

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIELI CAROLINA DA SILVA

AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO DE MATERIAIS INTERNOS DO TRANSFORMADOR
COM FLUIDOS ISOLANTES TIPO ÉSTER NATURAL E ÓLEO MINERAL

CURITIBA

2013

DIELI CAROLINA DA SILVA

AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO DE MATERIAIS INTERNOS DO TRANSFORMADOR
COM FLUIDOS ISOLANTES TIPO ÉSTER NATURAL E ÓLEO MINERAL

Dissertação apresentada ao Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), Área de Concentração em Engenharia e Ciências de Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof^a. Dra. Helena M. Wilhelm

CURITIBA

2013

S586a Silva, Dieli Carolina da
Avaliação da interação de materiais internos do transformador com
fluidos isolantes tipo éster natural e óleo mineral / Dieli Carolina da Silva. –
Curitiba, 2013.
85f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia (PIPE), 2013.

Orientadora: Helena M. Wilhelm.
Bibliografia: p. 79-85.

1. Esteres. 2. Transformadores elétricos. I. Universidade Federal do
Paraná. II. Wilhelm, Helena M.. III. Título.

CDD: 661.83



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos trinta e um dias do mês de julho de 2013, no auditório do CEHPAR - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr., coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima quadragésima terceira defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Helena Maria Wilhelm (UFPR), Marilda Munaro (UFPR), Nora Díaz Mora (UNIOESTE). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **DIELI CAROLINA DA SILVA** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO DE MATERIAIS INTERNOS DO TRANSFORMADOR COM FLUIDOS ISOLANTES TIPO ÉSTER NATURAL E ÓLEO MINERAL.**” Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela aprovação do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 31 de julho de 2013.

Prof.^a Dr.^a Helena Maria Wilhelm
Orientador

Prof.^a Dr.^a Marilda Munaro
Examinador

Prof.^a Dr.^a Nora Díaz Mora
Examinador

*A minha família, em especial aos meus pais pelo
apoio em todos os momentos da minha vida,
Ao meu noivo Eduardo pelo carinho e compreensão,*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, e pela luz em todos os momentos.

Aos meus pais Adelino e Cirlei pelo amor e incentivo, a minha avó Dalila por suas orações.

Ao meu noivo Eduardo pelo carinho, companhia e paciência.

À minha orientadora Dra. Helena Maria Wilhelm, pelas oportunidades e dedicação em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

A AES Eletropaulo e a MGM por dar-me a oportunidade de participar deste projeto.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE), pelas contribuições, durante o período do curso.

Ao laboratório DIAGNO pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao departamento de Química da UFPR pelas análises de FTIR.

A WEIDMANN por ceder gentilmente os corpos de prova de papel.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho o meu muito obrigado.

RESUMO

Os ésteres naturais, obtidos a partir de óleos vegetais extraídos de sementes, vêm sendo usados como alternativa aos óleos minerais em transformadores há mais de uma década. Os ésteres naturais isolantes (ENIs) entraram no mercado nacional justificado, principalmente, pela ausência de enxofre corrosivo na sua composição química, rápida biodegradabilidade, por se tratar de um produto natural, derivado de oleaginosas e por possuírem maior resistência ao incêndio, uma vez que seu ponto de combustão é superior a 300 °C. Por se tratar de um produto novo no mercado é necessário conhecer as interações do éster natural isolante (ENI) com os outros componentes internos do transformador, como isolações sólidas, vedações e tintas. Além disso, é necessário determinar valores limites para os parâmetros indicadores do estado de envelhecimento do sistema isolante para as práticas de manutenção preventiva e preditiva dos transformadores isolados com esse tipo de fluido. O principal objetivo deste trabalho consistiu na avaliação da compatibilidade do ENI, tipo Biovolt A, com materiais internos do transformador como papel (kraft neutro, termoestabilizado e nomex), elastômeros (flúor silicone 5365 e 5261, nitrílico, tealon, viton e viton OV7) e tintas (monocomponente e bicomponente). Também, avaliou-se a degradação do Biovolt A na presença e na ausência desses diferentes papéis isolantes e elastômeros a partir de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório, a 120 °C, por 60 dias. Para obter informações sobre a degradação das diferentes isolações sólidas envelhecidas no Biovolt A foi determinado o grau de polimerização (GP), a resistência à tração e realizadas análises por espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) nos papéis novos e envelhecidos. O efeito do ENI sobre as propriedades dos elastômeros foi avaliado neste estudo por ensaios de dureza, antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado. Os resultados obtidos mostraram que alguns materiais podem afetar a qualidade do ENI e, portanto, não são recomendados em equipamentos isolados com esse fluido.

Palavras-chave: Ester natural isolante, transformador, compatibilidade, envelhecimento acelerado, óleo vegetal isolante.

ABSTRACT

The natural esters, derived from vegetable oils extracted from seeds have been used as an alternative to mineral oils in transformers for more than a decade. Esters natural insulating Professionals (IPs) entered the domestic market justified mainly by the absence of corrosive sulfur in their chemical composition, rapid biodegradation, because it is a natural product derived from oil and by having greater resistance to fire, since its flash point is above 300 ° C. Because it is a new product in the market is necessary to know the interactions of natural ester insulating (ENI) with other internal components of the transformer, as solid insulations, seals and paints. Moreover, it is necessary to determine threshold values for the parameters indicators of the aging of the insulation system to the practices of preventive and predictive maintenance of transformers insulated with this type of fluid. The main objective of this study was to assess the compatibility of ENI, type Biovolt The internal transformer with materials such as paper (kraft neutral thermally upgrade and nomex), elastomers (fluorine silicone 5365 and 526, silicone, nitrile, tealon, viton and viton OV7) paints (monocomponent and bicomponent). We also evaluated the Biovolt The degradation in the presence and absence of these different roles and insulating elastomer from accelerated aging tests in a laboratory. For information on the degradation of different insulations solid aged in Biovolt A, was given the degree of polymerization (DP), the tensile strength and analyzes by infrared spectroscopy (FTIR). The effect of ENI on the properties of the elastomers was evaluated in this study by testing the hardness before and after aging tests. Os results showed that some materials can affect the quality of ENI and therefore are not recommended in equipment insulated this fluid.

Keywords: Ester natural insulator, transformer, compatibility, accelerated aging, vegetable insulating oil.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS	14
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
CAPÍTULO 1	16
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
1.2 TRABALHOS RESULTANTES DA PESQUISA ELABORADA	18
CAPÍTULO 2	19
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1.1 Transformadores elétricos	19
2.1.1.2 FLUIDOS ISOLANTES PARA TRANSFORMADORES	21
2.1.1.3 Óleo mineral isolante (OMI)	21
2.1.1.4 Éster natural isolante (ENI)	23
2.2 ISOLAMENTO SÓLIDO	26
2.2.1 Papel kraft	27
2.2.2 Papel termoestabilizado	28
2.2.3 Papel nomex[®]	29
2.2.4 ENVELHECIMENTO DOS MATERIAIS CELULÓSICOS	30
2.3 COMPATIBILIDADE DO ENI E OMI COM MATERIAIS INTERNOS DO TRANSFORMADOR	32
2.4 INTERAÇÃO DO SISTEMA PAPEL ISOLANTE/ LIQUIDO ISOLANTE	34
CAPÍTULO 3	36
3.0 MATERIAL E MÉTODOS	36

3.1	Fluidos isolantes e materiais utilizados	36
3.1.1	Caracterização dos fluidos isolantes novos	36
3.1.2	Caracterização dos materiais utilizados no ensaio de envelhecimento acelerado	37
3.1.3	Determinação do grau de polimerização (GP) do papel kraft neutro e kraft termoestabilizado	37
3.1.4	Espectroscopia na região de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	38
3.1.5	Ensaio de resistência a tração realizados nos papéis antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado	38
3.1.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	39
3.1.7	Ensaio de determinação total de nitrogênio no papel termoestabilizado	39
3.1.8	Ensaio de dureza shore A nos elastômeros antes e após ensaio de envelhecimento acelerado	39
3.1.9	Ensaio de compatibilidade dos diferentes materiais em estudo neste trabalho	40
3.2	Ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório	41
3.3	Determinação da cor dos fluidos isolantes	42
	CAPÍTULO 4	44
4.0	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Ensaio de caracterização dos fluidos isolantes novos	44
4.2	Ensaio de compatibilidade dos diferentes materiais em estudo	46
4.3	Ensaio de envelhecimento acelerado dos fluidos isolantes na ausência e presença de materiais	49
4.3.1	Ensaio de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes com papel kraft neutro, kraft termoestabilizado e nomex	49
4.4	Análise visual de cor dos óleos envelhecidos na presença e ausência dos papéis isolantes	55

4.5	Grau de polimerização (GP) para o papel kraft neutro e kraft termoestabilizado envelhecidos em ENI e OMI	57
4.5.1	Determinação do teor de nitrogênio total	59
4.5.2	Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	60
4.5.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	64
4.5.4	Ensaio mecânicos de resistência à tração dos papeis	68
4.6	Ensaio de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes com elastômeros nitrílico, viton, viton (OV7) e tealon	69
4.7	Análise visual de cor dos elastômeros	73
4.8	Dureza Shore A dos elastômeros antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado	75
4.9	Ensaio de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes com a tinta bicomponente	76
	CAPÍTULO 5	78
5.0	CONCLUSÕES	78
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema representativo do núcleo de um transformador	20
Figura 2. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos constituintes do OMI: (A) alcanos, (B) naftenos ou cicloalcanos e (C) aromáticos.....	22
Figura 3. Estrutura química do triacilglicerol que compõe o óleo vegetal	24
Figura 4 . Representação esquemática da estrutura da celulose.....	27
Figura 5. Esquema da reação química de cianoetilação da celulose para obtenção do papel termoestabilizado.....	29
Figura 6. Fórmula estrutural da unidade monomérica do nomex	30
Figura 7. Ilustração do ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório em estufa, programa para temperatura de 120 °C	42
Figura 8. Efeito do tempo de envelhecimento sobre as perdas dielétricas a 90 °C do ENI e OMI na presença dos papeis (A) kraft neutro, (B) kraft termoestabilizado e (C) nomex®	51
Figura 9. Efeito do tempo de envelhecimento sobre o índice de neutralização do ENI e OMI na presença dos papeis (A) kraft neutro, (B) kraft termoestabilizado e (C) nomex	53
Figura 10. Efeito do tempo de envelhecimento sobre a viscosidade cinemática a 40 °C do ENI e OMI na presença dos papeis (A) kraft neutro, (B) kraft termoestabilizado e (C) nomex.....	54
Figura 11. Efeito do tempo de envelhecimento dos papeis kraft neutro, kraft termoestabilizado e nomex sobre tensão interfacial do OMI.....	55
Figura 12. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120 °C, por 60 dias, realizado na ausência de papel (branco).....	56
Figura 13. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório, a 120 °C, realizado na presença de papel kraft neutro	56
Figura 14. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório, a 120°C, realizado na presença de papel kraft termoestabilizado	57

