamente, devendo ser verificadas as situações quando estes parâmetros irão finalmente abreviar a vida útil do transformador. A contribuição da variável enxofre corrosivo, potencializa a degradação dos mesmos.

Nesta dissertação trataremos da ação de todas estas contribuições catalisadoras da degradação, com foco na contaminação do cobre dos enrolamentos dos transformadores e reatores de potência, pela reação com o composto DBDS,

adicionado ao óleo mineral isolante como inibidor da oxidação. Formas de mitigação, como a passivação do OMI, foram testadas, assim como testes diversos e caracterização do cobre, OMI e papel Kraft, conferindo uma abrangência ampla ao assunto, trazendo mais dados que possam incitar futuras pesquisas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a degradação prematura da isolação papel-óleo de transformadores e reatores de potência devido a ação de enxofre corrosivo – proveniente do composto dibenzil-dissulfeto (DBDS), usado como inibidor da oxidação em OMI – no cobre condutor elétrico, assim como verificar a eficiência do composto tolutriazol como passivador, confirmando-o como o meio primário de mitigar o problema da corrosão do cobre por compostos sulfúricos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos deste trabalho podemos citar:

- a) avaliar as características do papel Kraft e do OMI tilizado;
- b) avaliar a degradação do papel kraft, do cobre e do OMI utilizado após envelhecimento acelerado.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo fazer uma breve apresentação de todos os elementos que participam da degradação da isolação papel-óleo dos transformadores e reatores de potência, com menção aos materiais, características da degradação natural e prematura, e formas de controle e mitigação das mesmas.

#### 3.1 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Um transformador de potência tem seu funcionamento baseado no princípio da indução eletromagnética mútua entre duas ou mais bobinas, [8,9] e seus parâmetros de circuito podem ser vistos na Figura 1. Nesse equipamento chama-se de primário o circuito ligado a uma fonte de tensão,  $V_1$ , e secundário o circuito comumente ligado a carga, tendo em seus terminais uma tensão,  $V_2$ .

Se as bobinas de cobre, estiverem enroladas sobre um núcleo comum de ferro, os circuitos estão fortemente acoplados [4], e quase toda energia do circuito primário passa ao circuito secundário. A energia não é totalmente transmitida devido aos fluxos magnéticos de dispersão dos circuitos primário e secundário,  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$ . O fluxo magnético compartilhado por ambos os circuitos, que abrange as bobinas 1 e 2, é o fluxo mútuo,  $\Phi_m$  [8].

Quando  $V_1$  é aplicada no circuito primário, uma tensão  $E_1$  é induzida no enrolamento primário. No enrolamento secundário aparece uma tensão induzida  $E_2$  [8].

A tensão  $E_1$ , induzida no enrolamento primário, é dada pela subtração da tensão aplicada ao circuito primário,  $V_1$ , e a queda de tensão verificada na sua impedância,  $Z_1$ , composta pela resistência do cobre,  $R_1$ , e a reatância indutiva do primário,  $jX_{L1}$ , dada por sua indutância,  $L_1$ . Assim temos a equação 1:

$$E_1 = V_1 - I_1(R_1 + jX_{L1}) \quad \text{equação (1)}$$

A tensão,  $V_2$ , que alimenta a carga ligada ao circuito secundário, é dada pela subtração da tensão induzida no enrolamento secundário,  $E_2$ , e a queda de tensão

verificada na sua impedância,  $Z_2$ , composta pela resistência do cobre,  $R_2$ , e a reatância indutiva,  $jX_{L2}$ , dada por sua indutância,  $L_2$ . Assim temos a equação 2:

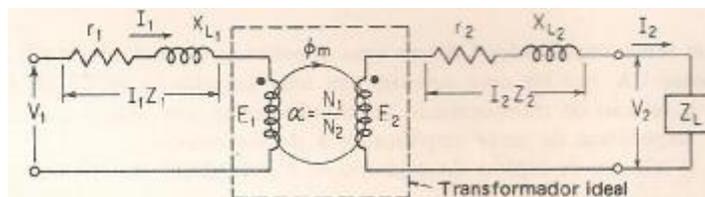
$$V_2 = E_2 - I_2(R_2 + jX_{L2}) \quad \text{equação (2)}$$

As tensões dos circuitos primários e secundários dos transformadores são diretamente proporcionais ao número de espiras dos seus respectivos enrolamentos,  $N_1$ , para o primário e,  $N_2$ , para o secundário, e inversamente proporcionais as suas correntes,  $I_1$ , do circuito primário e,  $I_2$ , do circuito secundário [10,11]. Então podemos escrever a equação 3.

$$V_1/V_2 = N_1/N_2 = I_2/I_1 \quad \text{equação (3)}$$

A Figura 2 mostra os parâmetros principais do circuito equivalente de um transformador.

Figura 2 – Circuito equivalente simplificado de um transformador [8]



Os transformadores instalados nas usinas são chamados de elevadores de tensão, pois devem aumentar o nível de tensão produzido nos geradores, para possibilitar a transferência dos grandes blocos de energia através das linhas de transmissão. Já nas subestações, perto dos centros consumidores, os transformadores são denominados de rebaixadores de tensão, para possibilitar a alimentação dos transformadores de distribuição, que na ponta final, reduzirão as tensões para níveis de utilização doméstica e industrial.

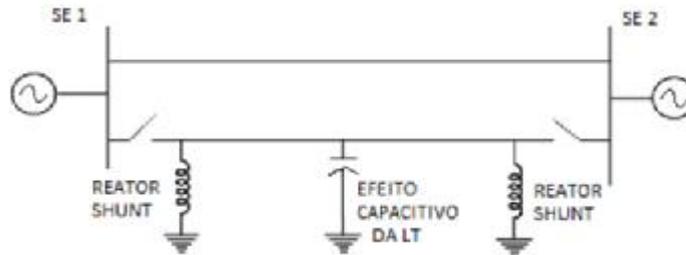
### 3.2 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DO REATOR DE POTÊNCIA

Os reatores têm manufatura similar a dos transformadores, porém sua aplicação difere destes. Uma importante utilização é sua instalação em barramentos

de subestações, conforme Figura 3, com a denominação de reatores shunt, reduzindo o nível de tensão das barras, para compensar o efeito capacitivo das linhas de transmissão, que elevam as tensões do sistema elétrico.

Possuem a entrada de seu enrolamento ligado ao potencial da linha e a saída ligada ao barramento de neutro das subestações [12,13].

Figura 3 – Reatores instalados em subestações para redução da tensão [14]



### 3.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE INTERESSE DOS TRANSFORMADORES E REATORES DE POTÊNCIA

Os transformadores sempre desempenham um papel chave na confiabilidade dos sistemas elétricos. A construção, os valores de potência, níveis de tensão e a gama de aplicações são fatores preponderantes que determinam os projetos dos mesmos [15]:

- Engenharia e projeto: o projeto de grandes transformadores é complexo. O ideal balanceamento dos custos das matérias primas (de forma mais significativa: cobre, aço, papel e OMI), perdas elétricas, horas de manufatura, limitações da planta onde será instalado e transporte [16] até o local, são variáveis a serem consideradas na concepção do equipamento;
- Núcleo: a precisão na manufatura do núcleo é um fator decisivo para a eficiência futura do transformador [17]. No momento do corte das chapas deve haver um cuidado especial, onde se faz necessário a utilização das mais modernas técnicas de controle dimensional, possibilitando assim um fluxo magnético adequado, o que implicará na base para baixas perdas e minimização de ruídos;

- Enrolamento: altas solicitações elétricas e mecânicas são impostas diariamente aos transformadores. Os enrolamentos são formados por espiras de cobre, cujo tipo será definido em função da aplicação solicitada, dependendo dos níveis da tensão de serviço requeridos [13].

A Figura 4 mostra a montagem dos enrolamentos, cujas espiras podem ser contínuas ou transpostas, sendo intercaladas por dutos radiais e axiais de passagem do óleo isolante e refrigerante. A continuidade dos discos reduz os pontos de solda a um mínimo [17], garantindo um desempenho adequado do equipamento.

Figura 4 – Manufatura dos enrolamentos do transformador [17]



- Isolação: os condutores de cobre são envoltos em papel Kraft, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Condutor de cobre utilizado na confecção de espiras em transformadores, envolto em papel Kraft isolante



- Capacitâncias num transformador de potência: Quando uma isolação é submetida a uma tensão tem-se um capacitor [18]. Nos transformadores os enrolamentos de diferentes tensões, a isolação, composta por, normalmente, OMI, papel Kraft (principalmente) entre outros materiais, forma uma capacitância.

### 3.4 MATERIAIS CONDUTORES

Sob o ponto de vista prático, a maior parte dos materiais condutores são sólidos, com destaque para os metálicos. Apresentam constituição cristalina e alta condutividade elétrica.

Numa grade cristalina os átomos metálicos liberam os seus elétrons de valência de modo que os átomos são eletropositivos, e não havendo átomos eletronegativos para absorver os elétrons livres, estes preenchem o espaço entre os átomos com a chamada *nuvem de elétrons* que, por sua vez, exercem forças entre os átomos eletropositivos. Os campos elétricos assim formados atuam em várias direções, fazendo com que os *elétrons livres* não fiquem vinculados a um determinado núcleo. Essa facilidade de movimentação é a responsável pela alta *condutividade eletrônica* dos metais, não estando, portanto, condicionado a uma decomposição ou modificação estrutural do metal [19].

O cobre é o material condutor mais utilizado na confecção das espiras dos transformadores e reatores de potência. Metal de estrutura cristalina cúbica de face centrada, é encontrado na natureza, no estado puro, em quantidades muito pequenas, sendo então obtido para escala industrial a partir de minérios de cobre, cujo principal é o  $\text{CuFeS}_2$  – sulfeto de cobre e ferro, conhecido pelo nome de calcopirita.

São os elétrons, particularmente os mais externos, que afetam a maior parte das propriedades de interesse em engenharia [20,21]. Torna-se então conveniente verificar a disposição dos elétrons num átomo de cobre.

Uma rápida análise da estrutura atômica do cobre revela por que ele tem uma aplicação tão ampla. Possuindo número atômico 29, preenche as três primeiras camadas, K, L e M, em volta do núcleo, sobrando apenas 1 elétron na última (quarta) camada. Assim a camada mais externa, tem maior probabilidade de perder-se por qualquer esforço externo.

Se esse 29º elétron ganhar energia suficiente do meio externo para deixar o átomo de origem, ele passará a ser um elétron livre.

O cobre apresenta também as seguintes vantagens, que garantem sua posição de destaque entre os materiais condutores:

- Baixa resistividade;
- Baixa oxidação para a maioria das aplicações;
- Fácil deformação a frio e a quente [19].

### 3.5 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Os materiais magnéticos tem grande importância para tornar possível a aplicação das leis da física na construção de equipamentos elétricos [8,9,13,22], entre os quais, geradores, motores, transformadores e reatores de potência.

Os materiais utilizados para este fim pertencem a família dos ferromagnéticos, que se caracterizam por uma magnetização espontânea muito grande e permanente, não sendo portanto dependentes da força de campos magnéticos externos para apresentarem uma elevação significativa na sua densidade de fluxo magnético.

Os metais de transição; ferro, cobalto e níquel, constituintes do grupo VIII da tabela periódica de elementos químicos, e alguns metais terras raras como o gadolínio, com valores de susceptibilidade magnética que podem chegar a  $10^6$ , bem como altos valores da *temperatura de Curie*, na qual os materiais ferromagnéticos passam a ter comportamento paramagnético; tornam-se ideais para fins de aproveitamento em larga escala, nos equipamentos onde propriedades magnéticas são requeridas [22].

O ferro, com sua boa disponibilidade, é o metal mais utilizado para atender as exigências do princípio da indução eletromagnética, necessário para o funcionamento dos transformadores e reatores de potência.

As perdas no núcleo magnético devem ser as mais baixas possíveis, portanto providências para redução de correntes parasitas, também conhecidas como correntes de Foucault, ocasionadas pelo efeito dos campos magnéticos variáveis, resultantes da ação de correntes alternadas circulando por um enrolamento, devem

ser colocadas em prática. Estas perdas são minimizadas pelo aumento da resistência elétrica das lâminas que compõem o núcleo magnético, através de:

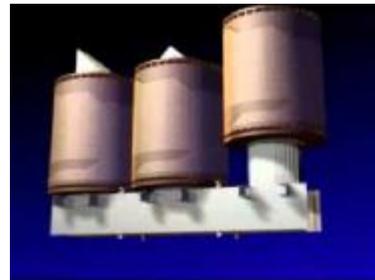
- Adição de silício ao ferro;
- Laminação dos núcleos magnéticos;
- Isolação das lâminas dos núcleos entre si;
- Redução da espessura da lâmina até um valor que não comprometa sua resistência mecânica. Normalmente entre 0,3 e 1 mm de espessura;
- Laminação das chapas de ferro-silício a frio, que apresentam anisotropia cristalina mais alta do que as laminadas a quente;
- Utilização de chapas de grãos orientados, obtidas por métodos térmicos adequados. Deve-se cuidar para que o corte, a partir da chapa completa, seja feito no sentido da orientação dos grãos, de modo a fazer coincidir o eixo preferencial de magnetização com a direção das linhas de campo;
- Tratamento térmico de recozimento para eliminar as tensões internas de deformação, conseqüente do corte das chapas, reconduzindo os cristais à sua posição original, ou o mais próximo dela possível;
- Corte das chapas a 45° e não a 90°, para redução da discrepância entre o eixo preferencial de magnetização e a direção das linhas de campo magnético [22].

A figura 6 mostra a chaparia do núcleo com corte à 45°.

Figura 6 – Corte a 45° das chapas do núcleo magnético de um transformador (a) e montagem das bobinas no núcleo com detalhe do acabamento da chaparia do núcleo em corte a 45° (b) [14]



(a)



(b)

### 3.6 MATERIAIS ISOLANTES

Materiais isolantes ou dielétricos se caracterizam por oferecer uma grande resistência a passagem da corrente elétrica. Este comportamento tem seus fundamentos nas suas propriedades físicas e químicas.

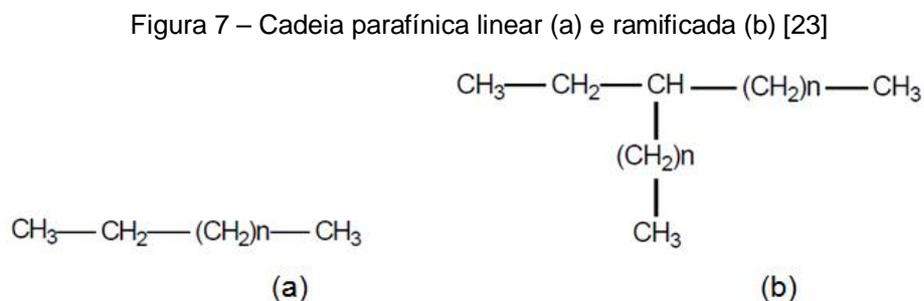
Materiais classificados eletricamente como dielétricos não são isolantes perfeitos, pois apresentam uma reduzida condutividade, que por ser tão pequena, pode ser geralmente desprezada, quando o material é usado dentro dos limites a que se destina [22].

#### 3.6.1 Óleo mineral isolante (OMI)

O OMI em transformadores e reatores de potência, tem função isolante e refrigerante. O calor gerado pelo efeito térmico da corrente elétrica (efeito Joule), quando da passagem do fluxo de elétrons através do condutor, é levado pelo óleo até os radiadores, onde é trocado com o meio externo, mantendo desta forma o aquecimento do equipamento dentro de níveis admissíveis.

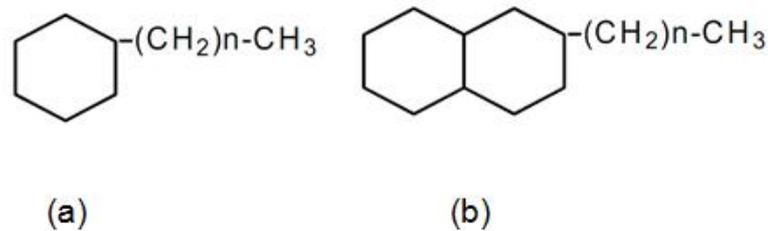
O refino do petróleo bruto, entre 300 e 400°C, gera a matéria prima para os OMIs, que apresentam na quase totalidade de sua composição, uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos [23]. As moléculas destes hidrocarbonetos estão representadas nas Figuras 7 – 9.

Parafinas ou alcanos são hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta linear ou ramificada [23].



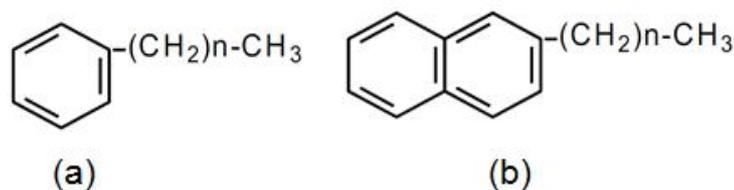
Naftenos ou cicloalcanos são hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo um ou mais anéis, que podem possuir uma ou mais cadeias laterais [23].

Figura 8 – Cadeia naftênica fechada com cadeia lateral, contendo um anel (a) e mais de um anel (b) [23]



Aromáticos são hidrocarbonetos não saturados de cadeia fechada, que apresentam-se na forma de anéis benzênicos combinados a anéis alifáticos, podendo apresentar, ou não, cadeias laterais [23].

Figura 9 – Hidrocarbonetos aromáticos com um ciclo benzênico (a) e mais de um ciclo benzênico (b), apresentando cadeia lateral [23]



A proporção de cada hidrocarboneto para formar a base de um OMI é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição de hidrocarbonetos nos OMIs [24]

OMI (base)	Composição de hidrocarbonetos (%)		
	Parafínico	Naftênico	Aromático
Parafínica	63	29	8
Naftênica	42	47	11

Um OMI ideal é aquele que:

- Possui baixa viscosidade;
- Possui alto poder dielétrico;

- Possui alto ponto de fulgor (temperatura na qual os vapores formados pelo aquecimento do óleo entram em combustão espontânea);
- É isento de ácidos, álcalis e enxofre corrosivo;
- Resiste à oxidação e à formação de borras;
- Não ataca os materiais usados na construção de transformadores;
- Tem baixa perda dielétrica;
- Não contém produtos que possam agredir o homem e o meio ambiente.

O OMI que melhor atende as características desejáveis para o cumprimento de suas funções isolantes e refrigerantes é o de base naftênica.

De uma forma geral suas moléculas médias possuem entre 19 e 23 átomos de carbono arranjados em estrutura naftênica.

Os hidrocarbonetos que entram na composição de um OMI são pouco ativos quimicamente, o que faz-se necessário para que o líquido não ataque os materiais presentes no transformador que entram em contato com o mesmo. Os hidrocarbonetos saturados apresentam pouca resistência à degradação quando em presença de oxigênio e calor, sendo compensados pela presença dos aromáticos, conferindo ao OMI maior estabilidade [23].

### **3.6.1.1 Oxidação do óleo mineral isolante (OMI)**

O mecanismo de degradação do OMI sob a influência de calor, catalisadores e solicitações elétricas na presença de oxigênio é governado pela decomposição homolítica de hidrocarbonetos. Essa decomposição é baseada no mecanismo de radicais livres e na formação de produtos de oxidação, como peróxidos, álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos e água, conforme mostra a Figura 9 [25].

As etapas da oxidação de um OMI são:

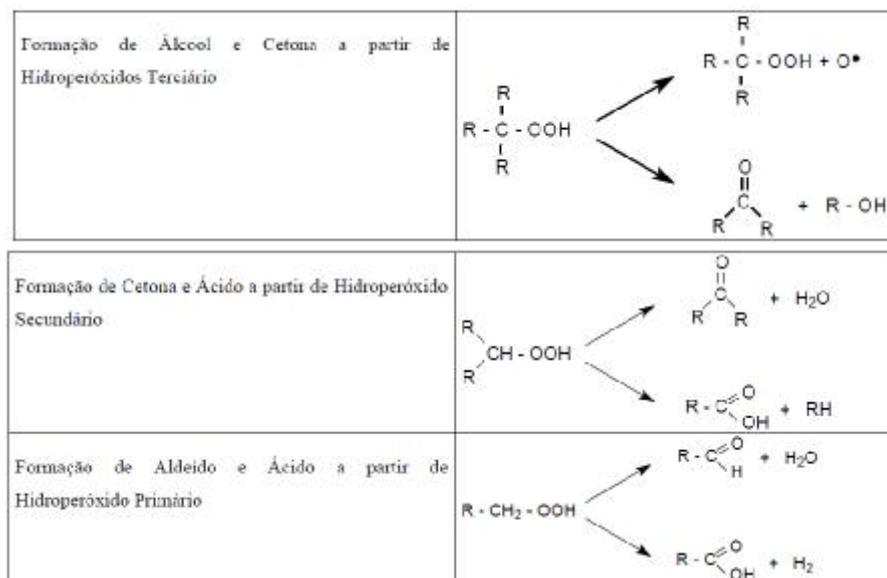
- Iniciação: radicais livres são formados;
- Propagação: Formação dos radicais peróxido, hidroperóxido. Transformação do hidroperóxido em radical peróxido. Formação de produtos intermediários, aldeídos, cetonas, ácidos e álcoois. Neste estágio da oxidação compostos solúveis de cobre e ferro são produzidos

em taxas mais altas. Íons de cobre e ferro decompõem os hidroperóxidos em radicais livres, aumentando acentuadamente a acidez [25];

- Finalização: Combinação dos radicais formados.

Os ácidos carboxílicos, formados a partir dos produtos da oxidação citados, constituem-se de moléculas polares de características ácidas, que agredem a isolação sólida dos transformadores. Numa etapa final ocorrem reações de polimerização, onde várias moléculas reagem formando um composto com peso molecular maior que o do óleo, insolúvel, também de características ácidas, que se deposita no fundo do tanque em forma de borra [26,27]. A Figura 10 mostra a formação dos produtos de oxidação de um OMI.

Figura 10 – Formação de produtos de oxidação de um OMI [27]



### 3.6.1.2 Inibidores da oxidação do óleo mineral isolante (OMI)

Para retardar o processo de oxidação do OMI, visto acima, são utilizados inibidores. Inibidores de oxidação fenólicos primários desempenham um importante papel no estágio de iniciação da oxidação, quebrando a cadeia de radicais juntamente com compostos aromáticos monocíclicos, que são reconhecidamente antioxidantes muito efetivos em temperaturas até 190° C.

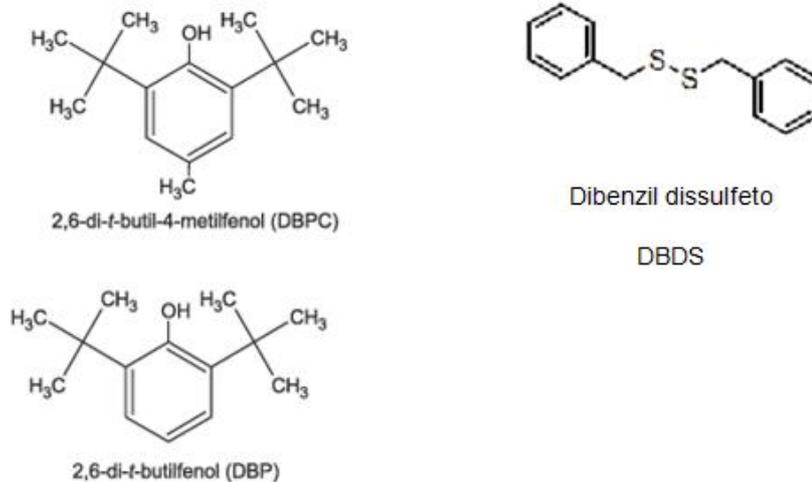
Os OMIs são considerados inibidos se possuírem uma quantidade de antioxidante entre 0,08% e 0,4%, sendo este o limite máximo permitido [28].

Os inibidores podem ser fenólicos, amínicos, sulfurados, sendo discriminados abaixo, os mais conhecidos:

- DBPC – (Di-ter-butil-paracresol). Largamente utilizado atualmente;
- DBP – (Di-ter-butil-fenol);
- DBDS – (Dibenzil-dissulfeto). Reage com o Cu, formando  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

Algumas moléculas desses inibidores podem ser vistas na Figura 11.

Figura 11 – Estrutura molecular de alguns inibidores de oxidação [25]



### 3.6.1.3 Cromatografia gasosa (CG) do óleo mineral isolante (OMI)

A cromatografia gasosa é uma técnica de análise dos gases dissolvidos no OMI, largamente utilizada pelas concessionárias de energia elétrica para identificação de falhas incipientes em transformadores e reatores de potência.

A CG também é usada como ferramenta para verificação das condições do óleo em transformadores de corrente ou de potencial, desde que haja um registro para coleta da amostra (40 à 50 ml). Nos transformadores de corrente e de potencial é importante salientar que o nível de óleo deve ser verificado com a máxima atenção, a medida que são feitas as amostragens, pois possuem quantidades de óleo muito menores que os transformadores e reatores. As conexões das partes ativas (energizadas) dos transformadores de corrente e de potencial à tensão de linha (tensão à que estão submetidos), podem ficar expostas a uma atmosfera não inerte devido a ausência de OMI, susceptibilizando-os à explosões.

Os gases analisados na cromatografia gasosa são o hidrogênio ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), etileno ( $C_2H_4$ ), etano ( $C_2H_6$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), monóxido de carbono (CO) – gases combustíveis – dióxido de carbono ( $CO_2$ ), oxigênio ( $O_2$ ) e nitrogênio ( $N_2$ ) – gases não combustíveis.

O aumento da concentração destes gases, no decorrer do tempo, aponta para possíveis falhas incipientes, que poderão indisponibilizar o equipamento para a operação.

Algumas normas que tratam da análise de gases dissolvidos no OMI são:

- IEEE C57.104 – Guia para Interpretação de Gases Gerados em Transformadores Imersos em Óleo [30];
- IEC 60599 – Norma Internacional - Equipamentos Elétricos em Serviço Impregnados em óleo Isolante - Guia para Interpretação de Gases Dissolvidos e livres [31];
- ABNT NBR 7070 – Amostragem de gases e óleo mineral isolante de equipamentos elétricos e análise dos gases livres e dissolvidos [32].

A origem de falhas incipientes ou curto-circuitos pode ser analisada através da verificação do gás chave no espectro da cromatografia gasosa.

Etileno ( $C_2H_4$ ) tipifica sobreaquecimento no óleo. Em menores quantidades podem aparecer etano ( $C_2H_6$ ) e metano ( $CH_4$ ).

Monóxido de carbono (CO) tipifica sobreaquecimento no papel, proveniente de um processo inicial de descargas parciais, devido impregnação deficiente do OMI na isolação sólida, implicando numa atmosfera não inerte. Aparece também dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

Hidrogênio ( $H_2$ ) tipifica descargas de alta energia. Em quantidades menores existe a geração de metano ( $CH_4$ ).

Acetileno ( $C_2H_2$ ) tipifica arco elétrico no óleo. Aparece também quantidade grande de hidrogênio ( $H_2$ ) [30].

As falhas também podem ser avaliadas através de razões estabelecidas entre os gases, nas análises de Doernenburg e Rogers [30].

As cinco razões analisadas são:

$$\text{Razão 1 (R}_1\text{)} = CH_4/H_2$$

$$\text{Razão 2 (R}_2\text{)} = C_2H_2/C_2H_4$$

$$\text{Razão 3 (R}_3\text{)} = \text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$$

$$\text{Razão 4 (R}_4\text{)} = \text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$$

$$\text{Razão 5 (R}_5\text{)} = \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$$

Através da composição dos resultados desses quocientes, Doernenburg e Rogers classificam a origem das falhas como: Decomposição térmica, descargas parciais de baixa intensidade, descargas parciais de alta intensidade (Doernenburg). Densidade de arco elétrico de baixa energia – descargas parciais, descarga de alta energia – arco elétrico, decomposição térmica de temperatura < 700°C e decomposição térmica de temperatura > 700°C (Rogers).

Na Tabela 2, são mostrados laudos de análise de cromatografia gasosa (CG) para diferentes condições do OMI.

Tabela 2 – Laudo cromatográfico de OMI em boas condições, com degradação e após falha [33]

<b>Gás</b>	<b>OMI novo (mg/L)</b>	<b>OMI com degradação (mg/L)</b>	<b>OMI após falha (mg/L)</b>
H <sub>2</sub>	ND	ND	7079
O <sub>2</sub>	1774	4318	2907
N <sub>2</sub>	5882	38418	10731
CH <sub>4</sub>	ND	29	2759
CO	ND	272	1930
CO <sub>2</sub>	42	8788	521
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ND	ND	2078
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ND	5	136
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ND	ND	3835
Total Gases			
Combustíveis	0	306	17817
Total Gases	7698	51830	31976

ND: Não detectado

A análise da falha, cujo perfil de gases dissolvidos no OMI, está discriminado na tabela acima, utilizando a norma IEEE C57.104 – Guia para Interpretação de Gases Gerados em Transformadores Imersos em Óleo, leva ao seguinte resultado:

- Pela avaliação do gás-chave: Arco elétrico;
- Pela avaliação do possível tipo de falha pelo método dos quocientes de Doernenburg, onde são utilizados os quocientes  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ : Arco elétrico (Descargas parciais de alta intensidade);
- Pela avaliação do possível tipo de falha pelo método dos quocientes de Rogers, onde são utilizados os quocientes  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_5$ : Arco elétrico (Descarga de alta energia).

Quando a CG mostra evolução de gases combustíveis dissolvidos no OMI, é necessário retirar amostras de OMI com mais frequência para análises que irão monitorar as condições do transformador em tempos menores, possibilitando, caso necessário, em função do perfil da evolução dos gases dissolvidos no OMI, a retirada do equipamento de operação antes da falha, o que é desejável, considerando segurança e economia.

#### **3.6.1.4 Cromatografia líquida do óleo mineral isolante (OMI)**

A análise do OMI por cromatografia líquida permite avaliar a evolução do envelhecimento da isolação sólida dos transformadores, através da medição periódica do *teor furfural*, em teste realizado em laboratório.

O *furfural* é um composto gerado exclusivamente durante o processo de decomposição do papel isolante do transformador, sendo que o controle de sua concentração no decorrer do tempo, através do ensaio de cromatografia líquida de alto desempenho, permite avaliar como está se comportando o envelhecimento do transformador [34].

Dos compostos furânicos, gerados no processo de envelhecimento, tais como: 5-hidroxi-metil-furfural; 2-acetilfurano; 5-metil-2-furfural; 2-furfuraldeído; este último é o composto que mais se forma [35], bem como tem boa solubilidade e estabilidade térmica no óleo [36]. Assim as medições para acompanhamento da vida útil da celulose, isolante dos transformadores, é centrada no teor de furfuraldeído, conhecido nas análises de cromatografia líquida como *2-Fal*.

### **3.6.1.5 Análise Físico-Química do óleo mineral isolante (OMI)**

A análise físico-química do OMI é outra poderosa ferramenta de análise preditiva que possibilita a verificação da degradação da isolação dos transformadores pelo monitoramento de alguns parâmetros físico-químicos. É coletada uma amostra de 1 litro de OMI, o que possibilita fazer testes, cujos principais estão mencionados abaixo:

- **Acidez:** como vimos acima a oxidação do óleo forma ácidos, que por sua vez alteram as propriedades isolantes do líquido. O aumento da acidez propicia também a formação de borra, e tem impacto importante na degradação dos materiais celulósicos, bem como contribui para a corrosão das peças de metal existentes para a fixação da parte ativa dos transformadores.

A taxa de crescimento da acidez mostra que o óleo está envelhecendo, sendo que ao atingir o valor de 0,1 mg de KOH/g os riscos para a isolação sólida se tornam muito altos, havendo a necessidade de sua substituição ou regeneração [14].

- **Tensão interfacial:** este ensaio consiste em colocar uma camada de óleo sobre uma camada de água e fazer um anel de platina, imerso na camada de água, passar para a camada de óleo. A força necessária para fazer com que o anel rompa a superfície da água representa a tensão interfacial óleo/água.

Assim, quanto mais puro for o óleo, menor será sua interação com a água e mais alto será o valor obtido para o ensaio.

- **Cor:** a mudança de cor pode ser uma indicação direta da contaminação do óleo isolante, sendo normalmente atribuída à oxidação ou a contaminação com carbono, o que tende a escurecer o óleo [14].
- **Teor de água:** o teste verifica a quantidade de água presente no óleo. É retirada uma seringa com um volume de 50 ml, sendo que a temperatura deve ser medida no ponto de coleta para uma posterior conversão para 20°C.

Quanto mais alta a tensão de operação do equipamento, mais rigoroso é o critério da quantidade máxima permitida de ppm de água no óleo.

- Rigidez dielétrica: este ensaio consiste em colocar uma quantidade de óleo em uma cuba onde existem dois eletrodos padrão. Aumenta-se gradativamente o valor de uma tensão alternada aplicada nos eletrodos, até que haja a descarga entre eles, rompendo o meio isolante [37].

Deve ser obtido um valor mínimo de suportabilidade dielétrica, para que o óleo seja considerado apto para utilização.

O resultado é influenciado por partículas e/ou presença de água no óleo [37].

- Viscosidade: é um fator importante na dissipação do calor proveniente da parte ativa do equipamento, que passando para o óleo deve ser trocado com o meio externo, cumprindo assim a função, também de refrigeração, requerida do óleo isolante.
- Fator de potência: este teste mostra a queda das propriedades dielétricas do OMI. O resultado deste ensaio é afetado pela presença de contaminantes e impurezas dissolvidas no óleo.

Valores elevados podem indicar contaminação por subprodutos de oxidação, água ou partículas condutoras [14]. É uma clara indicação que a isolação está perdendo suas características dielétricas.

Quanto maior a tensão de serviço do equipamento, maior o rigor com relação aos valores admissíveis.

A Tabela 3 mostra um laudo de análise físico-química, com valores característicos de um OMI em boas condições, onde são informadas as normas nas quais a metodologia dos testes foi baseada.

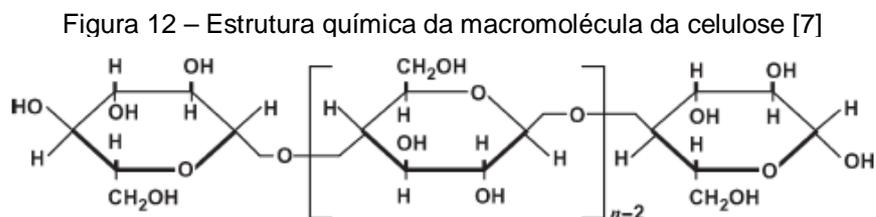
Tabela 3 – Laudo de análise físico-química de óleo mineral isolante [33]

ENSAIO	UNIDADE	MÉTODO	RESULTADO
Cor	-	ASTM 1500	0,5
Densidade 20°C	-	NBR 7148	0,8783
Tensão Interfacial 25°C	mN/m	NBR 6234	41
Teor de água	ppm	NBR 10710	5
Índice de Neutralização	mg KOH/g	NBR 14248	0,01
Rigidez Dielétrica	kV	NBR 6869	71
Fator de potência a 90°C	%	NBR 12133	0,14

### 3.6.2 Papel Kraft

A isolação sólida de transformadores e reatores de potência é composta principalmente de papel Kraft.

Esse material, oriundo da madeira, consiste basicamente de celulose e hemicelulose (90%), cuja molécula é mostrada na Figura 12, possuindo pequena quantidade de lignina residual (7 à 8%), remanescente do processo de transformação da matéria prima em pasta [38].



O processo de obtenção do papel Kraft – assim denominado devido a grande resistência do papel, oriundo da palavra alemã *Kraft*, que significa vigor – foi inventado por Dahl em 1879 [38], na cidade alemã de Danzig.

Neste processo a madeira é tratada com hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, e fazendo uso da terminologia corrente na indústria de papel, escrevemos a equação.



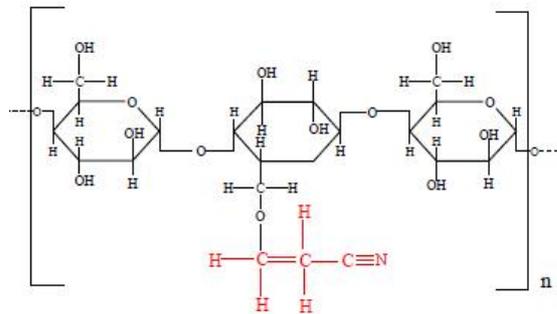
Esse papel formado é conhecido como papel Kraft convencional. A necessidade de um melhor desempenho térmico e mecânico, implicou em estudos para melhorar o papel Kraft convencional, o que levou ao surgimento do papel Kraft termoestabilizado, que melhorou consideravelmente sua resistência a degradação com conseqüente aumento de sua vida útil [40,41]. A termoestabilização é obtida de duas formas.

O primeiro processo é feito por reações químicas de acianoetilação ou cianoetilação, que consiste na substituição dos grupos hidroxilas menos estáveis da molécula da celulose, o que reduz a quantidade de água, que é um dos subprodutos do envelhecimento da celulose, conferindo maior estabilidade térmica ao papel. É

realizada através de uma reação química da celulose com nitrila acrílica, tendo como produto uma celulose parcialmente cianoetilada, como mostra a Figura 13, possuindo nitrogênio com teor aproximado de 2,6 %.

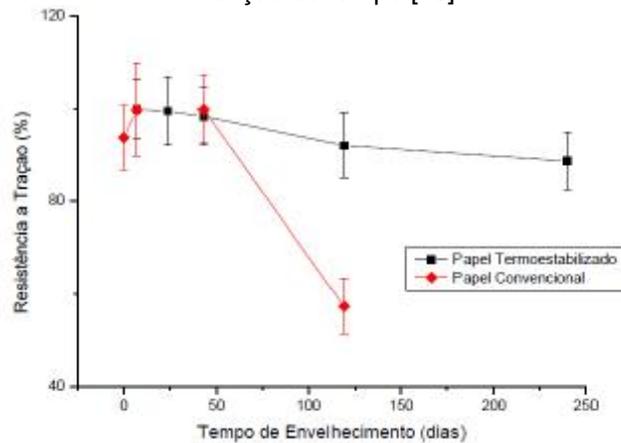
O segundo processo consiste na adição de produtos químicos estabilizadores, como uréia, dicianodiamida, poliacrilamida, melamina, entre outros, no intuito de bloquear a reação do papel com os produtos de envelhecimento [40]. No decorrer da degradação os estabilizadores são consumidos, ao assumirem a reação com os subprodutos do envelhecimento do papel.

Figura 13 – Molécula da celulose parcialmente cianoetilada [40]



No segundo processo, a adição de produtos químicos estabilizadores reprime a tendência autocatalizadora do processo de envelhecimento, por uma reação química com os produtos de envelhecimento, durante o qual os aditivos são consumidos. O papel Kraft termoestabilizado tem a resistência a tração mais estável no decorrer de seu envelhecimento, em relação ao papel Kraft convencional, que apresenta uma queda acentuada a partir de 50 dias de envelhecimento, como mostra a Figura 14.

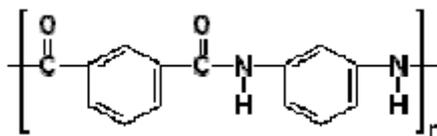
Figura 14 – Variação da resistência à tração do papel Kraft convencional e termoestabilizado em função do tempo [23]



A partir de 1967 foi introduzido no mercado um novo tipo de papel isolante, o Nomex®. Consiste de uma poliamida aromática, aramida, cujo monômero é mostrado na Figura 15, possuindo propriedades físico-químicas que permitem seu uso como material isolante de equipamentos de alta tensão para determinadas solicitações mais severas.

Sua obtenção é realizada através da mistura de pequenas partículas fibrosas aglutinantes e fibras curtas resultantes de cortes transversais de filamentos de fibras de aramida [42].

Figura 15 – Monômero da aramida [42]



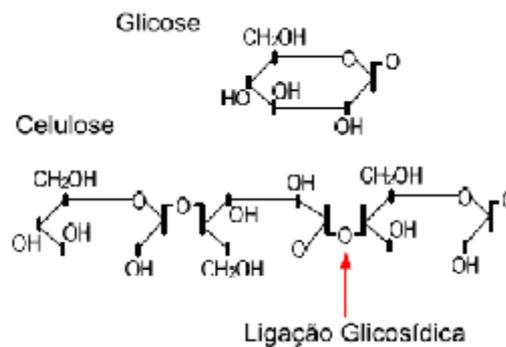
### 3.6.2.1 Grau de polimerização do papel

Ao contrário do óleo o papel não pode ser regenerado ou substituído, sem que haja uma intervenção mais específica no equipamento, sendo necessária a retirada de uma amostra do papel para testes, o que implica na desenergização do transformador, e retirada de toda a carga de óleo, pois normalmente as amostras para análise, são coletadas do topo, meio e fundo da isolação sólida.