Figura 15. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório, a 120 °C, realizado na presença de papel nomex	57
Figura 16. GP para amostras de papel kraft neutro e termoestabilizado envelhecidas em ENI e OMI a 120 °C.....	59
Figura 17. Caracterização por FTIR das amostras de papel kraft neutro e kraft termoestabilizado novos.....	61
Figura 18. Caracterização por FTIR das amostras de papel kraft termoestabilizado novo e envelhecido em ENI e OMI a 120 °C	62
Figura 19. Caracterização por FTIR das amostras de papel kraft novo e envelhecido em ENI e OMI a 120 °C.....	63
Figura 20. Caracterização por FTIR das amostras de papel nomex novo e envelhecido em ENI e OMI a 120 °C.....	64
Figura 21. Micrografias por MEV dos papéis: (A) kraft neutro; (B) termoestabilizado; e (C) nomex.....	65
Figura 22. Micrografias por MEV dos papéis envelhecidos a 120 °C: (A) papel kraft envelhecido em ENI; (B) papel kraft envelhecido em OMI; (C) papel termoestabilizado envelhecido em ENI; (D) papel termoestabilizado envelhecido em OMI; (E) papel nomex envelhecido em ENI; (F) papel nomex envelhecido em OMI.	66
Figura 23. Micrografias por MEV dos papéis envelhecidos a 120 °C: (A) papel kraft envelhecido em ENI; (B) papel kraft envelhecido em OMI; (C) papel termoestabilizado envelhecido em ENI; (D) papel termoestabilizado envelhecido em OMI; (E) papel nomex envelhecido em ENI; (F) papel nomex envelhecido em OMI.	67
Figura 24. Efeito do tempo de envelhecimento sobre as perdas dielétricas a 90 °C do ENI e OMI na presença dos elastômeros (A) nitrílico, (B) viton, (C) viton (OV7) e (D) tealon.....	70
Figura 25. Efeito do tempo de envelhecimento sobre o índice de neutralização do ENI e OMI na presença dos elastômeros (A) nitrílico, (B) viton, (C) viton (OV7) e (D) tealon	72
Figura 26. Efeito do tempo de envelhecimento sobre a tensão interfacial do OMI na presença dos elastômeros nitrílico, viton, viton OV7 e tealon	73
Figura 27. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120 °C com o elastômero nitrílico	73

Figura 28. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120°C com o elastômero viton.....	74
Figura 29. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120 °C com o elastômero viton OV7....	74
Figura 30. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120°C com o elastômero tealon.....	75
Figura 31. Efeito do tempo de envelhecimento sobre as perdas dielétricas a 90 °C do ENI e OMI na presença da tinta bicomponente.....	76
Figura 32. Efeito do tempo de envelhecimento sobre o índice de neutralização do ENI e OMI na presença da tinta bicomponente.....	77
Figura 33. Efeito do tempo de envelhecimento sobre a tensão interfacial do OMI na presença da tinta bicomponente	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do ENI novo	26
Tabela 2. Caracterização físico-química do ENI novo	44
Tabela 3. Caracterização físico-química do OMI novo	45
Tabela 4. Efeito dos materiais testados sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C do ENI e classificação do material quanto a sua compatibilidade	47
Tabela 5. Efeito dos materiais testados sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C do OMI e classificação do material quanto a sua compatibilidade	48
Tabela 6. Efeito dos materiais testados sobre a tensão interfacial do OMI e classificação do material quanto a sua compatibilidade	49
Tabela 7. Resultados obtidos para o ensaio de nitrogênio total para o papel kraft termoestabilizado	60
Tabela 8. Resultados de resistência a tração para os papéis novos e envelhecidos	68
Tabela 9. Resultados de Dureza Shore A para os elastômeros novos	75
Tabela 10. Resultados de Dureza Shore A para os elastômeros envelhecidos	76

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ASTM – American Society for Testing and Materials

CF – Compostos Furânicos

cSt – Centi Stokes

ENI – Ester Natural Isolante

ENIs – Ésteres Naturais Isolantes

FTIR – Espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier

GP – Grau de polimerização

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

NBR – Norma Brasileira

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

OMI – Óleo Mineral Isolante

OMIs – Óleos Minerais Isolantes

OVI – Óleo vegetal isolante

PIPE – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia

2-FAL – 2-furfuraldeído

5-HMF – 5-hidroximetil 2-furfuraldeído

C – Carbono

g – Grama

KOH – Hidróxido de Potássio

mg – Miligrama

°C – Grau Celsius

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo desta dissertação é apresentada uma introdução e os objetivos do trabalho. No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre ésteres naturais isolantes (ENIs), óleo mineral isolante (OMI), sua utilização em transformadores e seus mecanismos de envelhecimento.

No terceiro capítulo estão apresentados os materiais e os métodos dos ensaios realizados. No quarto capítulo consta a discussão e os resultados obtidos neste estudo e no capítulo cinco está apresentada a conclusão do trabalho. E por último, têm-se as citações bibliográficas referentes ao desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Equipamentos elétricos que necessitam de um sistema de isolamento e de refrigeração utilizam, historicamente e com predominância, o OMI (óleo mineral isolante). A eficácia deste sistema é reconhecida tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Porém, do ponto de vista ambiental no caso de acidentes com vazamentos ou derramamentos dos óleos minerais isolantes (OMIs), podem ocorrer impactos ambientais significativos para a sociedade e consideráveis impactos econômicos para a concessionária.

Visando eliminar ou minimizar este impacto ambiental, novos fluidos isolantes vêm sendo desenvolvidos e utilizados em substituição ao óleo mineral, principalmente em locais desprovidos de sistemas de proteção (bacias de contenção). Os materiais que, sob este aspecto, estão apresentando maior incidência de utilização são os fluidos à base de ésteres vegetais. Estes fluidos possuem características biodegradáveis e renováveis sendo denominados de fluidos ecologicamente corretos (WILHELM, 2006). Os ésteres naturais isolantes (ENIs) apresentam vantagens técnicas e ambientais em relação ao OMI, por serem derivados de oleaginosas, fonte de energia renovável, sendo também considerados como fluidos de segurança, biodegradáveis e menos poluentes (WILHELM, 2009).

Entretanto, no Brasil, ainda não existem parâmetros de controle para os ENIs em uso para efeito de manutenção preventiva e preditiva. Vários estudos estão sendo realizados com o intuito de definir ferramentas e valores que possibilitem uma tomada de decisão adequada quanto às condições do éster natural isolante (ENI) ou óleo vegetal isolante (OVI) durante seu uso no transformador. O conhecimento destes parâmetros garantirá o controle operacional de transformadores preenchidos com este novo fluido.

Por se tratar de um produto novo no mercado é necessário conhecer a compatibilidade do ENI com os outros componentes internos do transformador, isolações sólidas, vedações e tintas. Além disso, é necessário determinar os valores limites dos parâmetros indicadores do estado de envelhecimento do sistema isolante, para as práticas de manutenção preventiva e preditiva dos transformadores

isolados com esse tipo de fluido. Assim sendo o presente trabalho teve por objetivo avaliar a compatibilidade do ENI tipo Biovolt A com materiais internos do transformador e, também, avaliar a interação destes materiais com este ENI e o OMI pelo ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório.

É importante ressaltar que os resultados obtidos neste estudo não preveem a imediata substituição de todos os transformadores isolados com OMI por ENI. O estudo consiste em definir a compatibilidade do ENI com os materiais internos dos transformadores isolados com OMI, para que, em caso de falha ou necessidade de regeneração do OMI, o ENI possa ser o substituto com o mínimo de alterações possíveis na composição e estrutura do transformador.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a interação de materiais internos do transformador após contato com fluidos isolantes tipo éster natural e óleo mineral.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a compatibilidade do ENI com diferentes sistemas de isolamento sólido, tintas e vedações.
- Avaliar o efeito dos papéis, da tinta bicomponente e de elastômeros sobre as propriedades físico-químicas do ENI em ensaios de envelhecimento acelerado, realizados em laboratório.
- Avaliar o efeito do ENI nas propriedades dos diferentes papéis isolantes pela realização de ensaios mecânicos, de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.2 TRABALHOS RESULTANTES DA PESQUISA ELABORADA

Os resultados dessa pesquisa foram divulgados e apresentados nos seguintes eventos e revistas:

- **20 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS**, 4 e 8 de Novembro de 2012, Joinville – SC. Título do trabalho: “**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE MATERIAIS INTERNOS DO TRANSFORMADOR SOBRE AS PROPRIEDADES DO ÉSTER NATURAL ISOLANTE BIOVOLT A**”.
- **XV ENCONTRO IBERO-AMERICANO DO CIGRÉ – ERIAC**, maio de 2013, Foz do Iguaçu. Título do trabalho: “**AVALIAÇÃO DO EFEITO MATERIAIS INTERNOS DO TRANSFORMADOR SOBRE AS PROPRIEDADES DO ÓLEO VEGETAL ISOLANTE BIOVOLT A**”.
- **XXII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**, 13 a 16 de outubro de 2013, Brasília. Título do trabalho: “**AVALIAÇÃO DE PAPÉIS ISOLANTES E ELASTÔMEROS APÓS CONTATO COM ÉSTER NATURAL ISOLANTE BIOVOLT A**”.
- Submissão de artigo para a revista **IEEE DIELECTRIC INSULATING MAGAZINE**, intitulado: “Interaction of natural ester insulating with transformer materials”.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Transformadores

Os transformadores são equipamentos chaves nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo, portanto extremamente essenciais para o padrão de vida e consumo do mundo atual. Qualquer que seja a matriz energética predominante nos diversos países, hídrica, nuclear, eólica ou fóssil, a transmissão e distribuição da energia gerada requer o uso de transformadores elétricos (FERNANDES, 2009).

Apesar de ter boa eficiência, o transformador não é uma máquina ideal, logo ao elevar ou baixar a tensão numa rede, o transformador perde energia na forma de calor. Quanto maior a potência, maior será a quantidade de calor a ser dissipada pelo transformador. Logo, sendo uma máquina estática, é necessária a circulação de um fluido refrigerante, em quantidade suficiente, capaz de fazer a troca de calor entre os componentes metálicos do transformador com o meio externo (MARTIGNONI, 1991).

A parte principal de um transformador é o seu sistema de isolamento, constituído, basicamente, por um fluido isolante, comumente OMI, e uma isolação sólida, a base de papel Kraft. Para a maioria dos casos, o papel isolante é o elemento responsável pela definição da vida útil do equipamento elétrico, uma vez que, diferente do isolante líquido, não pode ser regenerado ou substituído ao longo da operação do transformador (BATISTA, et al., 2005). Na Figura 1, está apresentado um esquema do núcleo de um transformador, sendo mostrado, em detalhe, o isolamento sólido.