Uma forma direta de avaliar o grau de envelhecimento do papel é através da medição do seu grau de polimerização (GP), que mede o número médio dos anéis de glicose – ligações glicosídicas - presentes na celulose, como mostra a Figura 16.

O valor inicial do GP da celulose é de aproximadamente 1200. O processo de condicionamento do equipamento na fábrica, envolvendo todos os passos de sua fabricação, com secagem final em vapour-phase, reduz este valor para algo próximo de 1000. Para valores de GP superiores a 500, a resistência mecânica do papel praticamente não se altera, porém entre 500 e 200, a redução é drástica, chegando a 50 % do valor inicial. Abaixo de 200 considera-se que o papel chegou ao fim de sua vida útil [43].

Figura 16 – Ligações químicas da glicose e da celulose [14]



Como a vida útil do equipamento depende diretamente do papel, pois não pode ser regenerado como o óleo, fica então determinado o final de seu ciclo operativo.

Pesquisadores tem buscado estabelecer uma relação entre o GP e o 2-Fal, de forma a prever o envelhecimento do papel sem a necessidade de uma intervenção invasiva no equipamento, feita por ocasião da coleta de amostras de papel da parte ativa. Esses estudos mostram que quanto menor é o valor do GP do papel Kraft, maior é o valor da concentração de 2-Fal no OMI, o que permite verificar a degradação do papel através do teste do OMI [44].

### 3.8 DEGRADAÇÃO DA ISOLAÇÃO PAPEL-ÓLEO

#### 3.7.1 Degradação natural

Vários estudos experimentais estabeleceram que a temperatura, a umidade e a oxidação são os fatores que mais influenciam no envelhecimento da celulose dos transformadores [45].

A temperatura varia em função da corrente elétrica que percorre os enrolamentos dos transformadores e reatores, pelo seu efeito térmico, conhecido como *Efeito Joule*, bem como seus valores relacionados ao ambiente onde o equipamento está instalado. Da isolação sólida é transferida ao óleo, que em conjunto com a temperatura ambiente, formará o gradiente da massa papel-óleo.

Durante a manufatura, a isolação sólida de um transformador deve ser cuidadosamente seca antes de ser impregnada com óleo isolante, objetivando ter um valor menor que 0,5% em peso. Quase toda a umidade presente no equipamento concentra-se na isolação sólida [46].

O terceiro fator provém da oxidação do óleo, resultado da solicitação por temperatura, ação do oxigênio e de materiais presentes na construção do mesmo, como cobre e outros. Como conseqüência, ocorre a deterioração das propriedades isolantes do óleo, sendo que seus produtos promovem o envelhecimento da celulose e a formação de borra [25-27].

É significativo adicionar o processo de descargas parciais, como um fator de solicitação contínua da isolação sólida, contribuindo para sua deterioração no decorrer do tempo.

A ação destas variáveis em conjunto proporciona o envelhecimento do equipamento fechando assim o ciclo que vai determinar o final de sua vida útil.

Os equipamentos são manufaturados com todo cuidado, perfazendo todas as etapas de sua produção, no intuito de ter uma vida útil de aproximadamente 30 anos. Este tempo pode ser consideravelmente maior dependendo de adequada manutenção colocada em prática, seguindo critérios que acompanhem métodos consagrados e outros novos, que poderão apontar alguma falha incipiente ou sinal de envelhecimento.

Considerando as variáveis discriminadas no item acima, podemos dizer que os mecanismos da pirólise, hidrólise e oxidação concorrem de maneira significativa para a degradação gradual da isolação papel-óleo [23,25,46].

A temperatura nos transformadores depende, principalmente, da ação da corrente que circula nos seus enrolamentos, função da carga ligada ao seu secundário, bem como da temperatura ambiente da subestação na qual o mesmo está instalado.

Os reatores, a partir de sua energização, são solicitados com sua corrente total, dependendo também da temperatura ambiente dos locais onde estão instalados.

A temperatura não é uniforme em todo o enrolamento, sendo a identificação dos pontos quentes do mesmo importante para detectar falhas no sistema de resfriamento, tais como mau funcionamento de radiadores, trocadores de calor e bombas [47].

A indução eletromagnética verificada no núcleo, e em menor escala: terminais, conexões, vigas e demais componentes metálicos [47], utilizados na montagem do transformador, fazendo parte do conjunto de sua parte ativa, também geram aquecimento.

Este calor deve então ser transferido para o óleo, para que possa ser trocado com o meio externo, garantindo uma boa performance do sistema de arrefecimento, o que implicará na degradação natural esperada para o equipamento.

Já a umidade nos transformadores tem grande influência no envelhecimento dos mesmos, sendo fatal para esses equipamentos se não for devidamente controlada.

O conteúdo de água de um transformador novo é inferior a 1% do peso de sua isolação sólida, aumentando gradativamente entre 0,05 e 0,2% ao ano, podendo atingir valores superiores a 4% quando severamente contaminado em idade avançada [46].

Quanto mais alta for a tensão de operação, mais rigorosos serão os parâmetros de umidade a serem controlados. A contaminação por umidade pode se dar de várias formas como:

- Gaxetas de vedação deterioradas;
- Exposição à umidade do ar durante a instalação e comissionamento no campo;
- Exposição à umidade do ar durante a manutenção;
- O envelhecimento normal da celulose produz água;
- Secagem insuficiente durante a fabricação.

Em relação a oxidação que pode ocorrer nos transformadores, estudos envolvendo o envelhecimento acelerado de amostras de OMI e papel Kraft comprovaram que a presença de oxigênio no óleo isolante aumenta muito a taxa de degradação da celulose, com significativa redução do grau de polimerização do papel em curto espaço de tempo [25-27].

Pesquisas recentes apontaram o metanol e o etanol como produtos do envelhecimento da isolação sólida em óleo mineral isolante. Foi revelada a existência de uma ligação direta entre a produção de metanol e a ruptura das ligações glicosídicas da celulose [43].

O metanol está sendo analisado como um possível marcador de envelhecimento do papel isolante. Nos últimos 5 anos pesquisas em amostras de óleo de vários transformadores estabeleceram uma relação com os compostos furânicos. Enquanto o 2-Fal não era encontrado, o metanol apresentava uma quantidade significativa, revelando certa degradação do papel, bem como foi verificado que o metanol é sujeito a flutuações que poderiam ser atribuídas a temperatura, pois o equilíbrio entre o óleo e o papel depende da temperatura, mesmo fenômeno observado para o 2-Fal [43].

É auspicioso que novos métodos que implicam no conhecimento de compostos indicadores da tendência de envelhecimento da isolação papel-óleo possam ser praticados, o que proporciona a intervenção no equipamento em tempo hábil, retardando assim, a formação de borra na etapa final do processo de oxidação.

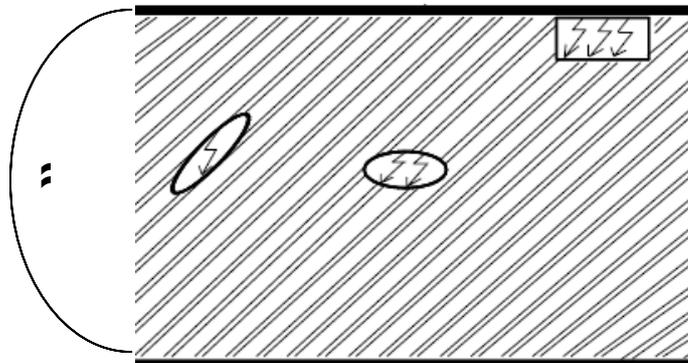
Além da tríade – temperatura, umidade e oxidação – responsável pelo escopo global da degradação da isolação dos transformadores e reatores de potência, é interessante fazer alusão às descargas parciais que ocorrem na celulose, durante a operação destes equipamentos.

As descargas parciais são sucessões de descargas elétricas que não chegam a completar um caminho fechado no interior de um meio isolante, podendo, no decorrer do tempo, levar à deterioração física e química do mesmo [48].

A isolação de papel é submetida a uma tensão, que se distribui por toda a bobina, o que ocasiona a criação de gradientes de tensão que formam campos elétricos, os quais, por sua vez, atuam nas cavidades existentes na celulose. Quando esse campo elétrico atinge determinado valor, tido como crítico, ocorre uma

disrupção dentro da cavidade, que pode se repetir ou se extinguir. A Figura 17 mostra as descargas parciais dentro das cavidades da isolação.

Figura 17 – Ilustração de descargas parciais em cavidades do papel Kraft isolante submetido a uma tensão [49]



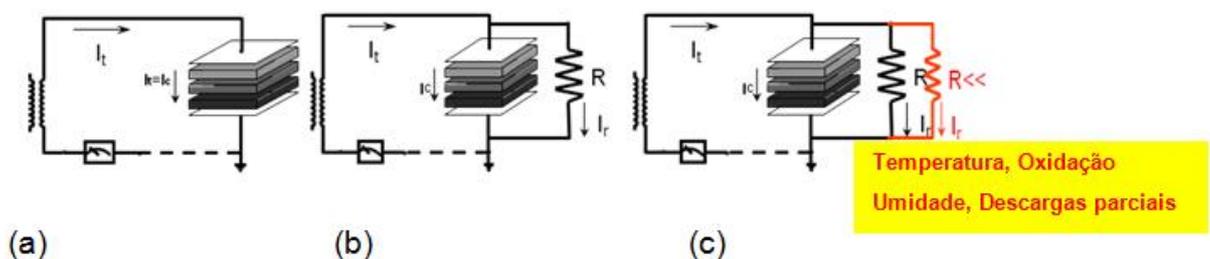
As normas IEC 60270 [50] e NBR 6940 [51] classificam a terminologia usada para definir as descargas parciais [52].

A medição das perdas na degradação é verificada pelo ensaio de fator de potência ( $\cos \varphi$ ) ou perdas dielétricas ( $\tan \delta$ ), que para pequenos valores de  $\delta$  são iguais. Esse teste constitui-se em poderosa e consagrada arma na verificação da gradual perda das propriedades dielétricas da isolação dos transformadores e reatores de potência.

Todo isolante sob tensão possui uma componente capacitiva e outra resistiva, que variam em função do estado em que se encontra o mesmo, conforme mostra a Figura 18.

Considerando uma condição ideal, teríamos somente a parcela capacitiva, que seria igual a corrente total através do capacitor [54].

Figura 18 – Representação da isolação sem perdas (ideal) (a), nova (real) (b) e em deterioração (c) [54]



Na prática, mesmo a isolação nova (19 b), por exemplo, quando o transformador é liberado na fábrica após a manufatura, já possui uma perda que é representada pela componente resistiva da corrente, em paralelo com a corrente capacitiva, compondo assim a corrente total.

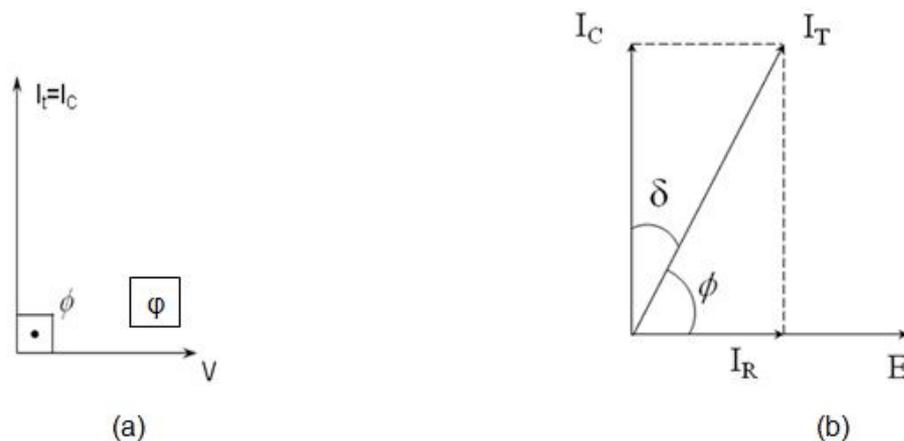
Com o decorrer do tempo a isolação degrada naturalmente devido a ação de todas as variáveis já vistas e que contribuem para tal processo [45,55].

$$\text{Fator de potência } (\cos \phi) = \text{Fator de perdas dielétricas } (\tan \delta)$$

Considerando uma representação gráfica da tensão, correntes capacitiva, resistiva e total, e os ângulos  $\phi$  e  $\delta$ , conforme Figura 19, temos:

Condição ideal, onde não existem perdas, a corrente capacitiva é igual a corrente total e a corrente resistiva é nula. O ângulo  $\phi$ , formado entre a tensão e a corrente, é igual a  $90^\circ$ , e como  $\cos 90^\circ = 0$ , o fator de potência é nulo. O ângulo  $\delta$ , que é o complementar de  $\phi$ , é zero, e como  $\tan 0^\circ = 0$ , o fator de perdas dielétricas é nulo.

Figura 19 – Condição ideal (perda nula) (a) e real (com perda) (b) [54]



Em condições reais, quando existem perdas, aparece a corrente resistiva no eixo horizontal e o ângulo  $\delta$ , complementar de  $\phi$ .

Analiticamente temos:

$$\cos \varphi = \tan \delta$$

$$\cos \varphi = I_R / I_T$$

$$\tan \delta = \text{sen } \delta / \cos \delta$$

$$\tan \delta = (I_R / I_T) / (I_C / I_T)$$

$$\tan \delta = (I_R / I_T) \times (I_T / I_C)$$

Eliminando  $I_T$ , temos:

$$\tan \delta = I_R / I_C$$

$\delta \Rightarrow 0$ :  $I_T = I_C$ , então:

$$\cos \varphi$$

$$\tan \delta = I_R / I_T =$$

A medida que a corrente resistiva aumenta, puxando a componente da corrente total na direção do eixo horizontal, as perdas crescem, aumentando o ângulo  $\delta$ , e diminuindo o ângulo  $\varphi$ . Nota-se que a  $\tan \delta$  começa a mudar seu valor, e mesmo assim minimamente, na primeira casa decimal, em relação ao  $\cos \varphi$ , a partir de uma perda dielétrica de 15%, o que é impensável em termos de integridade da isolação.

A partir de 1% de perda, já existe uma indicação clara que o equipamento necessita de um controle especial e possivelmente de uma intervenção, a ser definida pela manutenção. Portanto para valores aceitáveis de degradação da isolação, os valores do fator de potência ( $\cos \varphi$ ) e do fator de perdas dielétricas ( $\tan \delta$ ) são rigorosamente iguais, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Fator de potência e fator de perdas dielétricas para valores de  $\varphi$  e  $\delta$ 

$\varphi$ (°)	$\cos \varphi$ (%)	$\delta$ (°)	$\tan \delta$ (%)
90	0	0	0
89,914	0,15	0,086	0,15
89,857	0,25	0,143	0,15
89,771	0,40	0,229	0,4
89,599	0,70	0,401	0,7
89,141	1,5	0,859	1,5
88,281	3,0	1,719	3,0
87,134	5,0	2,866	5,0
85,411	8,0	4,588	8,0
84,261	10,0	5,739	10,0
81,373	15,0	8,627	15,2

### 3.7.2 Degradação prematura

As variáveis de envelhecimento, acima citadas, caso não sejam convenientemente controladas, degradam a isolação de forma prematura. Outros processos podem juntar-se à elas, o que acelera a deterioração da isolação e leva à falha prematura [43-50].

O enxofre corrosivo é uma das causas de degradação prematura em transformadores e reatores de potência. A corrosividade em OMI é causada por certas formas de compostos sulfúricos existentes no óleo cru, não totalmente removidos no processo de refino. Além dos aspectos econômicos, a remoção total dos compostos sulfúricos do óleo pode ter aspectos técnicos adversos, pois algumas espécies desses compostos sulfúricos possuem propriedades benéficas ao óleo, uma vez que aumentam a estabilidade à oxidação, o que implica em maior durabilidade do OMI [56].

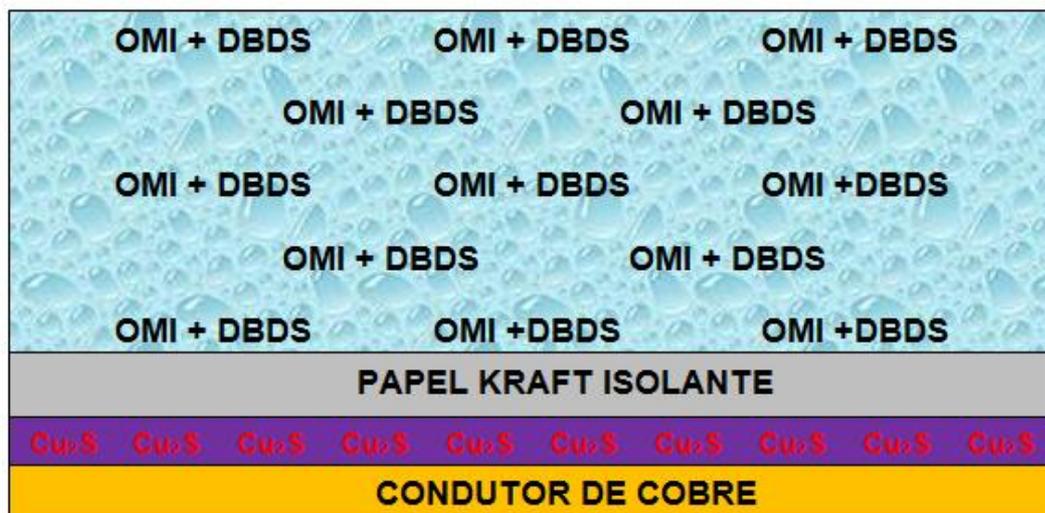
Nos últimos 25 anos houve avanços no processo de refino do óleo bruto que tiveram grande impacto na qualidade do OMI. A quantidade de compostos sulfúricos presentes no óleo foi substancialmente reduzida para atender requisitos de mercado e ambientais, que solicitavam óleos com baixo nível de enxofre [28].

Desde 1996 foi reportado um aumento significativo de falhas em transformadores e reatores, em nível internacional, atribuídas ao enxofre corrosivo. As ocorrências foram relacionadas com certos tipos de óleo, já que nestes mesmos anos aconteceram mudanças nos processos de refino e mistura dos óleos minerais isolantes [57].

Estudos levaram ao conhecimento que o responsável pela corrosividade do óleo era o anti-oxidante DBDS em concentrações da ordem de 100 mg/L ou mais [58].

O OMI inibido com DBDS impregna a isolação sólida do equipamento, promovendo uma reação deste composto sulfúrico com o cobre, formando sulfeto de cobre I,  $\text{Cu}_2\text{S}$ , como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Ilustração da reação do DBDS com o cobre formando  $\text{Cu}_2\text{S}$



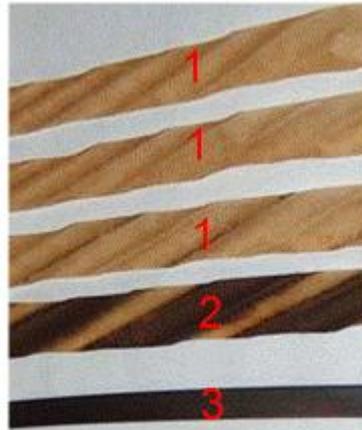
A temperatura é um fator de aceleração para a formação da camada de  $\text{Cu}_2\text{S}$  que se localiza sobre a superfície da espira de cobre.

Caso o depósito na superfície do cobre seja muito grande no decorrer do tempo, é possível haver desprendimento de pequenos flocos de  $\text{Cu}_2\text{S}$ , que são partículas condutivas, normalmente da ordem de 1 à 2 microns, podendo em casos mais raros chegar a 8 microns [60].

Por contato, e dependendo do tempo de atuação do DBDS no condutor, a primeira camada de papel Kraft fica também com depósito de  $\text{Cu}_2\text{S}$ , conforme pode ser visto na Figura 21. A contaminação de camadas, que não a adjacente ao metal,

pode ocorrer ocasionalmente em condições de deposição severa de  $\text{Cu}_2\text{S}$  na tira de cobre.

Figura 21 – Papel sem contaminação (1), papel (2) e cobre (3) contaminados por  $\text{Cu}_2\text{S}$  [56]

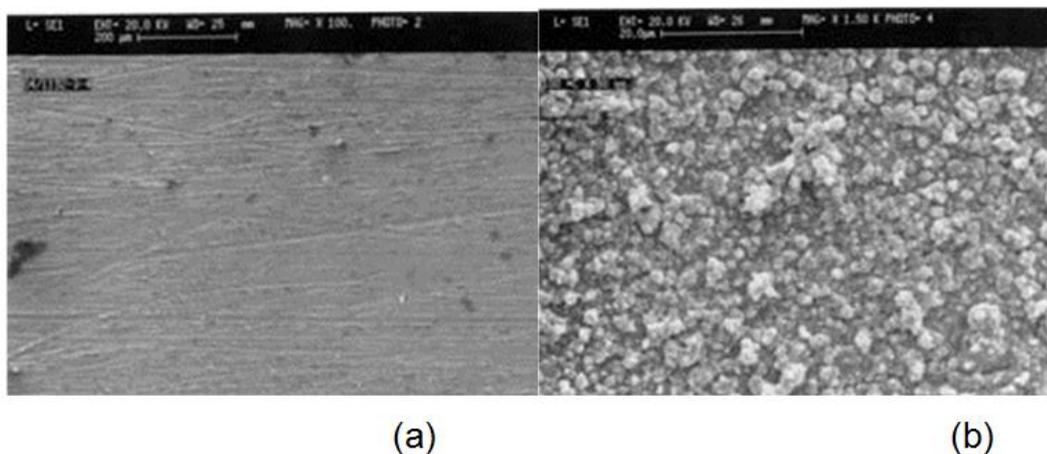


Após a constatação da corrosividade do óleo, deve ser realizada a medição da concentração de DBDS no óleo, pois a redução deste valor indica que está acontecendo a reação do antioxidante com o cobre, contaminando assim o condutor e posteriormente o papel [61,62].

A dificuldade reside no fato de que, se por ocasião da descoberta que o óleo é corrosivo, caso o equipamento esteja há muito tempo em operação, o valor da concentração de DBDS, naquele instante, não informará se já ocorreu grande reação ou não, pois não é conhecido o valor da concentração inicial de DBDS, sua *impressão digital*. Portanto é importante colocar em prática ações para mitigar o problema, imediatamente após saber que o óleo é corrosivo.

A Figura 22 mostra micrografias de papel Kraft normal e impregnado com  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

Figura 22 – Superfície do cobre normal (a) e contaminado com  $\text{Cu}_2\text{S}$  (b) [56]



As normas IEC 60296 – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgears [63], e IEC 60422 – Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance [64], recomendam que os óleos minerais isolantes sejam isentos de compostos sulfúricos que possam ocasionar corrosão.

A razão para tal baseia-se no fato de que certas espécies químicas sulfúricas, já presentes no óleo após o refino, ou adicionadas posteriormente, são responsáveis pela formação de camadas, passíveis de descolamento, de sulfeto de cobre I na superfície de condutores de cobre. Importantes falhas em equipamentos que utilizam óleo como isolante puderam ser atribuídas às partículas de sulfeto de cobre I. Existe também o consenso geral de que mercaptanos, sulfetos orgânicos e dissulfetos são espécies sulfúricas precursoras da formação de sulfeto de cobre I em transformadores isolados a óleo [61-62].

O teste de corrosividade do OMI é baseado na norma ASTM 1275 [65] para detectar a presença de enxofre corrosivo no mesmo. O método consiste na utilização de uma tira de cobre nu imersa em óleo mineral por 19 h à 140°C. A modificação da coloração da tira de cobre revela o grau de corrosividade do óleo, como mostra as Figuras 23 e 24.

A partir de 2005, ficou claro a existência de muitas falhas em transformadores e reatores de alta tensão, devido a ação de enxofre corrosivo, o que provocou a necessidade de pesquisar um método mais eficaz para a verificação da corrosividade, visto que o vigente não conseguia caracterizar o óleo como corrosivo. Decidiu-se aumentar o tempo de imersão da tira de cobre no óleo, de 19 para 48 h, na temperatura de 150°C. Variantes desses parâmetros foram adotadas por alguns laboratórios, sendo que o teste de corrosividade na temperatura de 140°C por 72 h, implicava em praticamente 100% dos OMI resultarem positivos [56].

Figura 23 – Código de cores da ASTM 1275 para definição de corrosividade [58]

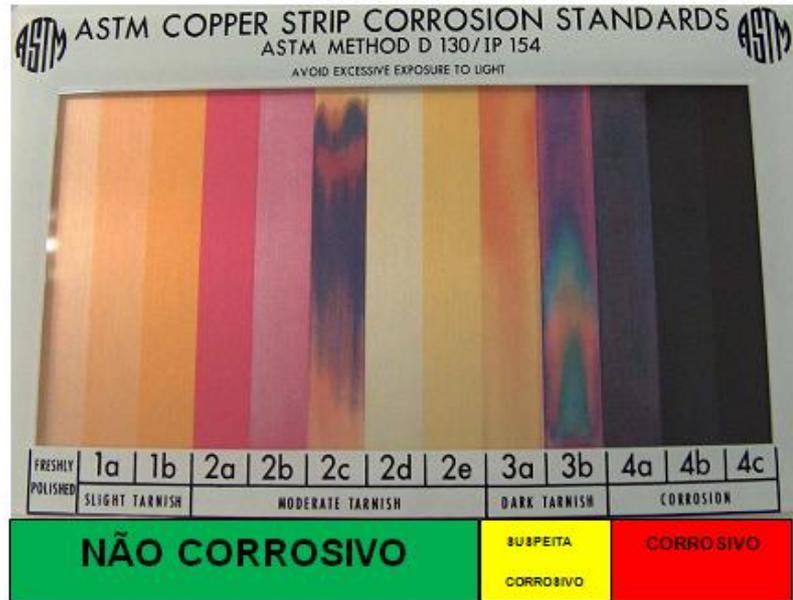
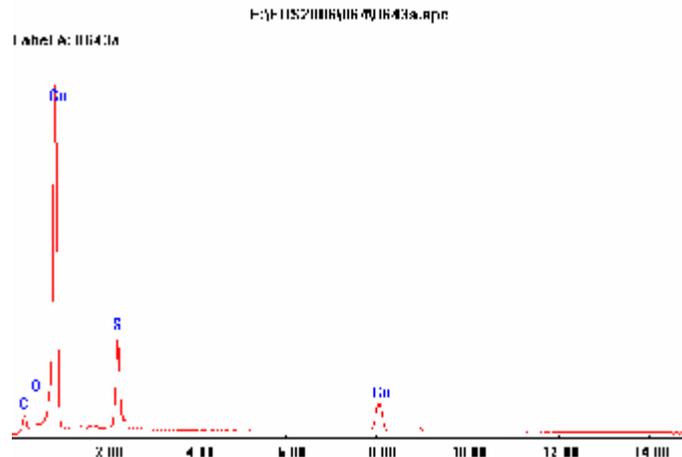


Figura 24 – Amostras de tiras de cobre classificadas pelo código de cores ASTM [58]



A morfologia da superfície do cobre contaminado pode ser visualizada em testes de espectrometria por energia dispersiva, como mostra a Figura 25.

Figura 25 – EDS da superfície de uma tira de cobre imersa em OMI contendo DBDS [66]



O mecanismo de falha responsável pela degradação prematura da isolação do transformador devido a ação do enxofre corrosivo, segue basicamente os seguinte passos [56,58,61,62]:

- DBDS adicionado ao óleo como inibidor da oxidação;
- Reação do DBDS com o cobre dos enrolamentos;
- Formação de sulfeto de cobre I,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ;
- Contaminação da superfície do condutor de cobre;
- Contaminação do papel Kraft em contato com o condutor de cobre;
- Aceleração do processo de descargas parciais interno na celulose;
- Redução da rigidez dielétrica do papel;
- Curto-circuito entre espiras;
- Indisponibilidade do equipamento.

As falhas mais recentes, cuja base é o mecanismo de falha acima discriminado, caracterizam-se pela imprevisibilidade, diferente do processo usual de corrosividade que necessita de anos do equipamento em operação para criar uma quantidade crítica de sulfetos condutivos [60].

Casos foram reportados com resultados de cromatografia gasosa sem qualquer sinal de presença de gases, cuja amostra foi coletada em dia anterior à falha.

Qualquer teste elétrico ou do óleo não é capaz de prever que existe uma condição de pré-falta, o que torna o problema ainda mais crítico. A Figura 26 mostra uma falha devido ação do enxofre corrosivo.

Figura 26 – Curto-circuito entre espiras devido ação de enxofre corrosivo [56]



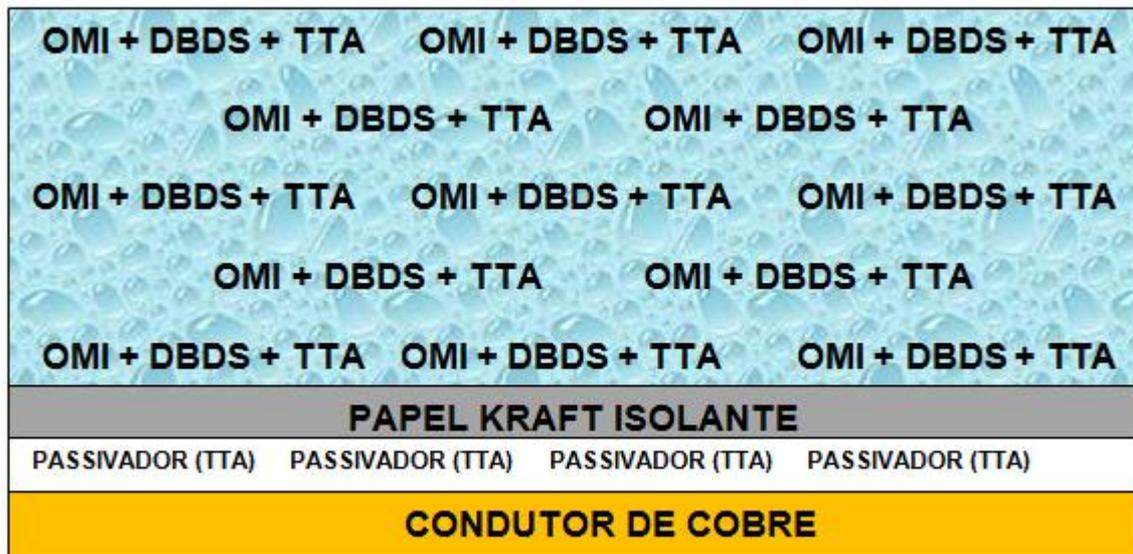
Uma vez diagnosticado o óleo como corrosivo, ações para mitigar o problema devem ser tomadas. As técnicas mais usadas são as seguintes [61,62]:

- Passivação do óleo;
- Repassivação do óleo;
- Substituição da carga de óleo;
- Regeneração do óleo com argila reativável;
- Regeneração com tratamento químico;
- Regeneração do óleo com argila reativável combinado com tratamento químico.

Dentre todas as soluções propostas e principalmente devido ao baixo custo relativo e a capacidade de interrupção do processo de deterioração, a passivação do óleo foi a solução mais adequada adotada.

A passivação do óleo mineral isolante com o tolutriazol (TTA), passou a ser utilizada em larga escala em nível mundial. A passivação inibe a formação e deposição de sulfeto sobre os condutores e papéis, formando um filme protetor, conforme mostrado na Figura 28.

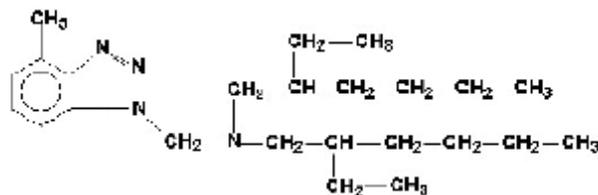
Figura 27 – Passivador impedindo a contaminação do DBDS com o cobre [59]



É importante salientar que a passivação não elimina o possível dano já causado ao equipamento. O processo de formação dos sulfetos e óxidos não é reversível e a extensão da deterioração é dependente da quantidade e do tipo de agente corrosivo, além dos fatores tempo e temperatura [67].

O passivador escolhido e empregado em larga escala é o N-Bis (2-etilhexil)-aminometil-tolutriazol, cuja estrutura molecular pode ser vista na Figura 28. A concentração recomendada é de 100 mg/L [68].

Figura 28 – Estrutura química do tolutriazol usado na passivação [67]



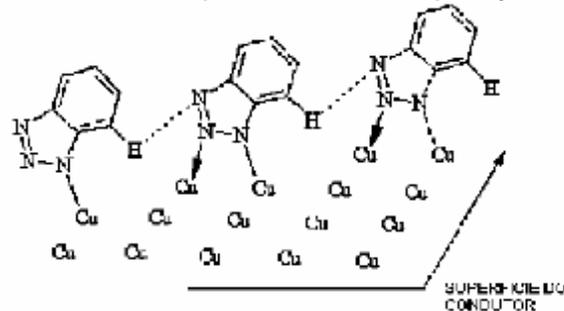
O tolutriazol (TTA) pertencente ao grupo dos benzotriazóis (BTA) tem as seguintes características físico-químicas [67]:

- Viscosidade a 40°C: 80 mm<sup>2</sup>/s;
- Densidade a 20°C: 0,25 g/cm<sup>3</sup>;
- Ponto de fulgor: > 150°C;

- Solubilidade em água: < 0,01%;
- Solubilidade em óleo mineral: > 5%.

As ligações químicas do passivador, mostrado na Figura 29, agem na superfície do condutor de cobre, formando uma camada de proteção.

Figura 29 – Ilustração da molécula do passivador TTA na proteção da camada de cobre [25]



A concentração de passivador no óleo decresce no decorrer do tempo, durante a operação do equipamento. Parte se acumula na parte ativa e parte se perde.

A taxa de decréscimo do teor de passivador aumenta com a elevação da temperatura tanto em atmosfera inerte quanto oxidante [67].

Como a passivação elimina o anti-oxidante, responsável pela reação que levará à contaminação, faz-se necessário a inserção de outro inibidor de oxidação, normalmente o DPBC (di-ter-butil-p-cresol).

Dependendo da concentração do passivador pode haver o aparecimento de gases dissolvidos no óleo [68].

## 4 EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão descritos os materiais, testes executados e métodos utilizados na execução deste estudo.

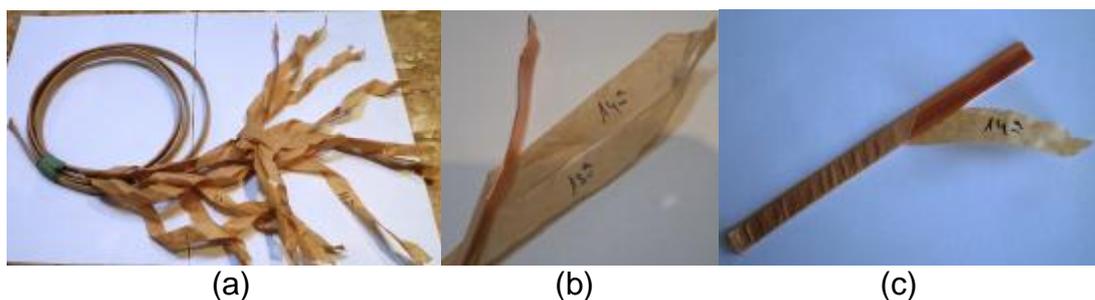
Todos os materiais utilizados foram fornecidos por fabricante de equipamentos elétricos, tratando-se de insumos utilizados em projetos de transformadores e reatores de potência.

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Papel Kraft

O papel Kraft é o isolante usado nas espiras dos enrolamentos de transformadores. A espira fornecida é composta do condutor de cobre, de 1 cm de largura x 1mm de espessura, isolado com 14 camadas de papel Kraft, cada uma com 1,5 cm de largura e espessuras variando entre 71 e 154  $\mu\text{m}$ , como mostra a Figura 30. As camadas do papel Kraft isolante foram contadas da mais externa, 1<sup>a</sup>, para a mais interna, 14<sup>a</sup>, esta, em contato com a tira de cobre.

Figura 30 – Condutor de cobre e as 14 camadas de papel Kraft isolante (a), detalhe das duas últimas camadas de papel (b), detalhe da 14<sup>a</sup> camada de papel (camada junto ao condutor de cobre) (c)



#### 4.1.2 Cobre

O cobre é o material condutor utilizado na confecção das espiras dos enrolamentos de transformadores, como pode ser visto na Figura 31.

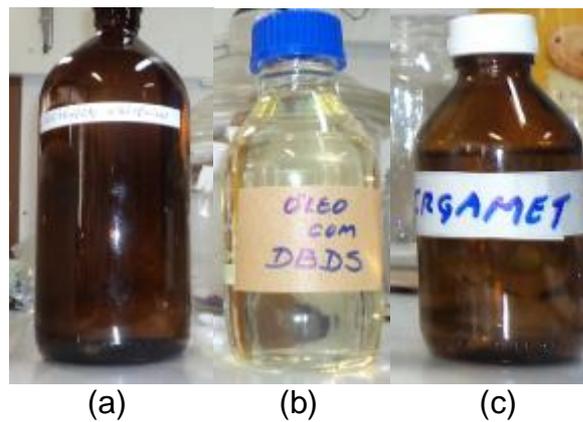
Figura 31 – Segmento da tira de cobre utilizada na confecção das espiras dos transformadores



#### 4.1.3 Óleo mineral isolante (OMI) sem e com DBDS e o passivador

Foram utilizados OMIs novos, sem e com DBDS como inibidor da oxidação, e o irgamet 39 da CIBA como passivador, conforme podem ser vistos na Figura 32.

Figura 32 – OMI de base naftênica sem DBDS (a), com DBDS (b) e passivador do OMI (c)



## 4.2 METODOLOGIA

### 4.2.1 Caracterização

As amostras foram caracterizadas através de testes físicos, morfológicos, químicos e térmicos.

## 4.2.2 Ensaio físicos

### 4.2.2.1 Umidade do papel

Foram cortados, de cada uma das 14 camadas de papel Kraft, 3 segmentos de 5 cm de comprimento, totalizando 42 amostras, como mostra a Figura 34, para teste em triplicata e o valor da umidade foi obtido pela média aritmética das 3 amostras de cada camada.

Figura 33 – 42 amostras de papel Kraft, 03 de cada uma das 14 camadas



Cada amostra foi pesada em balança de precisão, marca Martes – Modelo AY220, sendo colocadas em estufa para secagem por 24 h na temperatura de 100°C. Após a retirada da estufa as amostras foram pesadas novamente. Foi calculada a média aritmética das 03 amostras de cada camada com o respectivo desvio padrão.

### 4.2.2.2 Gramatura do papel Kraft isolante

Sendo o comprimento de cada tira de 5 cm e a largura de 1,5 cm, a gramatura ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) de cada amostra foi calculada dividindo o peso de cada uma das 42 amostras (g) por  $0,00075 \text{ m}^2$ . Foi calculada a média aritmética das 03 amostras de cada camada com o respectivo desvio padrão.

#### **4.2.2.3 Densidade do papel Kraft isolante**

Foram medidas as espessuras de cada uma das 42 amostras, com aparelho da marca Mitutoyo ( $\mu\text{m}$ ), em oito pontos aleatórios de cada tira de papel. A densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) foi calculada dividindo o peso de cada uma das 42 amostras (g) por  $7,5 \text{ cm}^2 \times$  (média da espessura de cada amostra ( $\mu\text{m}$ ) / 10000). Foi calculada a média aritmética das 03 amostras de cada camada com o respectivo desvio padrão.

#### **4.2.2.4 Densidade do óleo mineral isolante (OMI)**

A densidade do óleo foi determinada por picnometria. Os ensaios foram realizados com o auxílio de um picnômetro de vidro de 50 ml e uma balança analítica da marca Martes, modelo AY 220. Foram verificadas as densidades do óleo normal sem aquecimento, normal aquecido em estufa por 72 h à  $140^\circ\text{C}$ , inibido com DBDS e aquecido em estufa por 72 h à  $140^\circ\text{C}$ , inibido com DBDS e passivado com toluotriazol e aquecido em estufa por 72 h à  $140^\circ\text{C}$ . Para correção dos valores à temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , foi utilizada a Tabela 1 da norma ASTM D4052 – Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter [69].

#### **4.2.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Para os ensaios de MEV foi utilizado o microscópio JSM – 5800 Scanning Microscope com tempo de contagem – DT – entre 20 e 30, a 10 kV. As amostras de cobre foram analisadas com aumentos de 1000 e 5000 vezes e o papel Kraft com aumentos de 100 e 1000 vezes.

Foram analisadas três amostras, que ficaram imersas em OMI normal, inibido com DBDS e inibido co DDS e passivado.

A amostra de papel Kraft é da camada em contato com o cobre, a 14<sup>a</sup>.

### 4.2.3 Ensaio químicos

#### 4.2.3.1 Corrosividade do OMI

Foi utilizado o método ASTM D1275B estendido, 72 h em estufa a 140°C, por ser o que apresentou resultados mais confiáveis, como explicado no assunto de corrosividade do OMI, da revisão bibliográfica.