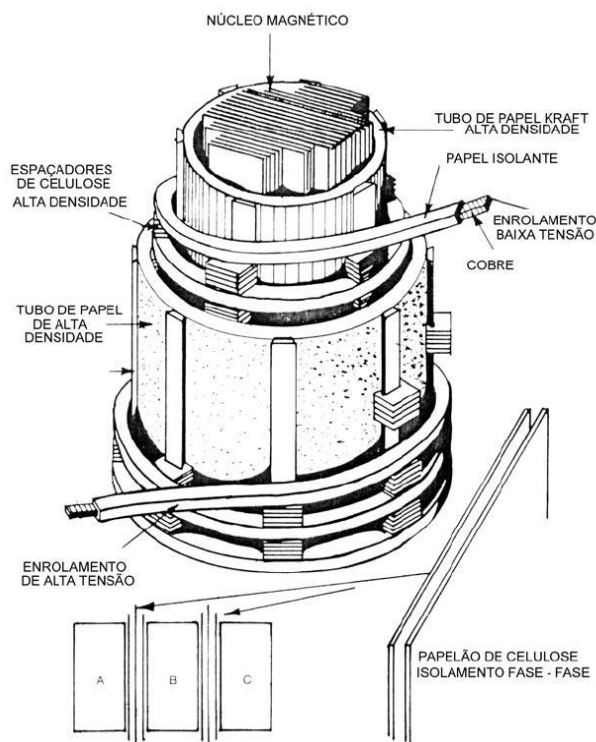


Figura 1. Esquema representativo do núcleo de um transformador

Fonte: (MYERS, KELLY, & PARRISH, 1982.).

No decorrer da vida útil de um transformador, o sistema de isolamento está sujeito a constantes estresses que podem ser classificados em quatro tipos: elétrico (tensão, frequência de operação, sobretensão), térmico (temperatura de operação, variações de temperatura), mecânico (vibrações e torção) e ambiental (corrosão, contaminação, intempéries) podendo os mesmos agir de forma individual ou combinada (CUNHA, 2005). Por isso, considera-se que o sistema de isolamento sólida é o componente mais frágil de um transformador e, frequentemente, suas condições determinam a vida útil do transformador sendo necessário que as concessionárias utilizem um programa de manutenção preventiva para que sua vida útil seja mantida ou ampliada (TULIO, 2008).

Devido à dificuldade de acesso direto aos componentes do transformador, a manutenção preventiva é feita indiretamente, pela análise das condições físico-químicas do fluido dielétrico, que devido a sua convecção e difusão dentro do transformador é um indicador indireto da deterioração do componentes internos bem como uma medida direta da qualidade do fluido, levando em consideração seu tempo de uso (TULIO, 2008).

2.1.1.2 FLUIDOS ISOLANTES PARA TRANSFORMADORES

A função de um óleo isolante em um transformador é garantir isolamento elétrico entre suas partes energizadas e permitir a refrigeração interna destas partes por meio da transferência de calor, substituindo ainda o possível ar existente entre as partes proporcionando alta rigidez dielétrica e baixa condutividade entre si (ARANTES, 2005).

Os meios isolantes, de interrupção e de refrigeração, comumente usados em equipamentos elétricos são os mais diversos, podendo ser gasosos (ar, hexafluoreto de enxofre), líquidos (OMI e silicone) e sólidos (resinas epóxi ou fibra de vidro). O OMI, que vem sendo utilizado em transformadores desde 1890 (a história do transformador começou em 1855 com uma patente conferida a Addenbrooke e Ferranti), continua sendo, atualmente, o dielétrico líquido mais utilizado em transformadores em associação com o papel isolante (UHREN, 2007). Na década de 1990, impulsionado pela crescente consciência ambiental, iniciaram-se pesquisas para uso de ésteres naturais como fluidos isolantes para transformadores.

Apresentando algumas propriedades físico-químicas superiores ao OMI, como ponto de combustão superior a 300 °C e custo inferior aos apresentados pelos fluidos à base de ésteres sintéticos (MCSHANE, 2002), os ésteres naturais vêm sendo usados como alternativa aos óleos minerais em transformadores há mais de uma década.

2.1.1.3 Óleo mineral isolante (OMI)

Por mais de cem anos o OMI proveniente do refino do petróleo tem sido usado como líquido isolante em transformadores. Muitos bilhões de litros de óleo estão em uso em equipamentos elétricos pelo mundo. A popularidade do OMI é devido a sua disponibilidade e baixo custo. Adicionalmente ele é um excelente meio de isolamento e de resfriamento (CLAIBORNE e CHERRY, 2006). OMI utilizado em equipamentos elétricos é obtido pela destilação do petróleo, correspondendo à fração obtida entre 300 a 400 °C. Este líquido pode ser de origem parafínica ou naftênica (LIPSTEIN, SHAKHNOVICH, 1970 e CLARK, 1962). O OMI não é um

composto puro, mas sim uma mistura de componentes na qual a maioria das moléculas é constituída basicamente por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio em sua estrutura (heterocompostos). Suas moléculas médias possuem de 19 a 23 átomos de carbono (WILSON, 1980).

Os hidrocarbonetos podem ser divididos em três grupos, parafinas ou alcanos, naftenos ou cicloalcanos e aromáticos (Figura 2), sendo cada um destes grupos definidos conforme segue:

- Parafinas ou alcanos: hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta linear ou ramificada (Figura 2A).
- Naftenos ou cicloalcanos: hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo um ou mais anéis, sendo que estes podem possuir uma ou mais cadeias laterais lineares ou ramificadas (Figura 2B).
- Aromáticos: hidrocarbonetos aromáticos contendo um ou mais anéis benzênicos que podem ser combinados com anéis alicíclicos, podendo ou não apresentar cadeias laterais (Figura 2C).

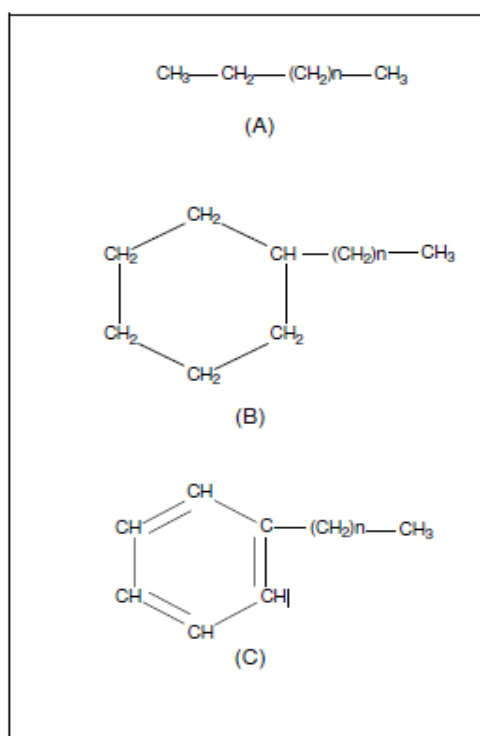


Figura 2. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos constituintes do OMI: (A) alcanos, (B) naftenos ou cicloalcanos e (C) aromáticos

Durante a operação do equipamento, o OMI degrada e mudanças consideráveis ocorrem nas suas propriedades físicas, químicas e elétricas. Como consequências ocorre:

- Alteração nas propriedades isolantes do óleo.
- Aceleração do processo de degradação da celulose.
- Formação de borra (material que se deposita na parte ativa dos transformadores, dificultando a transferência de calor).

2.1.1.4 Éster natural isolante (ENI)

A partir da década de 1990, uma nova classe de fluidos isolantes obtida de oleaginosas foi desenvolvida para uso em transformadores que, devido principalmente às suas características biodegradável e renovável, foram denominados de 'fluidos ecologicamente corretos'. Além disso, são considerados fluidos de segurança por terem ponto de combustão > 300 °C. Este tipo de óleo é um dos principais produtos derivados de plantas. Estima-se que dois terços da produção total de óleos vegetais são destinados à alimentação, mas é crescente sua utilização para outros fins como biocombustíveis e fluidos dielétricos para transformadores (REDA et. al., 2007). O Brasil possui grande diversidade de plantas oleaginosas e é um dos maiores produtores de grãos do mundo. Sendo assim, está também entre os principais produtores mundiais de óleo vegetal. Em 2006, a principal fonte deste produto no Brasil era a soja (88,9%) seguido de algodão, dendê e girassol (TULIO, 2007).

Os primeiros produtos comerciais de ENIs lançados no mercado nacional foram o Biotemp e o Envirotemp FR3. Em 2003, foram lançados, no mercado nacional os óleos Biovolt (WILHELM, 2008). Atualmente, no Brasil, o fluido Envirotemp FR3 é comercializado e fabricado pela Cargill, enquanto que o Biotemp é importado da Suécia pela ABB Brasil. Os óleos Biovolt são produzidos e comercializados por uma empresa paranaense, a Mineraltec, instalada em Pato Branco (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009).

Quimicamente, o óleo vegetal é formado por moléculas de acilgliceróis, conforme mostrado na Figura 3, que são originárias da condensação entre ácidos

graxos e glicerol (tri-álcool), formando ésteres de ácidos graxos. Assim, estes compostos são classificados em mono, di ou triacilgliceróis, dependendo se uma duas ou três moléculas de ácido graxo se associa(m) covalentemente ao glicerol, respectivamente, formando ésteres de ácido graxo. É importante salientar que os triacilgliceróis podem ser formados por ácidos graxos iguais ou diferentes entre si, e, dependendo da origem da matéria prima, podem ser saturados ou insaturados (UHREN, 2007).

Os óleos vegetais são sempre obtidos a partir de grãos, por processos de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. Ao final deste processo, tem-se o óleo bruto. Este óleo passa então pelos processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, obtendo-se o óleo refinado (MORETTO e FETT, 1998).

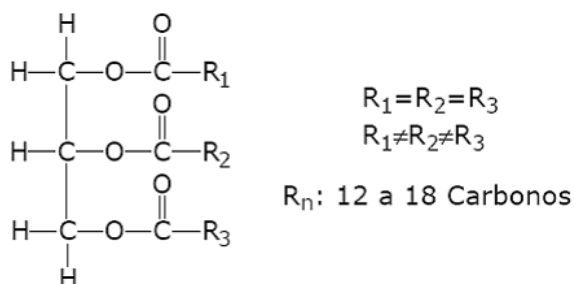


Figura 3. Estrutura química do triacilglicerol que compõe o óleo vegetal

Fonte: UHREN, 2007.

Os transformadores são considerados pelas companhias de seguro e gerentes de risco como os equipamentos mais críticos de uma planta industrial, dado a existência simultânea de grande quantidade de óleo e elementos submetidos a altas tensões elétricas. Explosões ou incêndios podem ocorrer nas redes de abastecimento e, com isso, gerar repercussões consideráveis, tanto para as companhias de energia elétrica como para a comunidade em geral (ROLLAND, 2004). Por serem produzidos a partir de materiais sustentáveis, os ésteres naturais isolantes possuem propriedades ambientais que agregam valor para usuários com consciência ambiental. A sustentabilidade do produto está baseada em duas contribuições básicas: por ser proveniente de uma cultura renovável, biodegradável, atóxica e por ampliar o ciclo de vida útil dos isolamentos celulósicos

(BINGENHEIMER, FIACCO e RAPP, 2011). Devido a sua natureza química, os ésteres naturais apresentam grande afinidade com a água, esta propriedade contribui para o aumento da vida útil do isolamento sólido.

O OMI apresenta baixa biodegradabilidade, podendo, em caso de vazamentos ou derramamentos, contaminar o solo e os recursos hídricos. As agências regulatórias ambientais do governo impõem altas penalidades às empresas quando da notificação de acidentes desta natureza. Além deste desembolso financeiro, as empresas precisam adotar medidas para remediar os sistemas impactados, que geralmente, são baseadas em processos bastante onerosos. Por ser biodegradável, o ENI é facilmente degradado pelos micro-organismos no meio ambiente, sendo que 95% ou mais destes produtos biodegradam no ensaio de 28 dias (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009). Assim, é esperado que o processo de remediação dos sistemas impactados com estes fluidos seja mais simples e mais barato em relação ao do OMI (CLAIBORNE e CHERRY, 2006).

Para avaliação dos ENIs novos, foi publicada, em 2006, a norma ABNT NBR 15422 “*OVI para Equipamentos Elétricos*”. Esta norma foi elaborada com base no estudo da força tarefa FT-02 do grupo de trabalho de líquidos isolantes GT D1.01 do CIGRÉ (Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica), responsável pela definição dos ensaios de aceitação deste novo fluido e na norma ASTM D6871 “Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus”. Os ENIs novos quando ensaiados segundo os métodos indicados na norma ABNT NBR 15422, devem apresentar características de acordo com os valores limites especificados na Tabela 1.

Tabela 1. Características do ENI novo

Ensaio	Unidade	Método (ABNT)	Limite especificado*
Análise visual	-	VISUAL	1,0 máx.
Índice de neutralização	(mg KOH/g óleo)	NBR 14248	0,06 máx.
Cor	-	NBR 14483	1,0 máx.
Teor de água	(ppm,m/m)	NBR 10710/B	200
Densidade a 20 °C	(g/ml)	NBR 7148	0,96 máx.
Rigidez dielétrica	(kV)	NBR 6869	30 mín.
Fator de Perdas Dielétricas a 25 °C	(%)	NBR 12133	0,20 máx.
Fator de Perdas Dielétricas a 100 °C	(%)	NBR 12133	4,0 máx.
Viscosidade a 20 °C	(cSt)	NBR 10441	150 máx.
Viscosidade a 40 °C	(cSt)	NBR 10441	50 máx.
Viscosidade a 100 °C	(cSt)	NBR 10441	15 máx.
Ponto de combustão	(°C)	NBR 11341	300 mín.
Ponto de fulgor	(°C)	NBR 11341	275 mín.
Ponto de fluidez	°C	NBR 11349	-10 máx.
Enxofre corrosivo	-	NBR 10505	Não corrosivo

* Fonte: ABNT NBR 15422 (2006)

2.2 ISOLAMENTO SÓLIDO

O isolamento sólido é extremamente crítico na correta operação e determinação da vida útil de um transformador, já que está sujeito a estresses significativos e não é passível de regeneração (LUNDGAARD et. al., 2004).

Atualmente, na maior parte do isolamento interno dos transformadores, é utilizado o papel kraft neutro e sua versão termoestabilizada, ambos polímeros de base celulósica ou seja, material em cuja constituição predomina a celulose, hemicelulose e lignina (BATISTA, 2005). Recentemente foi introduzido no mercado o uso do papel nomex[®], em transformadores em serviço, visando aumentar a sua potência nominal pelo uso de sistemas de isolação híbrida, que consiste na troca de papel celulósico por nomex[®]

2.2.1 Papel kraft

A celulose cuja estrutura é mostrada esquematicamente na Figura 4, sob a forma de papel ou papelão isolante elétrico (papel kraft, papelão kraft, papel manilha e papelão com fibra de algodão), tem sido largamente utilizada nos transformadores como isolante sólido. A sua escolha foi estabelecida universalmente em função de alguns parâmetros, como por exemplo, o seu baixo custo e fácil obtenção, além de suas boas propriedades elétricas e mecânicas quando imersa no óleo isolante (MORAIS, 1990; MILASH, 1984). O papel kraft é utilizado na forma de finas camadas, envolvendo os enrolamentos ou na forma de espaçadores e tubos de alta densidade, para promover o isolamento entre cargas de tensão e entre fases. Nas buchas cerâmicas capacitivas e não-capacitivas de alta tensão, é usado papel impregnado com óleo ou resina. Nas buchas de menores tensões podem ser utilizados materiais cerâmicos ou poliméricos (MILASH, 1984).

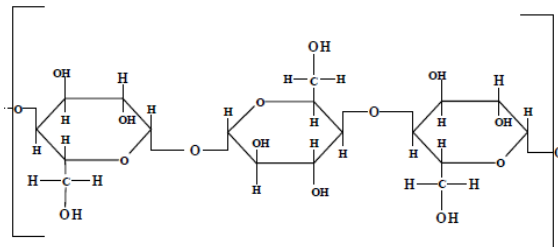


Figura 4 . Representação esquemática da estrutura da celulose

Fonte: Filho, 2008.

O nome kraft é o nome dado ao processo no qual a madeira é tratada com hidróxido de sódio e sulfato de sódio (FILHO, 2008). A massa molar das moléculas de celulose é medida em termos do grau de polimerização (GP), o qual exprime uma média do número de anéis de glicose por molécula de celulose, situando-se na faixa de 1000-1400 para papéis isolantes novos.

2.2.2 Papel termoestabilizado

O papel kraft do tipo termoestabilizado é um papel cuja celulose passou por um processo de tratamento especial, que fornece uma vantagem térmica em relação a celulose do papel kraft neutro, melhorando seu desempenho frente ao envelhecimento térmico e conseqüentemente aumentando a expectativa de vida do equipamento. O processo de termoestabilização pode envolver tanto reações de cianoetilação ou acetilação, como a adição de produtos químicos estabilizantes, tipo uréia, melanina, dicianodiamina e outros (FILHO, 2008).

No final dos anos 50 o papel kraft termoestabilizado foi introduzido no mercado dos Estados Unidos. O uso deste papel, termicamente mais estável, permitiu um aumento na temperatura média de aumento do enrolamento de transformadores de 55 °C para 65 °C (QUADROS, 2006). Dois métodos básicos foram desenvolvidos para incrementar a qualidade do papel, um deles é a acianoetilação ou cianoetilação que consiste na substituição dos grupos hidroxilas menos estáveis da molécula de celulose. Isto reduz a quantidade de água formada durante o envelhecimento da celulose, aumentando a vida do papel. Nesse método a celulose reage com a nitrila acrílica e é obtida uma celulose parcialmente cianoetilada, contendo cerca de 2,6% de nitrogênio. O outro método, mais utilizado atualmente, consiste em adicionar estabilizadores a polpa da madeira no processo de fabricação. Os compostos usados são a dicianodiamida, uréia, melanina, policrilamida entre outros produtos de substituição. A adição de estabilizadores tem o objetivo de evitar a reação do papel com os produtos de degradação. A Figura 5 ilustra a estrutura química típica e processo de obtenção do papel termoestabilizado por cianoetilação.

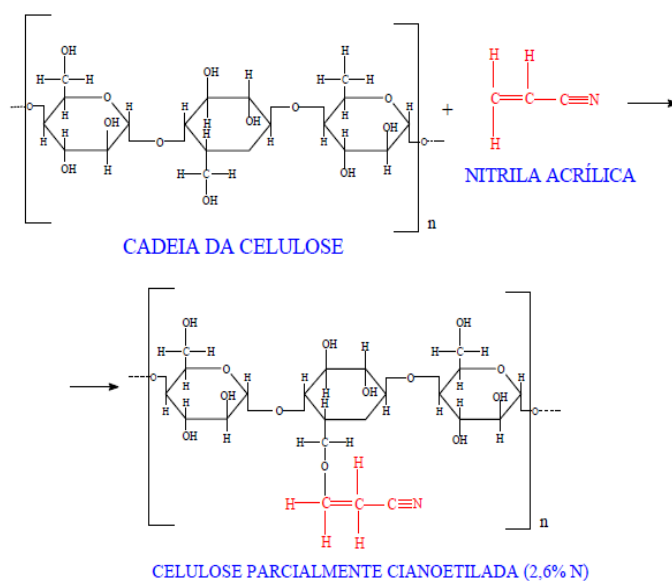


Figura 5. Esquema da reação química de cianoetilação da celulose para obtenção do papel termoestabilizado

Fonte: Filho, 2008.

O papel termoestabilizado suporta, mantendo uma taxa de envelhecimento satisfatória, uma temperatura de operação de até 110 °C enquanto que a temperatura máxima de operação do papel kraft simples é de 65 °C (MCNUTT et. al., 1996).

2.2.3 Papel nomex[®]

A produção comercial do nomex teve início em 1967 na fábrica de Spruance, em Richmond, Virgínia (EUA), a qual se mantém ainda hoje como principal centro de produção de todos os tipos de papel nomex[®]. O papel nomex[®] consiste de um polímero de poliamida aromático (geralmente denotado como aramida). A estrutura molecular é mostrada na Figura 6, sendo este polímero estável termicamente, com propriedades físico-químicas que permitem sua utilização como material isolante em equipamentos elétricos de alta e extra-alta tensão.

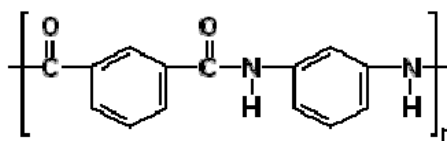


Figura 6. Fórmula estrutural da unidade monomérica do nomex

Fonte: QUADROS, 2006

O papel nomex é obtido pela mistura de pequenas partículas fibrosas aglutinantes e fibras curtas resultantes de cortes transversais de filamentos de fibras de aramida, misturados numa massa aquosa e transformada numa estrutura contínua em folha por meio de uma papeleira especializada. Na saída da papeleira o papel apresenta uma baixa densidade e propriedades mecânicas e elétricas limitadas. As etapas subsequentes de densificação e de adesão interna são realizadas por meio de calandragem a alta temperatura, da qual resulta um papel robusto e flexível.

O material isolante nomex apresenta alta resistência mecânica, baixo alongamento, alta resistência ao calor e alta resistência a meios com características ácidas ou básicas. Há alguns pontos dos transformadores, como condutores de corrente de alta tensão, que operam à temperaturas muito acima do limite de tolerância do papel termoestabilizado (MCNUTT et. al., 1996). Nestes pontos é recomendado o uso de materiais dielétricos mais estáveis termicamente, como é o caso do papel nomex que pode suportar temperaturas de até 220 °C. Mesmo sendo bem mais estável à altas temperaturas que os demais tipos de papel isolante, o nomex também sofre o processo de envelhecimento liberando compostos que podem ser monitorados ao longo de sua vida útil (QUADROS, 2006).

2.2.4 ENVELHECIMENTO DOS MATERIAIS CELULÓSICOS

A degradação do papel isolante é uma das causas mais comuns que origina defeitos graves em transformadores elétricos. O mecanismo da degradação da celulose é complexo e depende das condições as quais ela está sujeita. Os principais fatores que proporcionam a degradação do papel isolante (isolação sólida)

no transformador em operação são: temperatura, oxigênio e a umidade (PABLO & PAHLAVANPOUR, 1997).

a. Envelhecimento térmico: sob ação do calor, a cadeia da celulose quebra suas ligações produzindo cadeias menores que a original (diminuição da massa molar). Os produtos finais provenientes do envelhecimento térmico incluem água (H_2O), óxidos de carbono (CO e CO_2), hidrogênio (H_2) e compostos furânicos.

b. Envelhecimento oxidativo: na presença de oxigênio, as ligações intermoleculares (ligação de hidrogênio), que mantém as cadeias poliméricas unidas tornam-se mais fracas. Os grupos hidroxila reagem convertendo-se em grupos carbonila (aldeídos e cetonas) e carboxila (ácidos). O enfraquecimento das ligações glucosídicas pode levar a cisão da cadeia polimérica. No processo de oxidação são produzidos CO , CO_2 e H_2O .

c. Envelhecimento hidrolítico: a água e os ácidos afetam a ligação glucosídica, causando ruptura de cadeia. O resultado é o encurtamento da cadeia polimérica (diminuição da massa molar) com o conseqüente enfraquecimento das fibras, desidratação e formação de compostos furânicos.