Para o teste das reações do óleo com o cobre, foram empregados OMI novo, OMI novo com o inibidor de oxidação DBDS e OMI novo com o inibidor de oxidação DBDS passivado com tolutriazol.

O óleo contendo DBDS foi passivado numa concentração de 100 mg/L de Irgamet 39 da CIBA. Para tanto, foi utilizada uma pipeta Eppendorf monocanal, com escala de 2 à 20 µL, ajustada em 5µL, que corresponde a concentração de 100 mg/L de passivador para um volume de 50 ml de óleo.

Com volume de 50 ml de OMI em cada um, 6 frascos foram utilizados para realizar um teste em duplicata, sendo dois com óleo novo, dois com óleo novo inibido com DBDS e dois com óleo novo inibido com DBDS e passivado com tolutriazol.

Tiras de cobre nu e isolado, com comprimentos aleatórios, foram imersas nos 6 vidros.

Os frascos, com as amostras imersas, foram posicionados em uma bandeja e colocados na estufa, como mostra a Figura 34.

Figura 34 – Amostras de cobre nu e isolados imersos no óleo antes do envelhecimento



#### **4.2.3.2 Análise de Cromatografia Gasosa**

Para os ensaios de cromatografia gasosa foi utilizado o cromatógrafo a gás, modelo CG 90, com software N2000 online chromatostation, do fabricante Intecrom. Foram medidas as concentrações dos seguintes gases dissolvidos no óleo: H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, para as seguintes amostras:

- Óleo novo não submetido a aumento de temperatura em estufa;
- Óleo novo aquecido em estufa por 72 h a 140°C;
- Óleo novo inibido com DBDS aquecido em estufa por 72 h a 140°C;
- Óleo novo inibido com DBDS e passivado com tolutriazol, aquecido em estufa por 72 h a 140°C.

#### **4.2.3.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)**

Para avaliação do papel novo e em contato com o cobre imerso em óleo, inibido com DBDS, por uma semana na temperatura de 140°C, foi utilizada a técnica de FTIR. A caracterização por espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier foi realizada em um espectrômetro modelo Spectrum 400 FT Mid-IR PerkinElmer com varredura de 4000 a 600 cm<sup>-1</sup>. As leituras foram realizadas por absorvância à temperatura ambiente (25 ± 3°C).

#### **4.2.4 Ensaios térmicos**

##### **4.2.4.1 Análise Termo Gravimétrica (TGA)**

Para a determinação quantitativa da composição do papel novo e em contato com o cobre imerso em óleo, inibido com DBDS, por uma semana na temperatura de 140°C, foi utilizada a técnica de análise termogravimétrica, TGA.

No TGA foi utilizado o modelo 2050 da TA Instruments, em uma faixa de temperatura de 25°C a 800°C, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min, em cadinho de platina, sob atmosfera de N<sub>2</sub> (90 mL.min<sup>-1</sup>).

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos nos testes realizados. Os resultados serão mostrados na forma de tabelas, gráficos e fotos, com análise dissertativa dos mesmos.

### 5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

#### 5.1.1 Umidade, espessura, gramatura e densidade do papel kraft

A tabela 5 mostra a média dos resultados das propriedades físicas (umidade, espessura, gramatura e densidade) das 14 camadas do papel Kraft que envolvia o condutor de cobre antes do envelhecimento.

As medidas de umidade de cada uma das 14 camadas de papel Kraft, apresentam nas camadas mais externas (1 a 7) um percentual ligeiramente superior às camadas internas (8 a 14) próximas ao cobre. Estes resultados podem ser devidos ao fato das camadas externas estarem em contato com a umidade do meio ambiente, e como o papel possui um comportamento higroscópico, caracterizado por ser um isolante polar, com presença do grupo hidroxila (OH) proveniente de seus componentes (celulose e hemicelulose), apresentando grande porosidade, o que implica numa capilaridade acentuada [22].

Já as medidas de espessura apresentaram valores superiores nas camadas mais externas (1 a 7), estabelecendo uma diferença bem definida em relação às camadas mais internas (8 a 14) em direção ao condutor de cobre, como pode ser visto na Figura 35. O fato deve-se a especificação de projeto para condutores transpostos. Cada fabricante adota parâmetros próprios nas diversas etapas de manufatura de seus equipamentos, definidos por critérios técnicos internos específicos.

Nas medidas de gramatura de cada uma das 14 camadas de papel, verifica-se uma diminuição considerável no valor a partir da 8ª camada em direção ao cobre (camadas internas), evidenciando duas sequências distintas. A média aritmética das 7 primeiras camadas externas foi de  $74,3 \text{ g/m}^2$ , e das 7 últimas camadas internas de  $50,9 \text{ g/m}^2$ , ou seja houve um decréscimo da espessura de aproximadamente 33%, que pode ser melhor visualizado na Figura 36. A diferença verificada é consequência

do projeto adotado pelo fabricante, como exposto na consideração relativa a espessura do papel, uma vez que nas 7 camadas mais externas a massa apresenta valores maiores, o que implicará em valores mais altos da gramatura. Os valores conferem com aqueles encontrados em estudos relacionados as propriedades do papel Kraft [70].

Finalmente a densidade de cada uma das 14 camadas de papel, mostrou uma tendência oposta a da gramatura, ou seja, as camadas externas apresentaram maior densidade do que as internas. Isto se deve a menor espessura das camadas internas, porém, este padrão não se verifica em todas as camadas, pois ao passo que a espessura diminui nas camadas internas, a massa também diminui, podendo alguma camada apresentar resultado diferente da tendência. O valor medido está dentro do intervalo de valores típicos de densidade para este tipo de papel que é de 0,58 à 0,69 g/cm<sup>3</sup> [70,71].

Tabela 5 – Resultados das propriedades físicas do papel Kraft

<b>Camada*</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Espessura (µm)</b>	<b>Gramatura (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	3,11 ± 1,354	140,67 ± 5,507	75,82 ± 1,557	0,540 ± 0,029
2	4,25 ± 1,077	122,33 ± 8,327	73,73 ± 2,596	0,604 ± 0,036
3	5,05 ± 2,326	129,33 ± 11,930	73,42 ± 3,099	0,569 ± 0,030
4	2,64 ± 0,483	124,00 ± 0,000	72,13 ± 2,894	0,582 ± 0,023
5	2,30 ± 0,633	137,00 ± 18,25	75,33 ± 2,888	0,555 ± 0,064
6	3,13 ± 1,908	137,67 ± 15,177	74,31 ± 1,820	0,545 ± 0,065
7	1,26 ± 0,715	135,33 ± 4,041	75,60 ± 1,852	0,559 ± 0,021
8	2,71 ± 1,809	87,33 ± 12,897	51,51 ± 1,475	0,599 ± 0,091
9	2,08 ± 1,355	83,67 ± 9,504	50,36 ± 1,413	0,608 ± 0,087
10	2,17 ± 1,164	77,00 ± 2,646	49,87 ± 1,867	0,648 ± 0,025
11	1,63 ± 0,730	83,00 ± 15,621	50,44 ± 2,208	0,624 ± 0,127
12	1,46 ± 0,151	83,33 ± 5,033	52,33 ± 0,742	0,632 ± 0,030
13	1,95 ± 0,760	84,67 ± 3,512	51,78 ± 1,469	0,612 ± 0,030
14	1,18 ± 0,704	71,00 ± 2,000	50,18 ± 1,134	0,707 ± 0,018

\* numeração iniciando da parte externa à interna.

Figura 35 – Espessura do papel Kraft por camada antes do envelhecimento

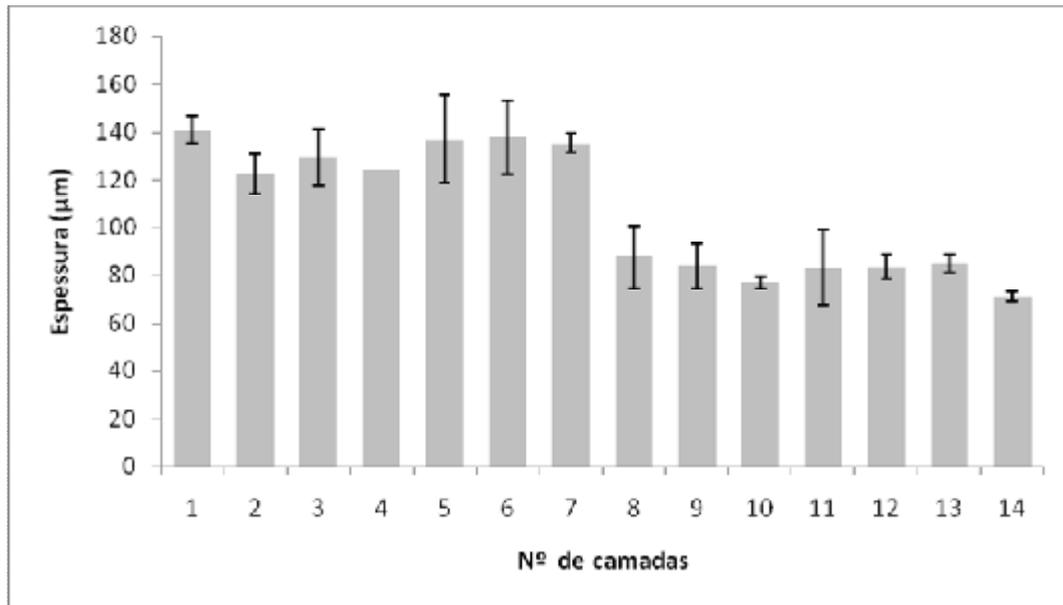
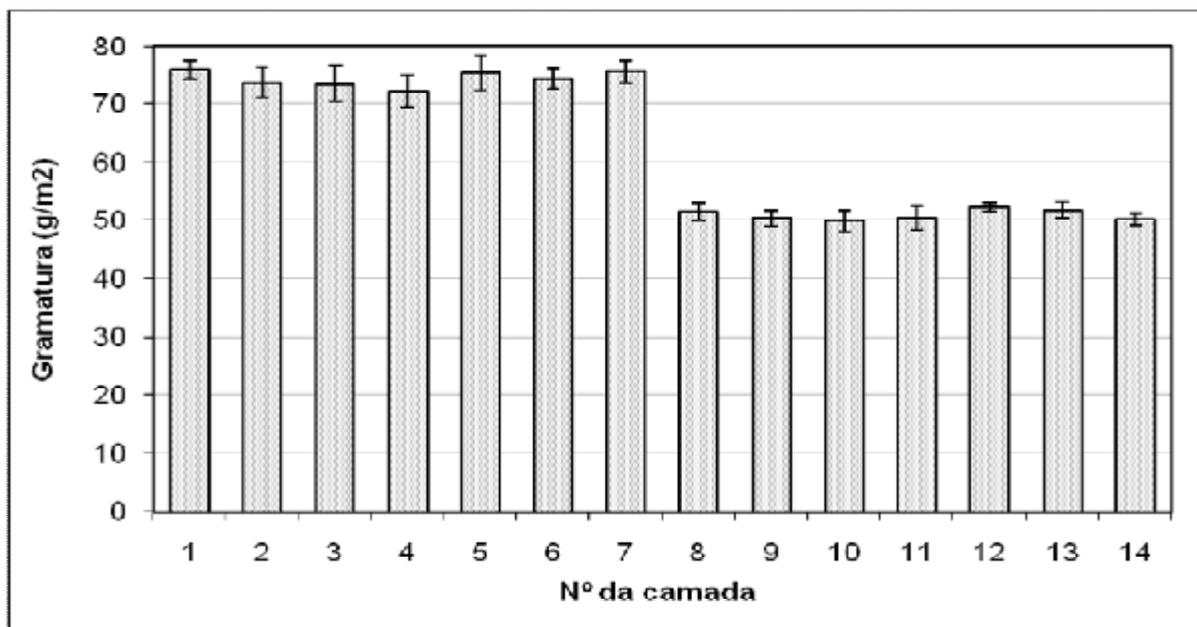


Figura 36 – Gramatura do papel Kraft por camada antes do envelhecimento

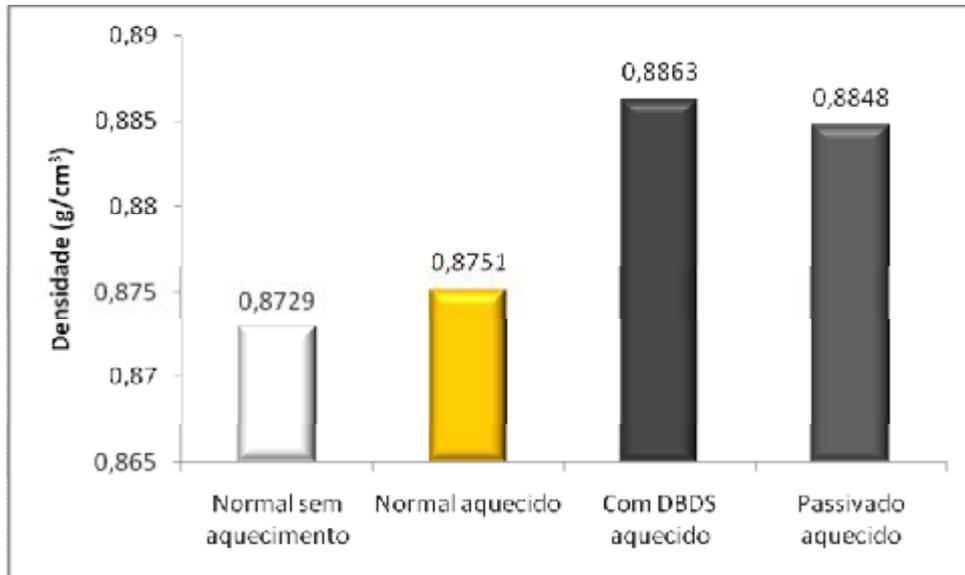


### 5.1.2 Densidade do OMI

As amostras que foram aquecidas - óleo normal, inibido com DBDS e passivado - apresentaram elevação da densidade, com maior valor para o OMI inibido com DBDS, como pode ser visto na Figura 37. Esse comportamento se deve provavelmente a reação do OMI com as tiras de cobre nu e isolado. Os valores medidos estão dentro da faixa de densidade a 20/4° C (0,861 à 0,900), estipulado na

NBR 7148 [72]. O valor é da ordem de grandeza da densidade declarada nos dados técnicos de OMI's de larga utilização no mercado [73,74].

Figura 37 – Densidades do OMI em 4 condições



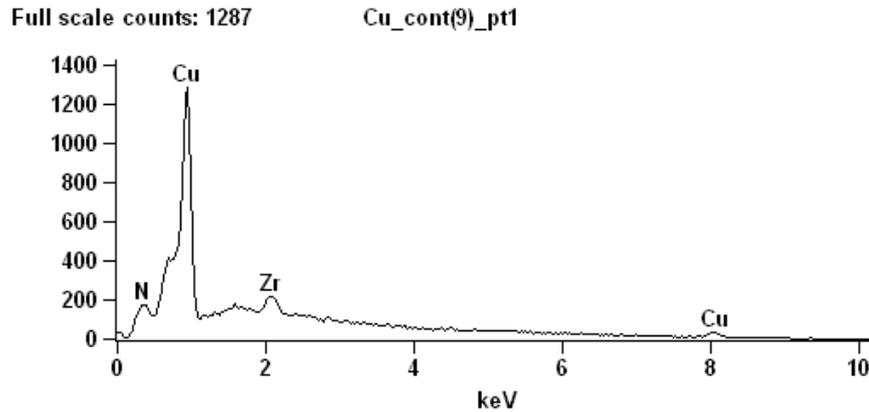
## 5.2 Propriedades morfológicas do cobre e do papel Kraft, MEV e EDS

Para avaliar a influência dos OMIs normal, inibido com DBDS e inibido com DBDS e passivado com toluotriazol na morfologia da superfície das tiras de cobre nu e isolado, micrografias de MEV com ampliação de 1000 e 5000 vezes para o cobre nu e 100 e 1000 vezes para a camada de papel Kraft isolante junto ao cobre (camada 14) foram realizadas. Essas micrografias mostram as diferenças em cada uma das amostras.

### 5.2.1 Cobre nu imerso em OMI normal

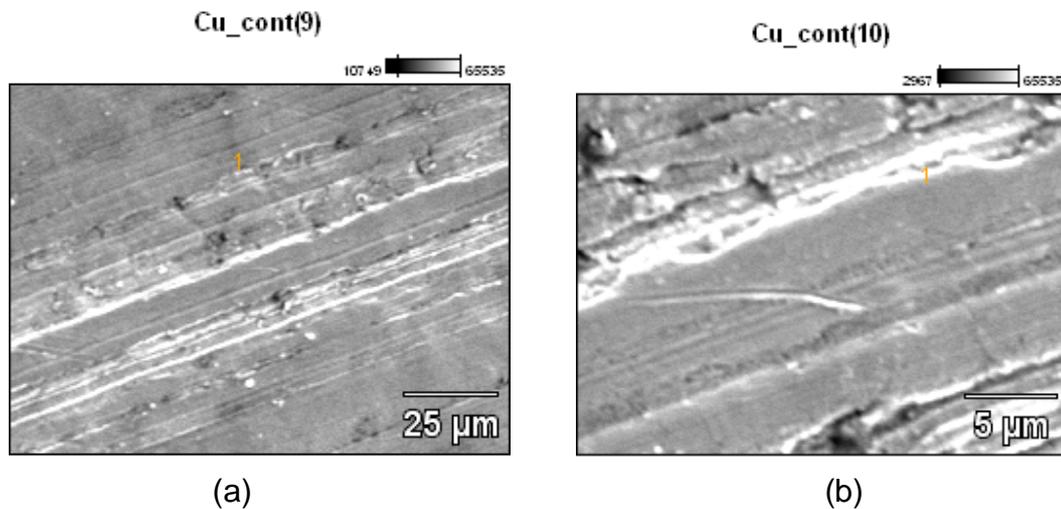
A Figura 38 mostra o resultado de EDS da superfície da tira de cobre nu, onde aparece um pico intenso correspondente ao cobre com valor superior a 80%, como esperado. Foram detectadas concentrações de nitrogênio da ordem de 15% e traços de zircônio, que pode ser adicionado ao cobre para melhorar as propriedades físicas de resistência ao amolecimento e à fluência [75].

Figura 38 – Espectro de EDS da superfície do cobre nu imerso em óleo normal após 72 h em estufa à 140°C



Na Figura 39 são mostradas as micrografias, feitas no MEV, da superfície da tira de cobre nu, que apresentam aspecto normal, característico do metal com algumas linhas unidirecionais (produzidas no processamento). Esses resultados são característicos e encontrados na literatura [76].

Figura 39 – Micrografias da superfície do cobre nu imerso em OMI normal após 72 h em estufa a 140°C: 1000X (a) 5000X (b)

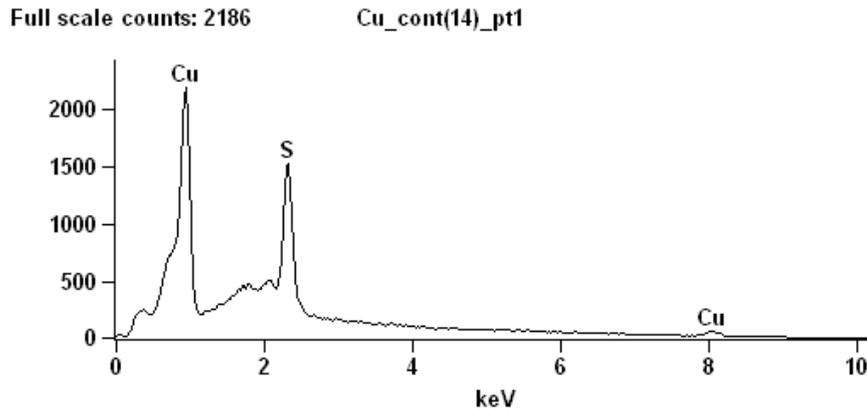


### 5.2.2 Cobre nu imerso em óleo inibido com DBDS

No espectro de EDS da Figura 40 é clara a presença de enxofre na superfície de cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS. A concentração, na ordem de 20%, evidencia a reação do inibidor DBDS com o cobre, formando sulfeto de cobre I. O restante, em torno de 80%, ficou restrito ao cobre. As concentrações encontradas

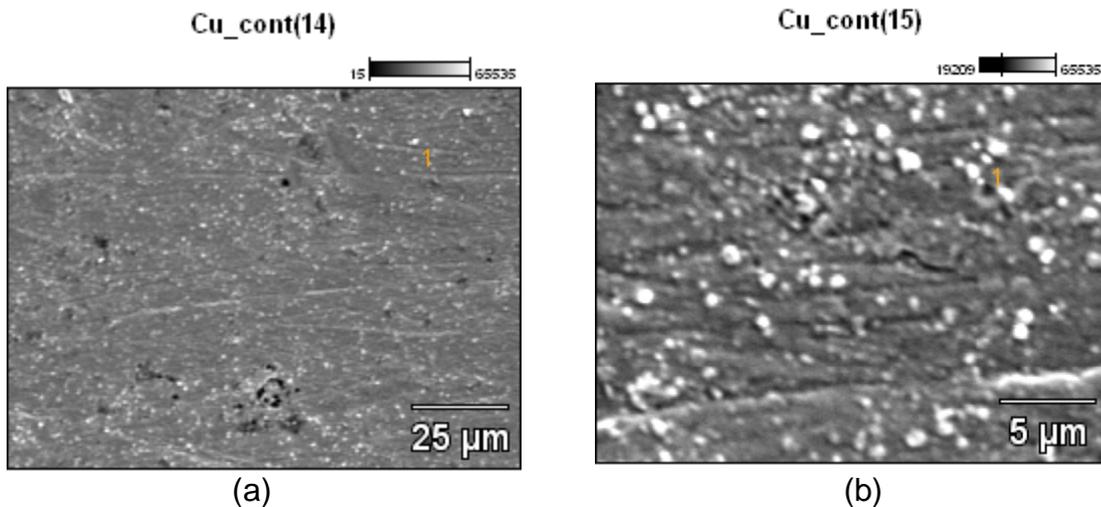
destes dois elementos químicos é bem característica de espectros de EDS encontrados na literatura [66].