Um dos métodos utilizados para a avaliação do estado de envelhecimento do papel isolante é o grau de polimerização (GP) que é uma estimativa do número médio de moléculas de glucose ao longo da cadeia de celulose. O GP de um papel novo está na faixa de 1000 a 1400 enquanto que valores de 400 a 250 configuram uma situação crítica de resistência mecânica para aplicação em transformadores, que pode levar à ruptura da isolação sólida, falha elétrica e até colapso da máquina (MORAIS et. al., 1996; BAIRD et. al., 2004; BATISTA, 2005). Apesar de ser uma técnica precisa de avaliação do envelhecimento da isolação sólida, é necessário que o equipamento seja desligado para a retirada de uma amostra da isolação, que por sua vez está aplicada em pontos de difícil acesso do transformador (BATISTA, 2005).

Em função da dificuldade da amostragem do papel, o monitoramento da qualidade do isolamento solido é realizado pela dosagem de compostos furânicos (CF). Esses compostos são gerados exclusivamente a partir da degradação do papel. O composto químico 2-furfuraldeído (2-FAL) é o principal subproduto formado

na degradação dos materiais celulósicos. Assim, o monitoramento contínuo da concentração de 2-FAL tem sido usado como indicador do envelhecimento do papel isolante em transformadores de potência.

2.3 COMPATIBILIDADE DO ENI E OMI COM MATERIAIS INTERNOS DO TRANSFORMADOR

O objetivo do teste de compatibilidade é avaliar o efeito resultante das interações químicas entre os diferentes materiais e entre os materiais e seus ambientes. Por este conceito, cada material é analisado em termos de sua composição química. Uma vez que diferentes estruturas químicas estão em contato umas com as outras e com seus ambientes, podem haver interações entre elas. Incompatibilidade significa que diferentes estruturas químicas interagem acelerando a degradação das estruturas dos materiais, resultando em uma vida útil reduzida.

Existem duas maneiras de considerar a compatibilidade dos materiais e do óleo isolante. A primeira maneira é avaliar se os materiais impactam o óleo isolante de forma negativa ou o óleo afeta o desempenho dos materiais utilizados. Em transformadores preenchidos com óleo, por exemplo, o óleo é o isolante mais importante. Por esta razão é imperativo que os materiais utilizados na construção das bobinas não afetem a capacidade do óleo de isolar e de dispersar calor. Para avaliar a compatibilidade dos materiais do transformador com o óleo mineral isolante (OMI) podem ser utilizados os ensaios da norma ASTM D3455 “Compatibility of Construction Material with Electrical Insulating Oil of Petroleum Origin” e da norma ABNT NBR 14274 “Determinação da compatibilidade de materiais empregados com óleo mineral isolante”. Na norma ABNT NBR 14274 os seguintes critérios são suficientes para indicar a incompatibilidade dos materiais com OMI:

1. Aumento da tangente delta superior a 0,5% em relação à prova em branco.
2. Redução da tensão interfacial superior a 5 dinas/cm em relação a prova em branco.
3. Aumento do índice de neutralização superior a $0,02 \text{ mg KOH (g de óleo)}^{-1}$ em relação a prova em branco.

Como ainda não existe uma norma publicada para realização dos ensaios de compatibilidade com o ENI, Uhren realizou testes de compatibilidade de alguns materiais internos do transformador com ENI, baseado na metodologia e nos critérios definidos na norma ABNT NBR 14274 (UHREN, 2007). De acordo com os resultados obtidos, Uhren concluiu que alguns materiais testados em seu estudo como, a tinta o fio esmaltado e a borracha nitrílica seriam classificadas como incompatíveis com o ENI utilizado, baseado nos critérios definidos para OMI (ABNT NBR 14274). Porém, o autor comentou que, como para realização dos testes foi usada a norma para OMI, não foi possível concluir se os resultados obtidos no estudo realizado para o ENI e misturas deste com OMI realmente eram indicativos de incompatibilidade. Ou seja, os ensaios de compatibilidade realizados reforçaram a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre o assunto e de elaboração de uma norma nacional ou internacional específica para avaliação da compatibilidade dos materiais internos do transformador com ENI e misturas deste com OMI (UHREN, 2007). Os resultados do estudo realizado por Franch em sua dissertação de mestrado contribuíram para a elaboração de um projeto de norma específica para a compatibilidade do ENI com os materiais internos do transformador (FRANCH, 2010).

Baseados em todos os ensaios realizados Franch propôs os seguintes valores limites para o ENI da prova em branco em relação ao óleo original (óleo tal qual recebido) (FRANCH, 2010):

1. Fator de perdas dielétricas a 90°C: aumento máximo de 0,2%.
2. Índice de neutralização: aumento máximo de 0,01 mg KOH.(g óleo)⁻¹.
3. Viscosidade a 40 °C: aumento máximo de 0,3 cSt.

Dentre estes parâmetros analisados (viscosidade, índice de neutralização e perdas dielétricas), o parâmetro que apresentou a maior variação nos ésteres naturais isolantes após os testes de compatibilidade, segundo Franch, foi o fator de perdas dielétricas (FRANCH, 2010).

A partir dos estudos realizados por Uhren e Franch, a Comissão de Estudos de Líquidos Isolantes Sintéticos e Naturais (CE-03:010.2) criou um projeto de norma para ensaio de compatibilidade de materiais internos do transformador com ENI.

De acordo com esse projeto de norma 03.010.02-029 os seguintes critérios são suficientes para indicar a incompatibilidade do material com ENI:

1. Aumento do índice de neutralização superior a 0,03 mg KOH/g de óleo em relação à prova em branco.
2. Aumento do fator de perdas dielétricas a 90 °C superior a 3% em relação à prova em branco.
3. Aumento da viscosidade superior a 0,3 cSt em relação à prova em branco.
4. Cor aumento máximo de 0,5.
5. Diminuição da rigidez dielétrica superior a 10%.

2.4 INTERAÇÃO DO SISTEMA PAPEL ISOLANTE/ LIQUIDO ISOLANTE

Durante a operação do transformador o óleo e o papel passam por um processo de envelhecimento, que pode ser afetado por variáveis como temperatura, umidade e presença de oxigênio. A umidade é tida como inimigo número um da isolação sólida do transformador (FONFANA, 2002). A umidade no OMI atua como agente catalisador na decomposição da celulose, diminuindo, conseqüentemente, a vida útil do equipamento elétrico. Devido a sua natureza química e sua grande capacidade de saturação de água, os ENIs podem acomodar uma quantidade maior de água do que os óleos minerais, fazendo com que a água seja deslocada do papel para o fluido, essa é uma das características vantajosas dos ésteres naturais utilizados como isolantes, pois há um aumento significativo na vida útil do papel (TULIO, 2009).

Resultados de estudos anteriores mostraram que o papel envelhecido em OMI degrada em taxa significativamente mais rápida do que em fluido de ENIs (RAPP, 2002). Os resultados experimentais de Rapp indicaram que o papel em ésteres naturais leva 5-8 vezes mais tempo para chegar ao fim de sua vida útil.

Segundo Rapp e colaboradores, a água no ENI é consumida no processo de hidrólise do triacilglicerol (molécula do ENI) gerando ácidos graxos livres de cadeia longa (RAPP et al, 2001; RAPP et al 2002; RAPP et al, 2005). Este mecanismo de hidrólise favorece o deslocamento de mais moléculas de água do papel para o fluido isolante para manter o equilíbrio químico, ou seja, indiretamente este deslocamento promove a secagem do papel isolante e, conseqüentemente, a extensão da sua vida útil.

Segundo Liao e colaboradores devido a maior força de interação entre a água e as moléculas de éster natural, a molécula de água é facilmente ligada com a

molecula do éster natural, diminuindo o processo de hidrólise da celulose. Devido esta característica os resultados do ensaio de envelhecimento realizado por Liao e colaboradores mostraram que o papel pode ter sua vida útil estendida na presença do ENI (LIAO et al, 2011).

CAPÍTULO 3

3.0 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento das atividades da pesquisa realizada.

3.1 Fluidos isolantes e materiais utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o ENI tipo Biovolt A, cedido pela empresa Mineraltec e o OMI AV-60 IN adquirido da Petrobras. Os papéis utilizados nos ensaios de compatibilidade e de envelhecimento acelerado foram cedidos pela empresa WEIDMANN TECNOLOGIA ELÉTRICA LTDA. Foram utilizados os seguintes papéis isolantes: papel kraft neutro, papel kraft termoestabilizado e papel nomex, conforme a seguinte especificação:

- Papel kraft neutro com espessura de 0,15 mm.
- Papel kraft termoestabilizado com espessura de 0,06 mm.
- Papel nomex[®] com espessura de 0,18 mm.

Os elastômeros utilizados neste trabalho foram: fluorsilicone denominados de 5365 e 5362, nitrílico, tealon, viton e viton OV7.

As tintas utilizadas foram a monocomponente e bicomponente.

3.1.1 Caracterização dos fluidos isolantes novos

Para verificar as propriedades dos fluidos isolantes novos antes do início das atividades experimentais foram realizados ensaios de caracterização. O óleo Biovolt A foi caracterizado em laboratório por análises físico-químicas de acordo com a norma ABNT NBR 15422. (ABNT NBR 15422), enquanto que o OMI foi caracterizado segundo a Resolução ANP n° 36 (ANP, 2012).

3.1.2 Caracterização dos materiais utilizados no ensaio de envelhecimento acelerado

A caracterização dos papéis isolantes foi realizada pela determinação do grau de polimerização (GP) de acordo com a norma IEC 60450, espectroscopia na região de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) (ASTM 1252, 2002), ensaios de tração e por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

No papel kraft termoestabilizado utilizado no ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório foi realizado o ensaio de determinação total de nitrogênio pelo método de Kjeldahl (A.O.A.C 991.20 2005).

Os elastômeros foram avaliados por ensaios de dureza Shore A (ASTM D2240, 2010).

3.1.3 Determinação do grau de polimerização (GP) do papel kraft neutro e kraft termoestabilizado

O GP para ambos os papéis, antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado em estufa, foi determinado pelo método viscosimétrico baseado na norma IEC 60450. Para realização do ensaio utilizou-se um viscosímetro capilar imerso em um banho de água termostático a $19,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e solução de etilenodiamina cúprica (concentração de etilenodiamina = 1 mol/L, concentração de cobre = 1 mol/L) como solvente.