Figura 40 – Espectro de EDS da superfície do cobre nu imerso em óleo inibido com DBDS após 72 h em estufa à 140°C



Na Figura 41 são mostradas as micrografias da superfície da tira de cobre após ser imersa em OMI com DBDS, onde é possível observar alguns vazios na imagem da esquerda, e com maior ampliação, verifica-se uma maior rugosidade com presença de partículas claras granulares indicando que a tira de cobre está coberta por  $\text{Cu}_2\text{S}$ , após a reação com o anti-oxidante DBDS. Estes resultados são corroborados na literatura [56,77].

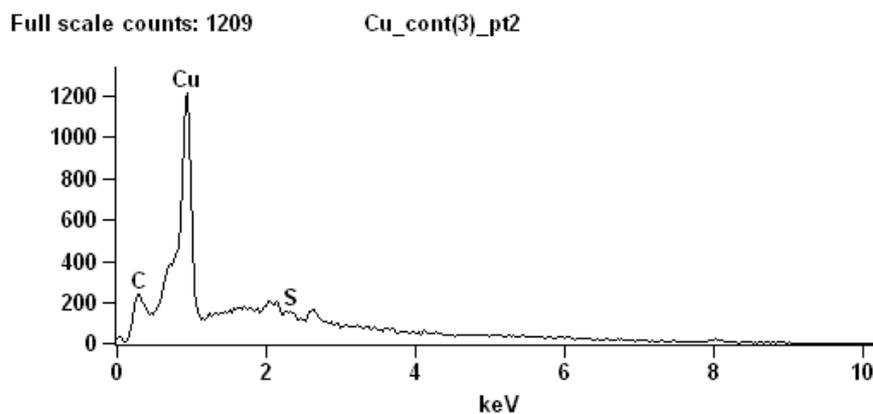
Figura 41 – Micrografias da superfície do cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS após 72 h em estufa a 140°C : 1000X (a) 5000X (b)



### 5.2.3 Cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com toluotriazol

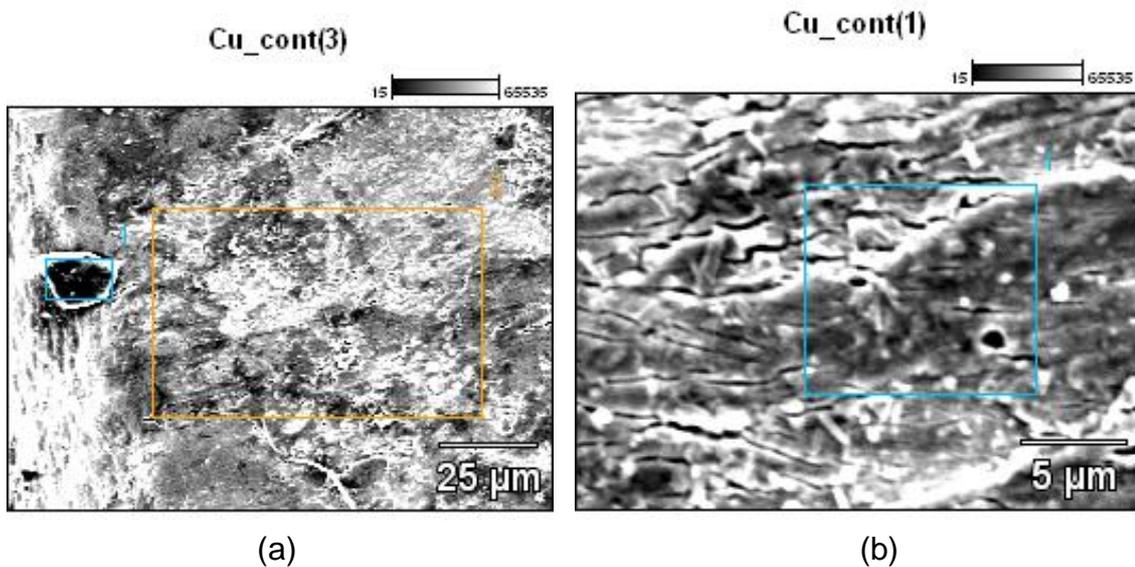
A acentuada queda na concentração de enxofre para valores irrelevantes, como pode ser verificado na Figura 42, atesta a eficácia da ação do passivador toluotriazol, na proteção da superfície do cobre ao ataque do DBDS. Vários estudos [57, 76], comprovaram a ação protetora do passivador utilizado neste teste.

Figura 42 – Espectro de EDS da superfície do cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com toluotriazol após 72 h em estufa a 140°C



Na Figura 43, as imagens da superfície da tira de cobre nu, apesar de não apresentarem aspecto do metal exatamente como naquelas que o cobre ficou imerso em óleo normal, mostra que o metal não aparece mais com a visualização cinza-escuro, como visto na amostra que ficou exposta à contaminação com DBDS. Existe na verdade uma situação intermediária, onde a contaminação não é mais visível, porém uma rugosidade na superfície do cobre diferencia esta micrografia daquela na qual o cobre ficou imerso em óleo normal, como pesquisado na literatura [76].

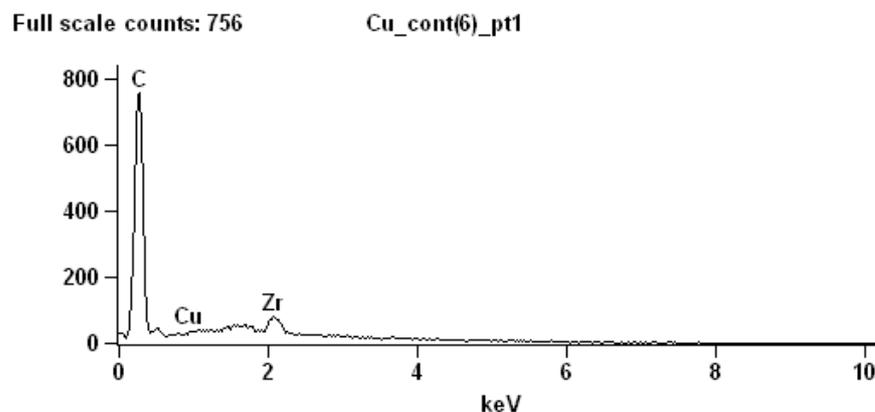
Figura 43 – Micrografias da superfície do cobre nu imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutrizol após envelhecimento por 72 h em estufa a 140°C: 1000X (a) 5000X (b)



#### 5.2.4 Papel Kraft junto a tira de cobre isolado, imerso em OMI normal

O espectro de EDS, na Figura 44, mostra uma concentração de carbono superior a 90%, como era esperado em função da composição química das moléculas de celulose, hemicelulose e lignina [23]. Observa-se um pequeno ombro correspondente ao cobre, isto provavelmente devido a tira de papel ser a última (camada 14), justamente em contato com o metal.

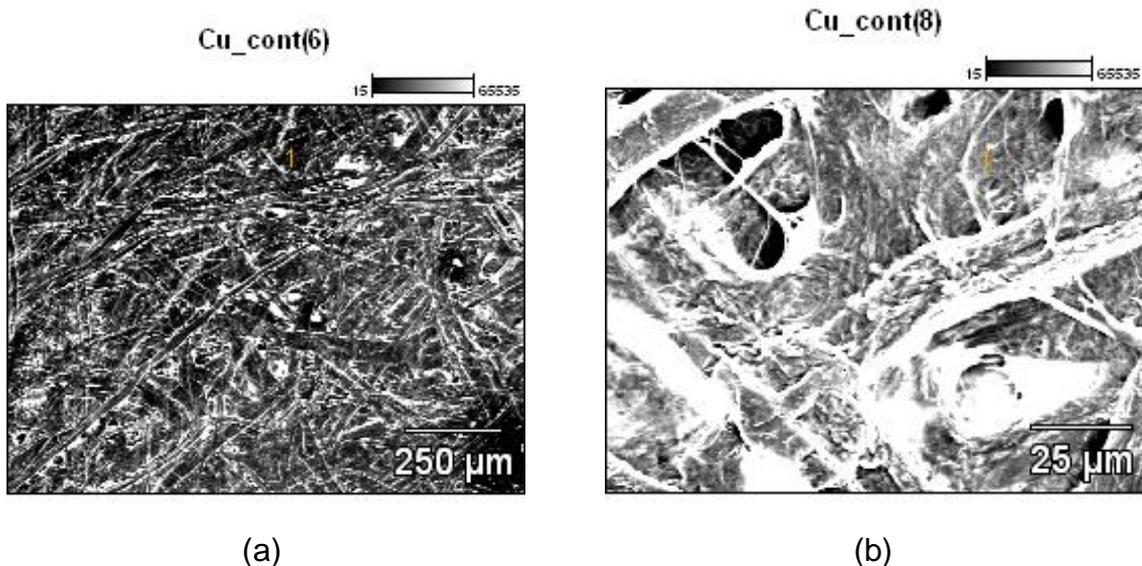
Figura 44 – Espectro de EDS da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com o cobre (camada 14) imerso em OMI normal após 72 h em estufa à 140°C



As micrografias da superfície do papel Kraft imerso em óleo normal após 72 h em estufa à 140°C são mostradas na Figura 45, onde é possível observar o

entrelaçamento das fibras lignocelulósicas (Figura 45-a) e uma topografia mais porosa, visualizada com maior ampliação (Figura 45-b). Estes resultados são corroborados por estudos da literatura [23,40,44,78,79] onde várias micrografias podem ser observadas com aspecto similar.

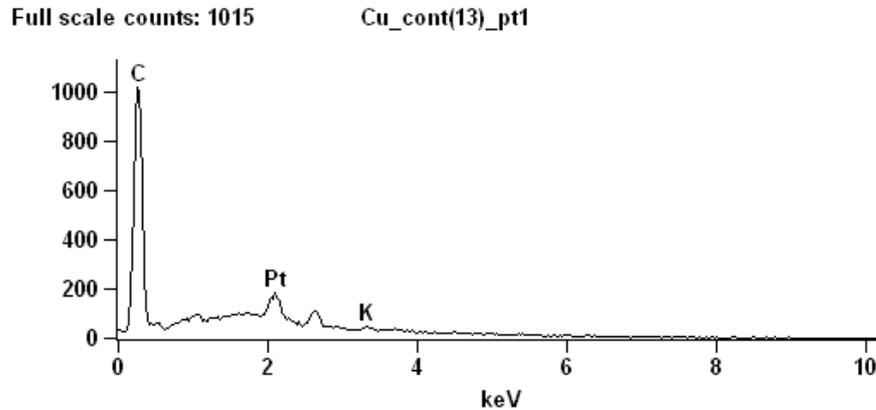
Figura 45 – Micrografias da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com o cobre (camada 14) imerso em óleo normal, após envelhecimento por 72 h em estufa a 140°C: 100X (a) 1000X (b)



### 5.2.5 Papel Kraft junto a tira de cobre, imerso em OMI com DBDS

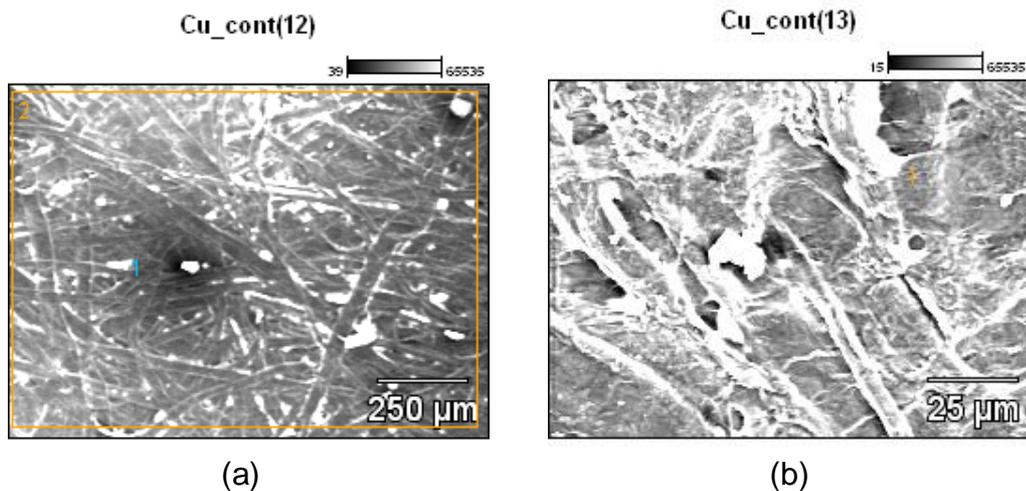
O espectro de EDS da Figura 46, apresenta uma predominância na concentração de carbono na casa de 95%, com traços de potássio. O tempo de 72 h na temperatura de 140° C, não foi suficiente para fazer com que o óleo penetrasse no papel a ponto do DBDS reagir com o cobre, formando  $\text{Cu}_2\text{S}$ , que pudesse alterar a superfície do papel. Regiões de maior porosidade poderiam facilitar a penetração do óleo com DBDS e conseqüente reação com o enxofre. O papel Kraft isolante que reveste o condutor de cobre dificulta a reação do óleo com o cobre, atuando como uma barreira. O espectro de EDS do papel Kraft apresenta similaridade na literatura técnica [23].

Figura 46 – Espectro de EDS da superfície da camada do papel Kraft isolante junto ao core (camada 14) imerso em OMI inibido com DBDS após 72 h em estufa à 140°C



As micrografias de MEV da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com a tira de cobre (camada 14) imerso em OMI com DBDS após 72 h em estufa à 140°C são mostradas na Figura 47, na qual podemos notar as fibras da celulose com aspecto ligeiramente diverso do teste anterior (Figura 45). A pequena diferenciação não suporta qualquer afirmação de visualização de contaminação no papel. Podemos dizer, nesse caso, que as micrografias do papel sobre a camada de cobre imersas no óleo inibido com DBDS, apresentou resultado similar ao papel sobre a camada de cobre imersas em óleo normal, sem o inibidor de oxidação DBDS. Estudos de envelhecimento com papel Kraft convencional e termoestabilizado [23] apresentam micrografias similares.

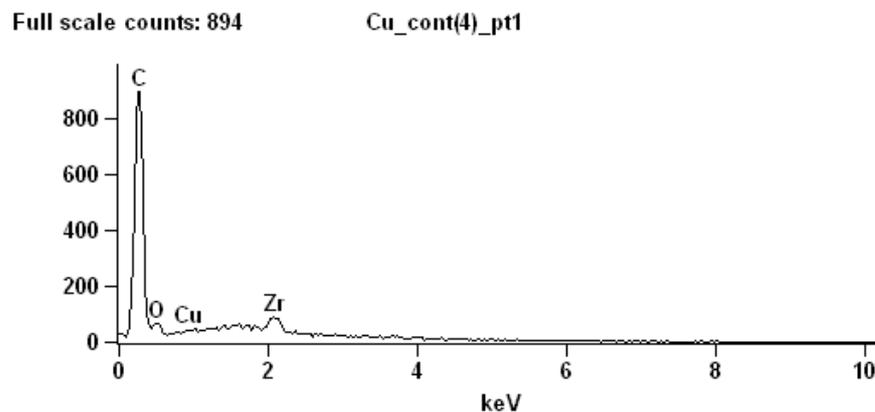
Figura 47 – Micrografias da superfície da camada de papel Kraft em contato com o cobre (camada 14) imerso em OMI inibido com DBDS, após envelhecimento em estufa por 72 h a 140°C: 100X (a) 1000X (b)



### 5.2.6 Papel Kraft junto a tira de cobre, imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol

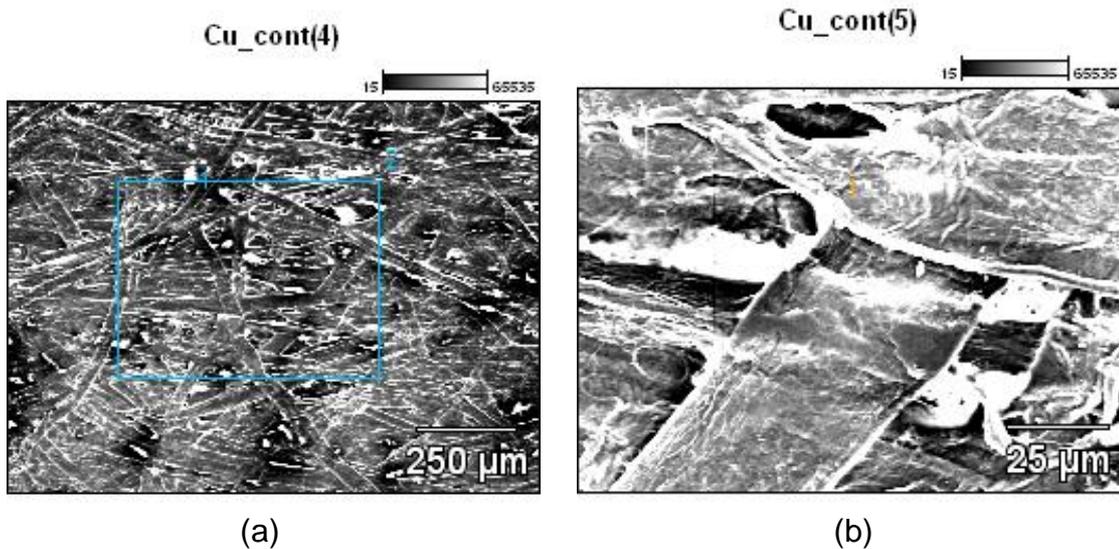
O espectro de EDS da Figura 48 apresenta similaridade com o do teste do papel imerso em PMI normal, havendo concentração de carbono ligeiramente superior a 90%, e traços de cobre, zircônio e oxigênio. Estudos mostram espectros de EDS da celulose similares [23].

Figura 48 – Espectro de EDS da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com o cobre (camada 14) imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol envelhecido em estufa por 72 h a 140°C



As micrografias de MEV da superfície do papel Kraft imerso em óleo passivado após 72 h em estufa à 140°C são mostradas na Figura 49, onde notam-se as fibras da celulose com aspecto mais parecido às do teste do papel junto ao cobre em óleo normal, como é esperado devido a ação de bloqueio do passivador tolutriazol no inibidor de oxidação DBDS. Estes resultados são corroborados por estudos com papel Kraft [23,56,66].

Figura 49 – Micrografias da superfície da camada de papel Kraft isolante em contato com o cobre (camada 14) imerso em OMI inibido com DBDS e passivado com toluotriazol, após envelhecimento em estufa por 72 h a 140°C: 100X (a) 1000X (b)



A literatura técnica sobre o tema apresenta uma grande variedade de espectros de EDS e imagens de MEV, que mostram a contaminação por enxofre corrosivo, ou não, dependendo das condições de cada teste [56,66].