Para determinação do GP nas amostras dos papéis envelhecidos em ENI e OMI, foi necessário, primeiramente, remover completamente o óleo do papel. Para tanto foi utilizado um extrator soxhlet, marca Marconi modelo MA487/3/250. As extrações foram realizadas com hexano por um período de 4 horas. Após pesou-se 0,0250 g de papel em um erlenmeyer e foi adicionado 20 mL de água, borbulhou-se gás nitrogênio por 2 minutos em seguida foram adicionados 20 mL da solução de etilenodiamina cúprica, 1mol/L, com agitação constante por 16 horas. Após as 16 horas, transferiu-se a solução do erlenmeyer para um viscosímetro e colocou-se o mesmo em um banho viscosimétrico ($19,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), esperou-se 20 minutos antes de fazer as medidas. Após o tempo requerido, elevou-se o nível da solução acima da marca superior do viscosímetro e mediu-se o tempo que a solução levou para

passar entre a marca superior e inferior do viscosímetro. A partir dessas medidas foram calculados os GPs, conforme as equações:

$$\eta S = t_s \cdot t_0 / t_o$$

Onde :

ηS = é a viscosidade específica.

t_s = o tempo, em segundos do fluxo médio da solução.

t_o = o tempo, em segundos do fluxo médio do solvente diluído

$$GP = [\eta] / K$$

Onde:

K é uma constante igual a 0,0075

$[\eta]$ é a viscosidade intrínseca da solução.

3.1.4 Espectroscopia na região de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As análises dos papéis e dos elastômeros por FTIR foram realizadas no Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná – (UFPR) com o equipamento Espectrofotômetro de Infravermelho BRUKER VERTEX 70, operando no modo refletância ATR, com resolução 4 cm^{-1} . O espectro foi obtido com velocidade de varredura de 10 kHz, na faixa de 4000 a 500 cm^{-1} .

3.1.5 Ensaios de resistência a tração realizados nos papéis antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado

A fim de determinar a força máxima de rompimento das amostras dos papéis antes e após os ensaios de envelhecimento com o ENI e OMI, foram realizados ensaios de resistência a tração. Os ensaios foram realizados em um equipamento mecânico DL 500 EMIC sendo utilizada uma célula de carga de 500 kgf. A força

aplicada no momento de ruptura do papel foi de 40 kgf, com afastamento de garras na velocidade de 20 mm/min, até que o papel rompesse. Para a realização do ensaio foi utilizado o procedimento descrito na norma ABNT NBR NM ISO 1924-2 (2001).

3.1.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Optou-se pela realização de análises usando MEV de modo a verificar, microscopicamente, as alterações do material sujeito ao envelhecimento bem como as comparações entre ambos os tipos de isolamento sólido. Esta técnica permitiu a análise da superfície dos papéis antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado. As micrografias de MEV das amostras dos papéis foram obtidas na Central de Análises Químicas Instrumentais do Instituto de Química de São Carlos (CAQI/IQSC/USP) em um equipamento ZEISS LEO 440 (Cambridge, England) com detector OXFORD (model7060), operando com feixe de elétrons de 20 kV gerados por um filamento de W.

3.1.7 Ensaio de determinação total de nitrogênio no papel termoestabilizado

A caracterização do papel termoestabilizado foi realizada pelo ensaio de determinação total de nitrogênio pelo método de Kjeldahl (A.O.A.C 991.20 2005). Este ensaio foi realizado no Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR).

3.1.8 Ensaio de dureza shore A nos elastômeros antes e após ensaio de envelhecimento acelerado

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D 2240 (1995) em um durômetro BAREISS HPE-A, utilizando carga de 1 kgf, com tempo de aplicação de carga de 5 segundos.

3.1.9 Ensaios de compatibilidade dos diferentes materiais em estudo neste trabalho

Foram realizados ensaios de compatibilidade do ENI e do OMI com materiais internos do transformador. Neste ensaio foram testados os seguintes materiais: papel kraft, papel kraft termoestabilizado e papel nomex, elastômeros tipo fluorsilicone 5365 e 5261, nitrílico, tealon, viton e viton OV7, tintas monocomponente e bicomponente. Os ensaios de compatibilidade com o ENI foram realizados em duplicata e baseados no procedimento experimental descrito no projeto de norma da CE-03:010.2 (“Equipamento elétrico – Determinação da compatibilidade de materiais empregados com óleo vegetal isolante”), a 100 °C por 164 h. De acordo com esse projeto de norma 03.010.02-029, os seguintes critérios são suficientes para indicar a incompatibilidade do material com ENI:

1. Aumento do índice de neutralização superior a 0,03 mg KOH/g de óleo em relação à prova em branco.
2. Aumento do fator de perdas dielétricas a 90 °C superior a 3% em relação à prova em branco.
3. Aumento da viscosidade superior a 0,3 cSt em relação à prova em branco.
4. Cor 0,5.
5. Diminuição da rigidez dielétrica superior a 10%.

Os ensaios de compatibilidade com o OMI foram realizados de acordo com norma ABNT NBR 14274. Inicialmente os materiais foram secos em estufa a 105 °C, por 16 h. Após este período, foram retirados da estufa e colocados em um dessecador para resfriamento a temperatura ambiente. Os materiais secos foram imersos nos frascos de vidro com tampa esmerilhada contendo 800 mL de óleo.

Foram utilizadas as seguintes condições e proporções entre os materiais testados e o fluido isolante, seguindo a recomendação da norma ABNT NBR 14274 para o OMI e do projeto de norma da CE-03:010.2 para o ENI:

- Prova em branco (somente o óleo): 800 mL de óleo isolante.
- Tinta: 1300 cm² de placas pintadas com a tinta teste em 800 mL de óleo.
- Elastômero: 65 cm² em 800 mL de óleo.
- Papel: 52 cm² em 800 mL de óleo.

Na sequência, foi borbulhado gás nitrogênio (grau de pureza 4,6), durante 2 minutos, em cada frasco contendo o material teste. Os frascos devidamente

fechados foram levados a estufa, a 100 °C, por 164 h. Depois deste período as amostras foram condicionadas a temperatura ambiente, sendo realizados os seguintes ensaios no fluido isolante:

- Fator de perdas dielétricas a 90 °C (ABNT NBR 12133).
- Índice de neutralização (ABNT NBR 14248).
- Tensão interfacial (ABNT NBR NBR 6234).

Segundo a norma ABNT NBR 14274 os seguintes critérios são suficientes para indicar a incompatibilidade dos materiais com OMI:

1. Aumento do índice de neutralização superior a 0,02 mg KOH/g de óleo em relação a prova em branco.
2. Aumento do fator de perdas dielétricas a 90 °C superior a 0,5% em relação à prova em branco.
3. Redução da tensão interfacial superior a 5 dinas/cm em relação a prova em branco.

Para ser considerado incompatível o óleo não deve atender a pelo menos um dos parâmetros acima listados. Neste estudo foram avaliados os seguintes parâmetros para o ENI: índice de neutralização, fator de perdas dielétricas e viscosidade. Para os ensaios realizados com OMI foi avaliada a tensão interfacial, o fator de perdas dielétricas e o índice de neutralização.

3.2 Ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório

Foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório a 120 °C, por 1440 h, com o ENI na ausência e na presença dos seguintes materiais: papel kraft neutro, papel kraft termoestabilizado e papel nomex, elastômeros nitrílico, tealon, viton, viton OV7 e tinta amina bicomponente. Os ensaios de envelhecimento acelerado a 120 °C com os papéis foram realizados com base no apêndice A do guia da IEEE ANSI C57.100. Para realização dos ensaios utilizou-se frascos de vidro com capacidade de 1L com tampa esmerilhada, os papéis foram secos em estufa a 100 °C por 24 h, a proporção utilizada de papel e cobre para 150 mL de óleo foi de: 16,3 g e 90,8 cm. As proporções adotadas entre o óleo e o papel nos experimentos

realizados foi baseada na real proporção que um transformador apresenta de isolante líquido e de isolamento sólida (10:1, em peso, m/m).

Para os ensaios de envelhecimento com elastômeros e a tinta foi adotado o mesmo procedimento utilizado nos ensaios de compatibilidade (ABNT NBR 14274) porém o ensaio foi estendido de 164 h para 1440 h, a proporção utilizada de elastômero e o fluido isolante foi de 65 cm² em 800 mL de óleo e para a tinta foi de 1300 cm² para 800 mL de óleo. Na sequência, foi borbulhado gás nitrogênio (grau de pureza 4,6), durante 2 minutos, em cada frasco contendo o material teste. Os frascos devidamente fechados foram levados a estufa, a 120 °C, por 1440 h. Em intervalos regulares de tempo foi retirado da estufa um frasco de cada combinação para realização de ensaios. Nas amostras dos óleos envelhecidos foram realizados ensaios de índice de neutralização (ABNT NBR 14248), viscosidade cinemática a 40 °C (ABNT NBR 10441) e perdas dielétricas a 90 °C (IEC 247). Nos materiais envelhecidos foram realizados os ensaios descritos no item (3.1.2). Também foi realizado o ensaio de envelhecimento com (OMI) com o objetivo de comparar o efeito do tipo de óleo na degradação dos materiais testados.



Figura 7. Ilustração do ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório em estufa, programa para temperatura de 120 °C

3.3 Determinação da cor dos fluidos isolantes

A análise visual da cor nos óleos foi realizada no colorímetro de acordo com a norma ASTM D1500 a fim de observar a diferença de cor durante o período de

envelhecimento de ambos os óleos. O ensaio foi realizado com o OMI e ENI na ausência e na presença dos seguintes materiais: papel kraft neutro, papel kraft termoestabilizado e papel nomex, elastômeros nitrílico, tealon, viton, viton OV7.

CAPÍTULO 4

4.0 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaios de caracterização dos fluidos isolantes novos

Os resultados obtidos para o ENI novo (Tabela 02) estavam em conformidade com a especificação contida na norma ABNT NBR 15422 e os resultados obtidos para o OMI atenderam a resolução ANP 36 de 05.12.2008 (Tabela 03).

Tabela 2. Caracterização físico-química do ENI novo

Ensaio	Método (ABNT)	Biovolt A	Valor especificado*
Análise visual	VISUAL	Claro e límpido	1,0 máx
Índice de neutralização (mg KOH/g óleo)	NBR 14248	0,01	0,06 máx.
Teor de água (ppm,m/m)	NBR 10710/B	50	200
Densidade a 20 °C (g/mL)	NBR 7148	0,9172	0,96 máx.
Rigidez dielétrica (kV)	NBR 6869	42	30 mín.
Fator de Perdas Dielétricas a 25 °C (%)	NBR 12133	0,057	0,20 máx.
Fator de Perdas Dielétricas a 100°C (%)	NBR 12133	1,16	4,0 máx.
Viscosidade a 40 °C (cSt)	NBR 10441	34,66	50 máx.
Enxofre corrosivo	NBR 10505	Não corrosivo	Não corrosivo
Ponto de combustão (°C)	NBR 11341	354	300 mín.
Ponto de fulgor (°C)	NBR 11341	324	275 mín.

*Fonte: ABNT NBR 15422 (2006)

Tabela 3. Caracterização físico-química do OMI novo

Ensaio	Método (ABNT)	AV-60 IN	Valor especificado*
Análise visual	VISUAL	VISUAL	0,5 máx
Índice de neutralização (mg KOH/g óleo)	NBR 14248	0,01	0,03 máx.
Teor de água (ppm,m/m)	NBR 10710/B	19	35 máx.
Densidade a 20 °C (g/mL)	NBR 7148	0,8823	0,96 máx.
Rigidez dielétrica (kV)	NBR 6869	51	30 mín.
Fator de Perdas Dielétricas a 25 °C (%)	NBR 12133	0,003	0,05 máx.
Fator de Perdas Dielétricas a 100°C (%)	NBR 12133	0,15	0,50 máx.
Viscosidade a 40 °C (cSt)	NBR 10441	9,93	12 máx.
Enxofre corrosivo	NBR 10505	Não corrosivo	Não corrosivo
Tensão interfacial (mN.m-1)	NBR 11341	49,5	40 mín.
Ponto de fulgor (°C)	NBR 11341	142	140 mín.

*Fonte: ANP 05.12 (2008)

Em comparação com o OMI, o ENI apresentou maior ponto de fulgor e de combustão, acima de 300 °C, conferindo-lhe a característica de fluido de segurança. Esta propriedade é importante principalmente em aplicações em espaços confinados, como em transformadores subterrâneos, onde é exigida uma margem extra de segurança contra explosão e fogo. O teor de água nos ENI é superior em relação ao OMI, o que pode ser explicado pela natureza polar desse fluido. Os ésteres naturais são isentos de compostos de enxofre corrosivo.

4.2 Ensaios de compatibilidade dos diferentes materiais em estudo

Nos ensaios de compatibilidade realizados não foram observadas diferenças no índice de neutralização e de viscosidade (dados não mostrados) para os óleos com os materiais testes em relação a prova em branco, tanto para o ENI quanto para o OMI. Se fossem considerados unicamente esses parâmetros, todos os materiais testados seriam considerados compatíveis com esses dois fluidos isolantes. Mas, foram observadas diferenças no fator de perdas dielétricas (Tabelas 4 e 5) e na tensão interfacial do OMI (Tabela 6).

A norma ABNT NBR 14274 não apresenta valor limite para a viscosidade, ou seja, a viscosidade não é parâmetro indicador de compatibilidade nos ensaios com OMI. Porém, como Tulio recomendou este parâmetro como indicador da degradação do ENI em uso, esta propriedade foi monitorada no ENI ensaiado neste estudo (TULIO, 2008). Considerando os valores limites de variação dos parâmetros do projeto de norma 03.010.02-029 (Tabela 4), os elastômeros fluorsilicone 5365 e 5261, nitrílico e um tipo de viton podem ser considerados incompatíveis com o ENI. Todos os outros materiais testados podem ser considerados compatíveis com este fluido.

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados de compatibilidade dos materiais com o OMI. Considerando o valor limite da variação para o fator de perdas dielétricas a 90 °C, descrito na norma ABNT NBR 14274 (aumento máximo de 0,50 %), o elastômero tealon e os elastômeros denominados de 5365 e 5362 foram incompatíveis com o OMI. Os demais materiais testados foram considerados compatíveis com este fluido.

Tabela 4. Efeito dos materiais testados sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C do ENI e classificação do material quanto a sua compatibilidade

Material Teste	Fator de perdas dielétricas a 90 °C do óleo com o material (%)	Diferença entre o fator de perdas dielétricas a 90 °C do óleo com o material e a prova em branco	Diagnóstico de acordo com critério do projeto de norma 03.010.02-029
Prova em Branco	1,33	-	-
Papel termoestabilizado	1,88	0,55%	Compatível
Papel nomex	1,41	0,08%	Compatível
Papel kraft	1,80	0,47%	Compatível
Tinta monocomponente	2,64	1,31%	Compatível
Tinta bicomponente	1,48	0,15%	Compatível
Elastômero fluorsilicone 5365	9,45	8,12%	Incompatível
Elastômero fluorsilicone 5261	17,08	15,75%	Incompatível
Elastômero nitrílico (AES)	7,12	5,79%	Incompatível
Elastômero viton (OV7)	2,46	1,13%	Compatível
Elastômero viton	20,13	18,80%	Incompatível
Elastômero tealon	1,60	0,27%	Compatível

Tabela 5. Efeito dos materiais testados sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C do OMI e classificação do material quanto a sua compatibilidade

Material Teste	Fator de Perdas dielétricas a 90 °C do óleo com o material (%)	Diferença entre o fator de perdas dielétricas a 90 °C do óleo com o material e a prova em branco	Diagnóstico segundo critério da norma ABNT NBR 14274
Prova em Branco	0,15	-	-
Papel termoestabilizado	0,21	0,06%	Compatível
Papel nomex	0,19	0,04%	Compatível
Papel kraft	0,18	0,03%	Compatível
Tinta monocomponente	0,25	0,10%	Compatível
Tinta bicomponente	0,22	0,07%	Compatível
Elastômero fluorsilicone 5365	15,19	15,04%	Incompatível
Elastômero fluorsilicone 5261	20,00	19,85%	Incompatível
Elastômero nitrílico (AES)	0,15	0%	Compatível
Elastômero viton (OV7)	0,27	0,12%	Compatível
Elastômero viton	0,39	0,24%	Compatível
Elastômero tealon	2,00	1,85%	Incompatível

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados para tensão interfacial do OMI. Considerando a variação máxima apresentada na norma ABNT NBR 14274 para esse parâmetro (diminuição de 5 dina/cm), dentre todos os materiais testados a tinta monocomponente, os elastômeros fluorossilicone 5365 e 5261 e o elastômero nitrílico podem ser considerados incompatíveis com OMI.

Tabela 6. Efeito dos materiais testados sobre a tensão interfacial do OMI e classificação do material quanto a sua compatibilidade

Material Teste	Tensão interfacial do óleo com o material (dina/cm)	Diferença entre a tensão interfacial do óleo com o material e a prova em branco (dina/cm)	Diagnóstico segundo critério da norma ABNT NBR 14274
Prova em Branco	50,00	-	-
Papel termoestabilizado	53,65	3,65	Compatível
Papel nomex	49,00	-1	Compatível
Papel kraft neutro	53,00	3	Compatível
Tinta monocomponente	34,00	-16	Incompatível
Tinta bicomponente	51,40	-1,4	Compatível
Elastômero flúorsilicone 5365	32,00	-18	Incompatível
Elastômero flúorsilicone 5261	33,00	-17	Incompatível
Elastômero Nitrílico (AES)	30,00	-20	Incompatível
Elastômero viton (OV7)	43,65	-6,35	Compatível
Elastômero viton	43,95	-6,05	Compatível
Elastômero tealon	55,15	5,15	Compatível

4.3 Ensaios de envelhecimento acelerado dos fluidos isolantes na ausência e presença de materiais

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes na ausência e presença dos seguintes materiais: papel kraft neutro, papel termoestabilizado, papel nomex[®], elastômero nitrílico, viton, viton (OV7), tealon e tinta bicomponente.

4.3.1 Ensaios de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes com papel kraft neutro, kraft termoestabilizado e nomex

O resultado obtido para o fator de perdas dielétricas a 90 °C dos óleos envelhecidos na presença dos papéis isolantes pode ser observado na Figura 8. O OMI envelhecido na presença do papel kraft neutro apresentou valores superiores em comparação com o material envelhecido em ENI após 40 dias de ensaio (Figura

8A). O OMI envelhecido na presença de papel kraft termoestabilizado (Figura 8B) apresentou aumento brusco no fator de perdas dielétricas após cerca de 30 dias de ensaio. Provavelmente a partir desse intervalo de tempo houve consumo do aditivo antioxidante presente no óleo. Essa informação foi confirmada a partir do ensaio de determinação do aditivo di-terc butil-paracresol (DPBC), presente em óleos minerais inibidos, por FTIR. O OMI novo apresentou um teor de 0,3% de DBPC e o óleo envelhecido por 60 dias apresentou um valor de 0,02%, comprovando que houve o consumo do aditivo antioxidante presente no OMI. Após aproximadamente 30 dias de envelhecimento, esse aditivo não foi mais identificado. Para o ENI esse parâmetro teve um aumento brusco após 10 dias de ensaio. Os altos valores reportados para os óleos envelhecidos na presença do papel termoestabilizado, cerca de duas vezes superiores aos obtidos para o papel kraft neutro, indicam que algum componente do papel está sendo extraído pelos óleos ENI e OMI.

Na presença do papel nomex[®] (Figura 8C) o fator de perdas dielétricas dos óleos isolantes (ENI e OMI) aumentou proporcionalmente com o aumento do tempo de envelhecimento sendo, ao final do ensaio, inferiores aos valores obtidos para o papel kraft termoestabilizado e pouco superiores aos obtidos para o papel kraft neutro.

Comparando o efeito dos três papéis isolantes testados neste estudo sobre o fator de perdas dielétricas dos óleos investigados OMI e ENI as menores variações foram obtidas na presença do papel nomex[®] (Figura 8C) e as maiores na presença do papel termoestabilizado (Figura 8 B). O ENI envelhecido na presença do papel kraft neutro apresentou resultados similares quando comparado com os resultados obtidos na presença do papel nomex[®] envelhecido em ENI, enquanto que o OMI apresentou valores bem superiores (Figura 8A). De uma forma geral, observou-se que o OMI envelhecido com os diferentes papéis apresentou um aumento maior no fator de perdas dielétricas após cerca de 35 dias de ensaio. Este aumento pode ser atribuído ao consumo do aditivo antioxidante a partir desse intervalo de tempo, deixando o líquido mais susceptível à oxidação