### 5.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS

#### 5.3.1 Corrosividade do OMI normal, OMI com o inibidor de oxidação (DBDS), OMI com inibidor de oxidação (DBDS) e passivado com toluotriazol (Irgamet 39)

As amostras de óleo apresentaram coloração amarelada para o óleo normal e escurecida para os óleos, inibido com DBDS e inibido com DBDS e passivado com o Irgamet 39 da CIBA, como pode ser visto na Figura 50. A cor é atípica e pode ser creditada as condições em que o teste foi realizado, com o enchimento dos frascos em contato com o ar ambiente, havendo então, durante o tempo de estufa, a reação do óleo e seus aditivos com o O<sub>2</sub> presente na amostra. Existem casos de OMI não corrosivo, que após adição de mais de 400 mg/L de DBDS, e 100 mg/L de Irgamet 39, apresentam cor clara após teste de aquecimento com duração de 96 hs na temperatura de 150 °C, porém em frascos selados [58].

Figura 50 – Amostras de óleos, tiras de cobre nu e isolado após envelhecimento por 72 h em estufa a 140°C



### 5.3.1.1 Corrosividade do OMI normal

Na Figura 51 são mostradas tiras de cobre que foram imersas em óleo normal, após o teste de aquecimento em estufa por 72 h à 140°C. O cobre não apresentava sinais de corrosão, isto porque não havia qualquer composto no mesmo que pudesse reagir com o metal para desencadear um processo corrosivo. A superfície do cobre estava limpa, com classificação 1b (não-corrosivo) pela tabela de cores da ASTM1245 [65]. O resultado é o mesmo encontrado em vários estudos pertinentes ao assunto [50,59,61,80].

Figura 51 – Amostras de cobre isolado (1) e nu (2) imersas em óleo normal após teste de aquecimento, dentro do frasco (a) e fora do frasco (b)



### 5.3.1.2 Corrosividade do OMI inibido com DBDS

As tiras de cobre que ficaram imersas em óleo inibido com DBDS apresentavam contaminação característica de sulfeto de cobre na sua superfície, como pode ser visto na Figura 52. O cobre estava impregnado com manchas marcantes deste tipo de reação, amplamente verificadas em vários estudos de enxofre corrosivo [41,56,59,61,80]. A classificação, pela tabela de cores da ASTM1275 [65], foi 4a (corrosivo).

Figura 52 – Amostras de cobre isolado (1) e nu (2) retirados de frascos com óleo inibido com DBDS após teste de aquecimento

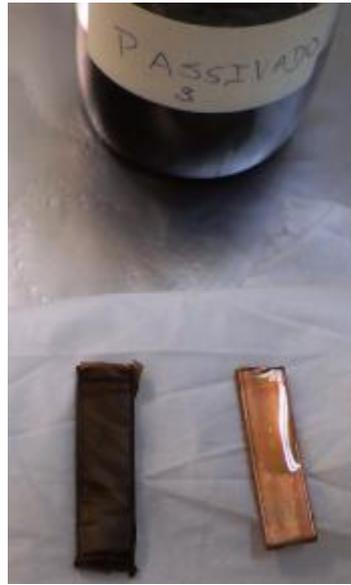


### 5.3.1.3 Corrosividade do OMI inibido com DBDS e passivado com Irgamet 39

Na Figura 53 são mostradas as imagens das tiras de cobre que foram imersas em óleo passivado com tolutriazol, evidenciando a ação do passivador como bloqueador do processo de reação corrosiva do DBDS com o cobre. A formação da película protetora do passivador, entre o óleo inibido com DBDS e a superfície do condutor de cobre, mostra sua eficácia pela observação das condições da tira de cobre, que apresentava-se limpa, retornando à classificação 1b (não-corrosivo) pela tabela de cores da ASTM 1275 [65]. Os resultados obtidos encontram respaldo na literatura técnica, com vários estudos referentes ao tema [56,58,59,61,80].

A coloração escurecida do óleo, devido a reação dos compostos da amostra com o oxigênio do meio ambiente, não influenciou em nada no cobre, que não reagiu com o DBDS devido a formação da película protetora do passivador.

Figura 53 – Amostras de cobre isolado (1) e nu (2) retirados de frascos com OMI inibido co DBDS e passivado com Irgamet 39 após teste de aquecimento



### 5.3.2 Papel Kraft isolante da amostra imersa em OMI inibido com DBDS

As 14 camadas de papel Kraft que envolviam o condutor de cobre imerso em óleo inibido com DBDS foram abertas. O papel estava limpo em todas as camadas como mostra a Figura 55. A literatura sobre o tema apresenta uma grande variedade de amostras de cobre e papel Kraft impregnados pela contaminação com enxofre corrosivo, dependendo das condições de cada teste [58,81].

Figura 54 – Papel Kraft isolante aberto, retirado da amostra de OMI inibido com DBDS, após teste de aquecimento. 14 camadas (a) e 14ª camada (b)



### 5.3.5 Cromatografia gasosa de OMI normal sem aquecimento, OMI normal aquecido, OMI inibido com DBDS aquecido, OMI inibido com DBDS e passivado com tolutriazol aquecido

As Tabelas 6, 7, 8 e 9 apresentam o perfil de gases dissolvidos no óleo isolante em cada teste.

No óleo normal e sem aquecimento, a ausência de hidrocarbonetos leves dissolvidos condiz com o perfil de gases de um óleo novo, como pode ser visto na Tabela 6. O acréscimo das concentrações de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, em relação a óleos novos, deve-se ao fato do teste ter sido feito em condições ambientes. As análises de CG são normalmente realizadas, com a coleta do OMI em seringas, diretamente dos registros dos equipamentos instalados nas subestações com procedimentos específicos, retirando qualquer bolha que possa ter entrado na amostra durante a coleta. A NBR 7037 [82] descreve o procedimento.

Tabela 6 – Cromatografia do óleo normal sem aquecimento

<b>Gases</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>
H <sub>2</sub>	ND
O <sub>2</sub>	34797
N <sub>2</sub>	75239
CH <sub>4</sub>	1
CO	22
CO <sub>2</sub>	577
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ND
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ND
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ND
Total gases combustíveis	23
Total de gases	110636

A Tabela 7, como esperado, considerando o curto tempo que o óleo ficou submetido ao aquecimento, o perfil de gases do óleo normal aquecido não apresentou mudança em relação ao sem aquecimento (Tabela 9). Segue o padrão

de várias análises cromatográficas, realizadas por diversos laboratórios, em grande número de estudos [33,35,83].

Tabela 7 – Cromatografia do óleo normal aquecido 72 h em estufa a 140°C

<b>Gases</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>
H <sub>2</sub>	ND
O <sub>2</sub>	35747
N <sub>2</sub>	74051
CH <sub>4</sub>	2
CO	22
CO <sub>2</sub>	568
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ND
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ND
Total gases combustíveis	25
Total de gases	110391

Já na tabela 8, pode ser visto que o perfil de gases dissolvidos no óleo inibido com DBDS mudou de forma significativa, apresentando aumento de CH<sub>4</sub>, CO e CO<sub>2</sub>, com aparecimento de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e especialmente C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Excetuando-se o CO<sub>2</sub>, todos os outros gases são combustíveis.

Considerando o espectro que compõe a cromatografia gasosa, a IEEE C57.104 [30], atribui o aparecimento de gases de maior peso molecular, como o C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, à faltas térmicas que iniciam a decomposição do óleo em concentrações exponencialmente crescentes, quanto maior for a temperatura a qual o equipamento fica submetido.

A decomposição térmica da celulose, que acontece em temperaturas inferiores à decomposição térmica do óleo, produz CO e CO<sub>2</sub>, provenientes do papel e outros componentes da isolação sólida. Esta degradação pode ser medida pela relação CO<sub>2</sub>/CO, que normalmente tem valor superior a 7. A medida que a concentração de CO aumenta, diminuindo em conseqüência o quociente, temos um aumento da deterioração da isolação sólida, representada pelo papel. O resultado obtido de 9,42 na Tabela 8, apesar de ficar ainda acima de 7, foi bem inferior a 26,23 e 25,82 das Tabelas 6 e 7, apontando que o DBDS foi particularmente

agressivo à celulose. Com resultado diametralmente oposto, a amostra com passivador, da Tabela 6, mostrou o maior valor, 32,47, para o referido quociente.

Estes resultados não tem qualquer ligação com as cromatografias de amostras de OMI de transformadores em operação, já que o meio e as condições são diferentes daquelas que um transformador fica submetido. Qualquer consideração sobre uma avaliação do possível tipo de falha pela análise da geração dos gases combustíveis separados, que remete às razões  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$  e  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ , com composições feitas por Doernenburg e Rogers [71]; não tem pertinência, mesmo porque dois gases,  $\text{H}_2$  e  $\text{C}_2\text{H}_2$ , que aparecem em denominadores, não foram detectados [83].

Tabela 8 – Cromatografia do óleo com DBDS aquecido durante 72 h a 140°C

<b>Gases</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>
$\text{H}_2$	ND
$\text{O}_2$	34300
$\text{N}_2$	79402
$\text{CH}_4$	31
$\text{CO}$	93
$\text{CO}_2$	876
$\text{C}_2\text{H}_4$	6
$\text{C}_2\text{H}_6$	47
$\text{C}_2\text{H}_2$	ND
Total gases combustíveis	177
Total de gases	114755

Na Tabela 9, é visto que a CG do óleo passivado retorna às condições do óleo normal, como se o passivador não só protegesse o cobre, quando neutraliza a ação nociva do DBDS neste quesito, mas também eliminasse os hidrocarbonetos de falta térmica, originados na amostra com DBDS.

Em casos reais de campo pode ocorrer o oposto, com a passivação induzindo a formação de gases, como  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  [68].

Tabela 9 – Cromatografia do óleo passivado aquecido durante 72 h em estufa a 140°C

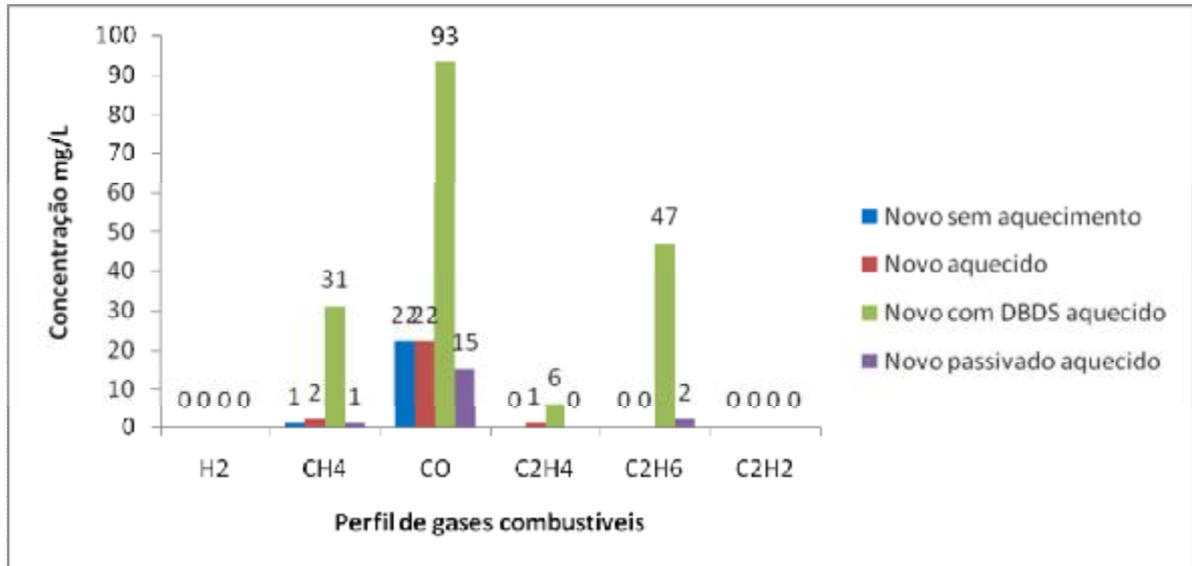
<b>Gases</b>	<b>Concentração (ppm)</b>
H <sub>2</sub>	ND
O <sub>2</sub>	30212
N <sub>2</sub>	62541
CH <sub>4</sub>	1
CO	15
CO <sub>2</sub>	487
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ND
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ND
Total gases combustíveis	25
Total de gases	93258

A Figura 55 mostra a variação das concentrações dos gases combustíveis para cada condição do óleo. A amostra com DBDS se destaca especialmente pelo aumento de hidrocarbonetos saturados CH<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, com incremento também de CO. A literatura, em geral, não faz ligação do aumento do perfil da concentração de gases na CG com a corrosividade, porém também não invalida qualquer resultado proveniente de testes que o faça.

Alguns estudos [78] sugerem que, no decorrer do tempo, a alteração no perfil de gases medidos na CG pode ser usada como indicador de corrosividade no óleo, com possível alteração na concentração de hidrocarbonetos saturados, como visto aqui, e sempre com alteração no H<sub>2</sub>, o que não foi verificado, provavelmente devido ao pouco tempo de aquecimento. A literatura menciona a possibilidade da passivação ser responsável pela formação de alguns gases como H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> [68]. A Figura 57 mostrou uma redução para valores ainda inferiores ao óleo sem aquecimento. Novamente devemos mencionar o tempo, e outras condições de realização dos testes, como possíveis responsáveis pelos resultados.

A experiência é válida, com consideração dos resultados encontrados, dentro das condições e variáveis em que o teste foi realizado.

Figura 55 – Perfil de gases dissolvidos no OMI



### 5.3.6 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

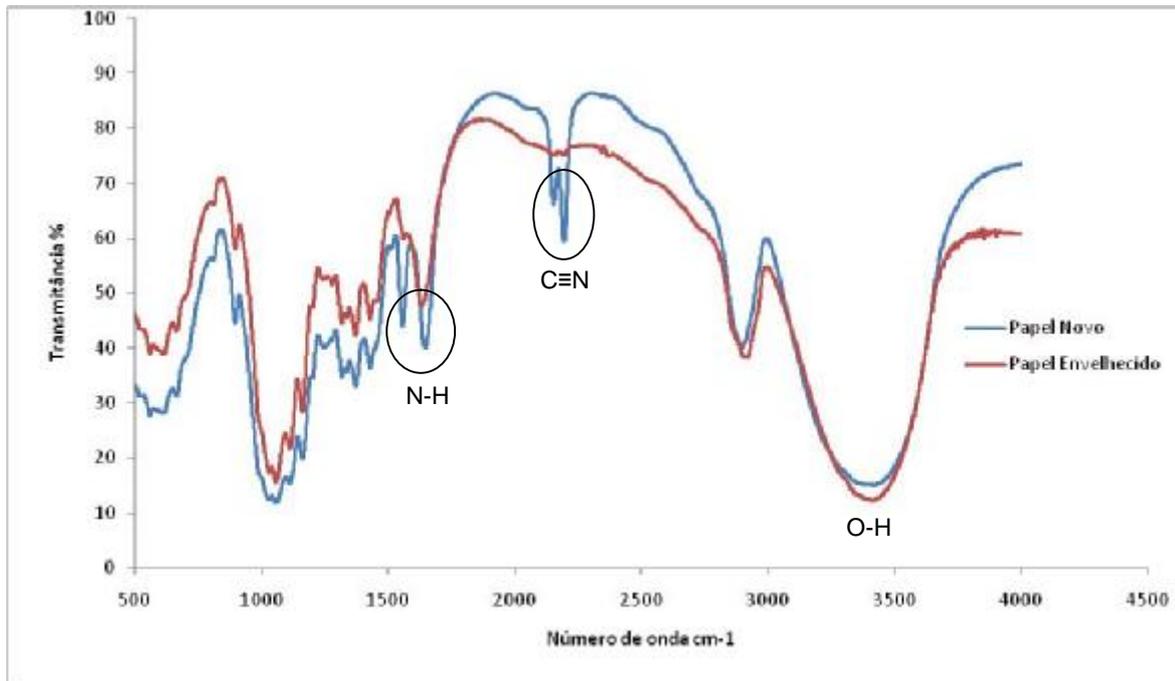
Na Figura 58 são apresentadas os espectros de FTIR comparativos das amostras de papel kraft antes (novo) e após envelhecimento (imerso em óleo com DBDS).

Ambos espectros de FTIR mostram a banda em 3200-3500  $\text{cm}^{-1}$  correspondente ao grupo hidroxila, característicos da celulosa, componente principal do papel. Detectou-se grupos nitrilas, que indicam ser o papel Kraft termoestabilizado onde as hidroxilas menos estáveis reagiram com a nitrila acrílica, ou foram adicionados estabilizadores na polpação do papel Kraft, o que aumenta a sua estabilidade térmica [23,44].

O espectro de FTIR da figura 56 mostra bandas de grupos funcionais amins e amidas primárias e secundárias, N-H, de dobramento, na faixa de número de onda entre 1550 e 1640  $\text{cm}^{-1}$ , e nitrilas  $\text{C}\equiv\text{N}$  entre 2240 e 2260  $\text{cm}^{-1}$  [84].

Na amostra envelhecida já não é verificado os picos do composto  $\text{C}\equiv\text{N}$  e desaparecimento de um dos picos na região do N-H, pois os estabilizadores devem ter sido consumidos durante o envelhecimento, conforme observado em estudos do mesmo tema [85].

Figura 56 – FTIR do papel novo e envelhecido por uma semana em estufa a 140°C



## 5.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS

### 5.4.1 TGA

A Figura 57 mostra as curvas termogravimétricas comparativas das amostras de papel Kraft antes e após envelhecimento. De uma forma geral observa-se que ambas as amostras apresentaram uma perda de massa de água de ~2% até 150°C correspondente a umidade contida o papel. Este valor é esperado, o que confirma resultados de outros estudos [23].

Comparando ambas as curvas térmicas, observa-se que a amostra envelhecida apresenta dois estágios de decomposição, um em torno de 180°C que poderia estar relacionada a decomposição do óleo (5,8%) e a outra em 300°C, correspondente ao início da decomposição da celulosa. Já no caso da amostra do papel novo, observa-se somente um estágio de decomposição correspondente ao início da decomposição da celulosa em torno de 320°C. Este decréscimo da temperatura de início de decomposição da celulosa no papel envelhecido, pode ser um indicativo do início da degradação do papel, devido ao meio submetido (óleo e calor), que poderia ter removido a proteção do aditivos termoestabilizantes ou

revestimento no papel Kraft [85], fato que é corroborado pelo resultado de FTIR mostrado na Figura 56. Estudos relatados avaliaram também a estabilidade térmica do papel, com resultados similares [23]. Os resíduos (cinzas) das amostras de papel avaliadas situaram-se em 12,20% para o papel novo e 13,95% para o papel envelhecido, sendo esse aumento do valor nesse último resultado devido provavelmente a presença de cobre proveniente do óleo envelhecido, como discutido anteriormente.

Figura 57 – Curva da análise termogravimétrica

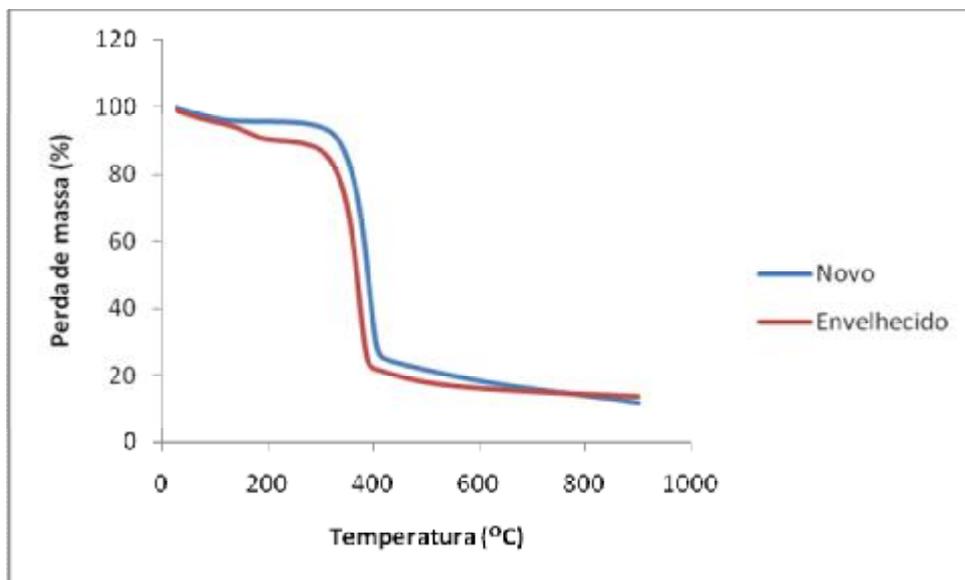
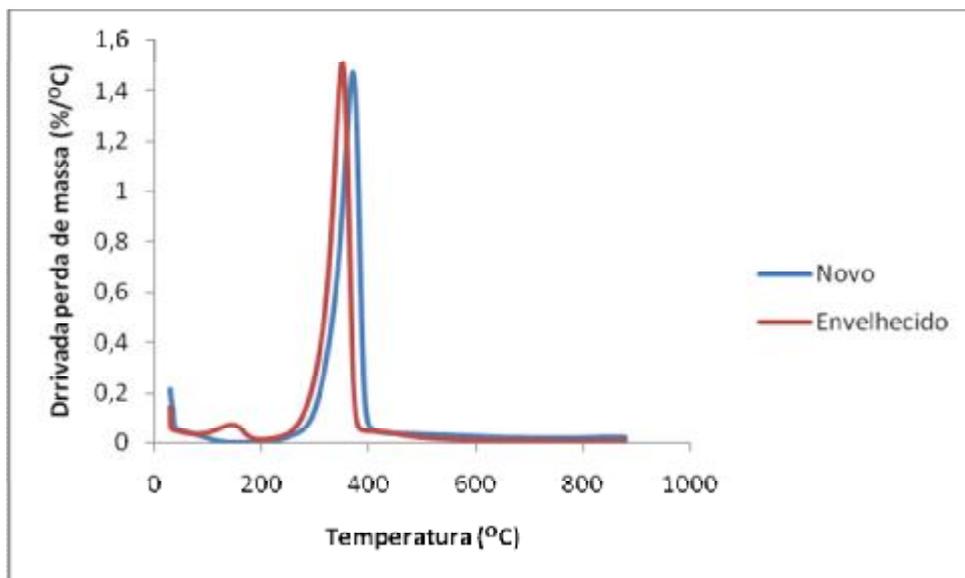


Figura 58 – Primeira derivada da curva do TGA



A Figura 58 mostra as curvas térmicas da derivada comparativas das amostras de papel Kraft antes e após envelhecimento, onde observa-se que a amostra envelhecida apresenta dois picos, um em 128°C correspondente a temperatura onde a cinética de decomposição do óleo é máxima e em 348°C correspondente a celulose. Já no caso do papel novo, é observado um único pico, em 367°C correspondente a celulose. Estes resultados confirmam uma vez mais que o papel kraft após envelhecimento em óleo perdeu estabilidade térmica com decréscimo de quase 20°C. Estudos correlatos confirma estes resultados [23,85]. A degradação da celulose segue padrões verificados em estudos de degradação de várias espécies de madeira [86].

Na tabela 10 podemos observar que o papel envelhecido obteve 10% da perda inicial de massa em temperatura inferior (231°C) ao do papel novo (312°C), um decréscimo de 80°C, resultado que indica a possível degradação do papel Kraft, e que é confirmado também pelo decréscimo da temperatura dos picos da DTG (20°C) correspondente a celulose. Os resíduos são próximos, com valor um pouco maior no envelhecido, com provável crédito a contribuição do óleo e do cobre. Estudos termicos do papel Kraft corroboram com os resultados encontrados [23,85].

Tabela 10 – Resultados da análise de TGA das amostras de papel Kraft novo e envelhecido, imerso em óleo, como isolante de tira de cobre, aquecido em estufa a temperatura 140°C por 168 h

Amostra papel Kraft	TGA			DTG		
	Ti <sub>10%</sub> (°C)*	Perda massa (%) Estágio I	Perda massa (%) Estágio II	Resíduo (%)	T <sub>p1</sub> (°C)	T <sub>p2</sub> (°C)
Novo	311,9	84,60	-	12,20	367,2	
Envelhecido	231,4	5,84	76,17	13,95	128,1	348,0

\*Ti<sub>10%</sub> (°C), temperatura de decomposição em 10% de perda de massa.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas variáveis que envolvem o funcionamento de transformadores e reatores de potência e sua degradação no decorrer do tempo.

O inibidor de oxidação DBDS, que contem enxofre confirmou seu alto poder de reação com o cobre, formando sulfeto de cobre I, composto que abrevia a vida útil do equipamento sem prévio aviso.

O passivador empregado mostrou grande eficácia na formação de um filme protetor na superfície do cobre.

As propriedades físicas caracterizaram o papel Kraft e o OMI dentro de parâmetros conhecidos

O FTIR mostrou tratar-se de papel Kraft termoestabilizado devido presença de compostos nitrílicos

A CG apresentou variação no perfil de gases dissolvidos no óleo na amostra aquecida com DBDS que pode ensejar controle da corrosividade através desta ferramenta preditiva.

O TGA mostrou decomposição do papel envelhecido em temperaturas inferiores ao do papel novo.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Analisar a queda da concentração do passivador em função da temperatura.

Explorar a abrangência da CG em diagnósticos e previsões de falhas.

Estudar as condições dielétricas do papel Kraft.

Estudar fenômenos nas interfaces papel-óleo-condutor

Analisar processos eletroquímicos que possam contribuir para o desenvolvimento de propriedades dielétricas/condutivas dos materiais estudados.

## REFERÊNCIAS

- [1] SCOTT, R. E. Linear Circuits. Addison-Wesley Publishing Company, USA ,1960.
- [2] STEVENSON, W. D. Jr. Elementos de Análise de Sistemas de Potência, Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA, Porto Alegre, 1978.
- [3] ELGERD, O. I. Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica, Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA, Porto Alegre, 1978.
- [4] MILASH, M. Manutenção de transformadores em líquido isolante. Edgard Blücher Ltda.. 1984.
- [5] KARSAI, K; KERENYI, D.; KISS, L. Large power transformer. Elsevier, 1987.
- [6] PORTELA, M. D. G., et al. Avaliação de subprodutos químicos de papel tipo Kraft em óleo mineral isolante de transformadores energizados. Lactec – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. CTEEP \_ Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.
- [7] GORGAN, B.; NOTINGER P. V.; WETZER, J. M.; VERHAART, H. F. A.; WOUTERS, P. A. A. F.; SCHIJNDEL, A, V.; TANASESCU, G. Calculation of the Remaining Lifetime of Power Transformers Paper Insulation. University Politechnica of Bucharest, Bucharest, Romania; KEMA Netherland B.V., Arnhem, the Netherlands; Electrical Energy Systems, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands; Liander N.V., Duiven, the Netherlands; Simtech International Ltd, Bucharest, Romania. IEEE, 2012
- [8] KOSOV, I. L. Máquinas Elétricas e Transformadores, Porto Alegre, Editora Globo, 1977.
- [9] FITZGERALD, A. E.; Kingsley C. Jr.; Kusko A. Máquinas Elétricas, Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA, Porto Alegre, 1979.
- [10] OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. Transformadores Teoria e Ensaio. Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 2008.
- [11] JORDÃO, R. G. Transformadores. Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 2008.
- [12] D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; AMON FILHO, J.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; KASTRUP FILHO, O.; MORAIS, S. A. Equipamentos Elétricos – Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão. FURNAS Centrais Elétricas S. A. Rio de Janeiro, 1985.
- [13] MAMEDE, J. F. Manual de Equipamentos Elétricos. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, 2011.
- [14] SUÑÉ, J. et. al – Grupo de Trabalho A2-05 – Guia de Manutenção para Transformadores de Potência – CIGRÉ Brasil, 2013

- [15] Siemens Energy Sector. Power Engineering Guide, Edition 7.0. Erlanger, Germany, 2009.
- [16] Large Power Transformers and the U.S. Electric Grid. Infrastructure Security and Energy Restoration Office of Electricity Delivery and Energy Reliability U.S. Department of Energy. June - 2012.
- [17] Transforming pure Power into stable supply. Powers transformers above 200 MVA. Answer for Energy. Siemens AG – Energy Sector, Erlangen, Germany, 2009.
- [18] Boylestad, R. L. Introdução à análise de circuitos. São Paulo, Editora Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2012.
- [19] SCHMIDT, W. Materiais Elétricos – volume 1 - Condutores e Semicondutores. Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo 2010.
- [20] VAN VLACK, L. H. Princípios de Ciência dos Materiais – Departamento de Engenharia Química e Metalúrgica – Universidade de Michigan. Editora Blücher, São Paulo, 2011.
- [21] CALLISTER, W. D. Jr., Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. 7ª Edição – Rio de Janeiro – LTC, 2011
- [22] SCHMIDT, W. Materiais Elétricos – volume 2 -Isolantes e Magnéticos. Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 2010.
- [23] PORTELA, M.D.G. Dissertação de Mestrado. Avaliação da Presença de Indicadores de Oxidação do Papel Isolante Termoestabilizado em Equipamentos de Subestações, 2010.
- [24] BEZERRA, C.M.S. Estimativa de Custo para o Tratamento de Óleo mineral isolante em Transformadores de Energia: Estudo de Caso da COPEL, 2009.
- [25] LUKIC, J. Oxidation Phenomena and Role of Oil Inhibitors. Institute Nikola Tesla, Belgrade, Serbia. Mytransfo Brasil, 2009.
- [26] GUIMARÃES, M. C. Guimarães; CAVACANTE, C. L. Jr; ARAÚJO, M. A. S. 1º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - UFRN – SBQ Regional RN. Natal, 25 a 28 de novembro de 2001.
- [27] PAIXÃO, A. Avaliação da Qualidade do Óleo Isolante em Transformadores com o Emprego da Função Discriminante Quadrática. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2006.
- [28] MAINA, R. Diagnostic on Insulating Liquids During the Operational Life of Electrical Equipment. Seminário Mytransfo do Brasil. Rio de Janeiro, março – 2007
- [29] NUNES, J.; PAHLAVANPOUR B. Os Recentes Desenvolvimentos na Análise de Gases Dissolvidos. Comité de Estudio D1 – Materiales y Técnicas de Ensayos

Emergentes para Sistemas de Potencia. XIII ERIAC – Décimo Tercer Encuentro Regional Ibero Americano de CIGRÉ. Puerto Iguazú, Argentina, 2009.

[30] IEEE C57.104 – Guia para Interpretação de Gases Gerados em Transformadores Imersos em Óleo, 2009.

[31] IEC 60599 – Norma Internacional - Equipamentos Elétricos em Serviço Impregnados em óleo Isolante - Guia para Interpretação de Gases Dissolvidos e livres, 1999.

[32] ABNT NBR 7070 – Amostragem de gases e óleo mineral isolante de equipamentos elétricos e análise dos gases livres e dissolvidos, 2006.

[33] LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Centro Politécnico da UFPR. Curitiba, Brasil, 2008.

[34] DIOGO, A.C.T. Avaliação da Vida Útil de Transformadores de Potência Através da Cromatografia Líquida de Alto Desempenho, CESP – Companhia Energética de São Paulo. Grupo XIII – Equipamentos Elétricos e Materiais de Subestações – GEM. XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belém, Brasil, 1997.

[35] GALDEANO, C.A.; SILVA JR, M. M.; MACHADO, A. T. S. Fluilab, AES Eletropaulo. Estudo para Determinação de Pontos de Amostra em de Papéis Isolantes e Avaliação de Correlações entre Derivados de Furanos para Manutenção Preditiva de Transformadores de Potência do Sistema de Subtransmissão da Eletropaulo.

[36] MARTINS, M. A. G. Monitorização da Degradação Térmica do Papel Usado em Transformadores. \*\*Thermally Upgraded\*\* Versus Papel Kraft. Labelec – Grupo EDP, 2007.

[37] BAUER, F. P.; VEIGA, T. N. A.; PETRY C. A. Experiência 04 – Rigidez Dielétrica de Óleo Mineral. Laboratório de Materiais Elétricos. Departamento de Engenharia Elétrica. UFSC, 2006

[38] GUSTAVSSON, C. On the interrelation between Kraft cooking conditions and pulp composition. KTH – Chemical Science and Engineering – Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology, Department of Fibre and Polymer Technology, Division of Wood Chemistry and Pulp Technology, Stockholm, 2006.

[39] Ibá – Indústria Brasileira de Árvores, Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. [www.bracelpa.org.br](http://www.bracelpa.org.br), [www.abtcp.com.br](http://www.abtcp.com.br). Obtenção da pasta celulósica e papel. Acesso em 07/02/2015.

[40] SILVA, D. C. Avaliação da Interação de Materiais Internos do Transformador com Fluidos Isolantes Tipo Éster Natural e Óleo Mineral. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

- [41] MIYAGI K.; OE, E.; YAMAGATA, N. Evaluation of Aging for Thermally Upgraded Paper in Mineral Oil. Muroran Institute of Technology, Hitachi Ibaraki technical School, Wasedauniversity, Japan. Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 1, No. 2, 2011.
- [42] QUADROS, A. M. Papel Nomex® Utilizado em Transformadores: Avaliação das Características e Degradação Térmica. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFSC, Florianópolis, 2006.
- [43] MIDEMBERGER, L. Dissertação de Mestrado. Avaliação do Desempenho de Indicadores de Degradação de Sistemas Isolantes Papel/Óleo Usados em Transformadores de Potência. Universidade Federal do Paraná, 2014.
- [44] PORTELLA, M. G.; SWINKA FILHO, V.; SIVA, G. C.; BATISTA, D. A.; RIBEIRO, C. S.; SABEC, D. C. – LACTEC; ANDREOLI M. C.; CAMPOS, E. A. – CTEEP. Estudo Comparativo do Envelhecimento Químico Acelerado do Papel kraft Termoestabilizado e Convencional. VI CITENEL, 2011.
- [45] LUNDGAARD, L.E.; HANSEN, W.; LINHJELL, D.; PAINTER, T. J. Ageing of Oil-impregnated Paper in Power Transformers, 2002.
- [46] OHLEN, M. Moisture im Power Transformers – How to estimate and what do do. Megger, Sweden, 2007.
- [47] TAMURA, L. F. Determinação de Parâmetros do Circuito Equivalente Térmico de Transformadores de Potência por Meio de Técnicas de Otimização. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- [48] FAIER, J. M. Curvas Principais Aplicadas na Identificação de Descargas Parciais em Equipamentos de Potência. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [49] JUNIOR, J. T. Medição de descargas Parciais. Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR.
- [50] IEC 60270 – High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, 2000.
- [51] ABNT NBR 6940 – Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Medição de descargas parciais, 2015.
- [52] SVINKA FILHO, V. Imagens de Defeitos por Descarga Parcial Estimulada por Raio X Pulsado em Materiais Dielétricos Poliméricos. Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, Brasil, 2000
- [53] Especificação Técnica - Transformadores de Potência. TFÇ - \*/99-001 (Rev. 09/04), DPEP/DVEN. Centrais Elétricas de Santa Catarina
- [54] GALERA, R. E. Teoria básica do fator de potência da isolação. VIII Conferência DOBLE (Doble Engineering Company) no Brasil, 2009.

- [55] PRADHAN, M. K.; RAMU, T. S. On the Estimation of Elapsed Life of Oil-Immersed Power Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, n<sup>o</sup>. 3, July, 2005.
- [56] SCATIGGIO F.; MARCHIORI, C.; BOTELHO, P. Terna SPA. Power Transformers Oils Containing Corrosive Sulfur. The Terna Experience. Mytransfo do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [57] SCHUBERT, D. S. Power Industry Loss Experience - The Insurance Perspective of Reliability and Availability Best Practices, Marsh Company. Mytransfo do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [58] 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 and Corrosion Free Program and IFED (Integrated Fingerprint & Elemental Diagnostics) Applications, Sea Marconi, Mytransfo do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [59] SCATIGGIO, F. Oil with Presence of Corrosive Sulphur: Mitigation and Collateral Effects. MyTransfo do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [60] GRIFFIN, P. J.; LEWAND, L. R. Methods for Detecting Potential problems with Corrosive Sulfur in Electric Apparatus. Doble Engineering Company. MyTransfo, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [61] Copper Sulphide in Transformer Insulation – Final Report – Brochure 378 – Working Group A2-32 – CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Electriques - International Council on Large Electric Systems, 2009.
- [62] Copper Sulphide Long Term Mitigation and Risk Assessment – Interim Report – Working Group A2-40 – CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Electriques - International Council on Large Electric Systems, 2014.
- [63] IEC 60296 – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgears, 2012.
- [64] IEC 60422 – Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance, 2013.
- [65] ASTM D1275 - Standard Test Method for Corrosive Sulfur in Electrical Insulating Oils, 2015.
- [66] ANDERSON, K.; SEEMAMAHANNOP, R.; FLANIGAN, V.; KAPILA, S.; TUMIATTI, V.; ROGGERO, C.; TUMIATTI, M. Quantitative Assessment of Corrosive Sulfur in Mineral Insulating Oils. Center for Environmental Science and Technology. University of Missouri – Rolla, USA, Sea Marconi Technologies, Turin, Italy. MyTransfo do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [67] NEVES, A.; GUERRA E.; SILVA, L. A. F.; ALVES FLHO, F. Eficiência da Passivação do Óleo Mineral isolante Contendo Compostos de Enxofre na Forma

Corrosiva. CEPEL – Centro de pesquisas de Energia Elétrica. Grupo XIII – Grupo de estudo de Transformadores, reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes – GTM. XX SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009.

[68] LOMBARD, A. E. The Relationship between Irgamet 39 Passivator Concentration and Dissolved Gas Concentrations in Sealed Units. Eskom Enterprises. Report Passivator Study, 2009.

[69] ASTM D4052 - Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter, 2011.

[70] KLOCK, U.; ANDRADE A. S.; BITTENCOURT, E; MOCELIN, E. Z.; CREPALDI, C. Propriedades do papel Kraft a partir da madeira juvenil de Pinus maximinoi H.E. Moore e Pinus taeda L. Revista Floresta 34 (1), Jan/Abr 2004, 33-44, Curitiba –Pr, 2004.

[71] Typical density and bulk of some papers. [www.paperonweb.com/density](http://www.paperonweb.com/density). Acesso em 11/02/2015.

[72] ABNT NBR7148. Petróleo e derivados de petróleo — Determinação da massa específica, densidade relativa e °API — Método do densímetro, 2013.

[73] Informações técnicas. OMI Lubrax AV 60 IN, Petrobrás, 2011.

[74] Informações técnicas. OMI Lubrax AV 64 IN, Petrobrás, 2011.

[75] Grupo Piemonte. [www.grupopiemonte.com.br/site/produto](http://www.grupopiemonte.com.br/site/produto). Acesso em 23/02/2015.

[76] MIRANDA, M. M.; MIRANDA, F. M.; CAPORALI, S. SERS and DFT study of copper surfaces coated with corrosion inhibitor. Department of Chemistry “Ugo Schiff”, University of Florence, Italy, Department of Chemistry and Geology, University of Modena and Reggio Emilia, Modena, Italy. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2014.

[77] KAPILA, S. et al. Determination of Dibenzyl Disulfide and Total Corrosive Sulfur in Mineral Insulating Oils. Center for Environmental Science and Technology – University of Missouri, USA. Sea Marconi Technologies, Turin, Italy. Mytransfo – Brasil – 2009.

[78] FARDIM, P. E. Composição Química da Superfície da Polpa Kraft de Eucalyptus. Caracterização e influências nas propriedades físicas e físico-químicas das fibras. Tese de doutorado. Instituto de Química, departamento de Físico-química, laboratório de Química Biológica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil, 1999.

[79] LAROTONDA, F. D. S.; MATSUI, K. N.; SOBRAL, P. J. A.; LAURINDO, J. B. Hygroscopicity and water vapor permeability of Kraft paper impregnated with starch acetate. Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, CTC,

UFSC, Florianópolis, SC, Brazil, Departamento de Engenharia de Alimentos, FZEA-USP, Pirassununga, SP, Brazil. Elsevier, 2004.

[80] POMPILI, M. IEC Standards in the Field of the Insulating Fluids – State of Art. IEC TC 10 Secretary – Department of Electrical Engineering. University of Roma – La Sapienza. MyTansfo do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

[81] TARSO, P. Risks from the Presence of Corrosive Sulfur. Case Report. Eletronuclear. Mytransfo do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

[82] ABNT NBR 7037 - Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de potência em óleo isolante mineral, 1994.

[83] SILVA, D. C. (coordenador). 7ª Circulação de Amostras de Óleo Mineral Isolante para Comparação Interlaboratorial de Resultados de Ensaio Físico-químicos e Cromatográficos. Grupo de Trabalho D1.01 – Líquidos Isolantes D1.01- 002, Relatório Técnico D1.01- 002, CIGRÉ Brasil, 2010.

[84] PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. Introdução à Espectroscopia. Tradução da 4ª edição norte-americana. São Paulo, 2012.

[85] SILVA, D. C. Avaliação da Interação de Materiais Internos do Transformador com Fluidos Isolantes Tipo Éster Natural e Óleo Mineral. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

[86] POLETTTO, M. Avaliação da estabilidade térmica e da cinética de degradação da madeira através da caracterização de seus componentes. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGEM, UFRGS, 2014.