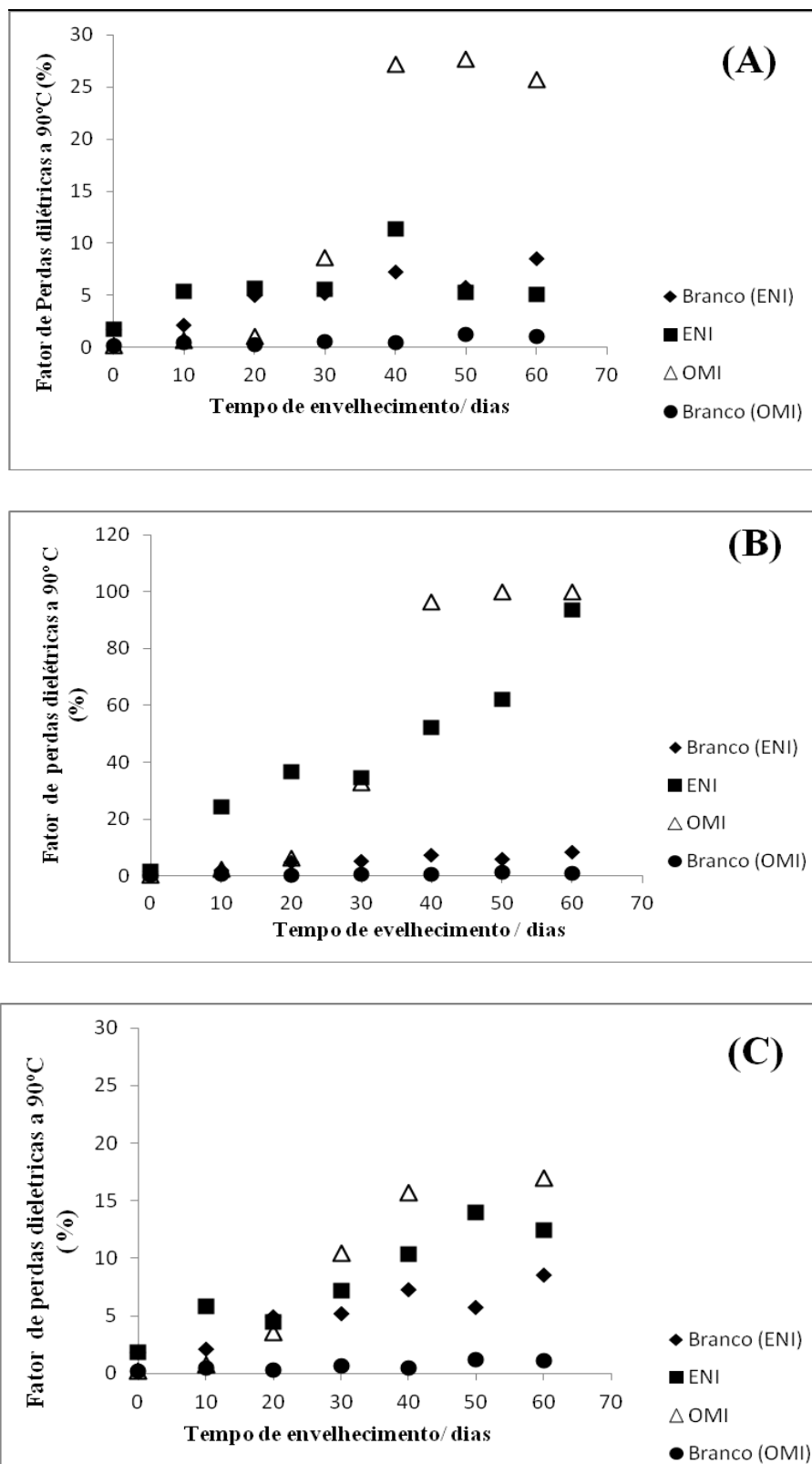


Figura 8. Efeito do tempo de envelhecimento sobre as perdas dielétricas a 90 °C do ENI e OMI na presença dos papeis (A) kraft neutro, (B) kraft termoestabilizado e (C) nomex®

Analisando o índice de neutralização (Figura 9), o OMI apresentou valores mais elevados em relação ao ENI na presença dos papéis kraft neutro (Figura 9A) e kraft termoestabilizado (Figura 9B), principalmente após 30 dias do início do envelhecimento, corroborando com os resultados de fator de perdas dielétricas apresentados na Figura 8.

O ENI tende a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que o OMI tende a formar ácidos orgânicos de cadeias curtas. Os alcoóis, aldeídos e cetonas, os quais são chamados de produtos intermediários da reação de degradação do OMI, reagem com oxigênio para dar origem aos ácidos carboxílicos, sendo estes muito mais agressivos ao papel isolante em comparação aos formados a partir da degradação do ENI. A literatura reporta que os produtos de oxidação do ENI não são prejudiciais ao papel kraft isolante, ao contrário, evitam a sua degradação precoce em função da ocorrência de uma reação de esterificação na superfície do papel (TULIO, 2007, 123 p).

Para o óleo envelhecido na presença do papel nomex[®] (Figura 9C) o índice de neutralização aumentou muito pouco sendo este aumento constante com o tempo de envelhecimento para os dois tipos de óleo investigados.

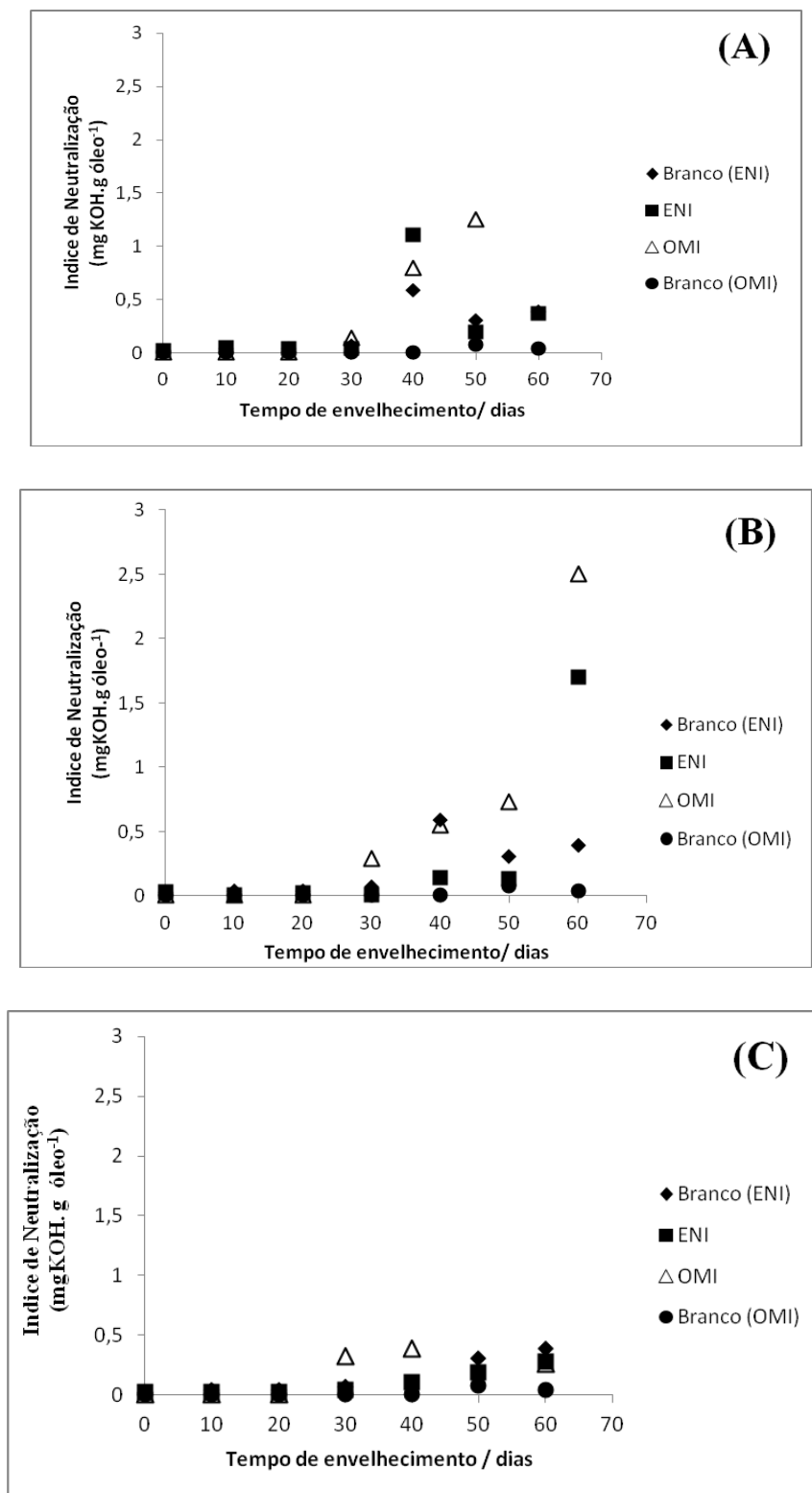


Figura 9. Efeito do tempo de envelhecimento sobre o índice de neutralização do ENI e OMI na presença dos papéis (A) kraft neutro, (B) kraft termoestabilizado e (C) nomex

A viscosidade dos óleos (Figura 10) não foi alterada durante o ensaio de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes na presença dos três tipos de papel (kraft neutro, kraft termoestabilizado e nomex).

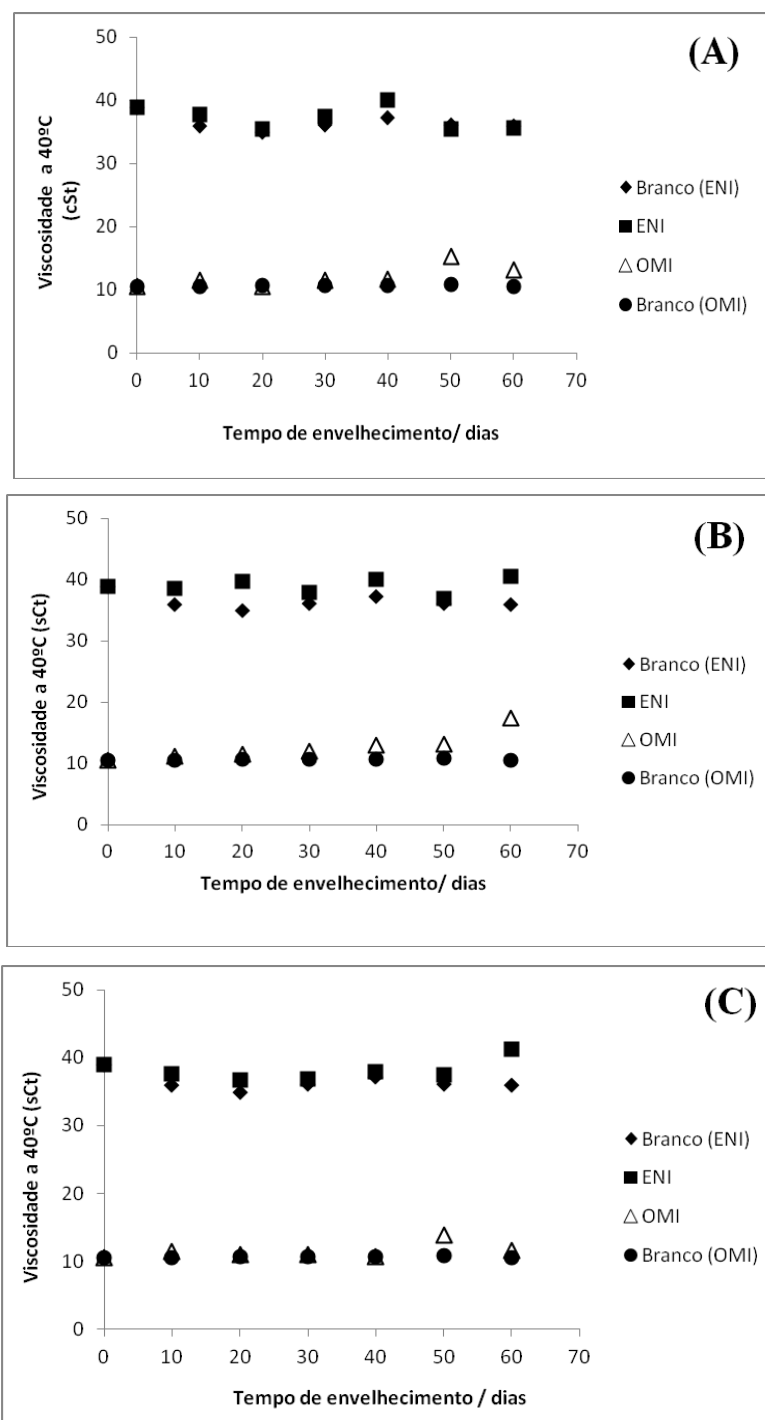


Figura 10. Efeito do tempo de envelhecimento sobre a viscosidade cinemática a 40 °C do ENI e OMI na presença dos papéis (A) kraft neutro, (B) kraft termoestabilizado e (C) nomex

Na Figura 11 estão ilustrados os resultados para o ensaio de tensão interfacial do OMI envelhecido na presença dos papéis isolantes. Independente do tipo de papel isolante utilizado a tensão interfacial permaneceu constante até aproximadamente 20 dias, após houve uma diminuição similar na presença dos três papéis.

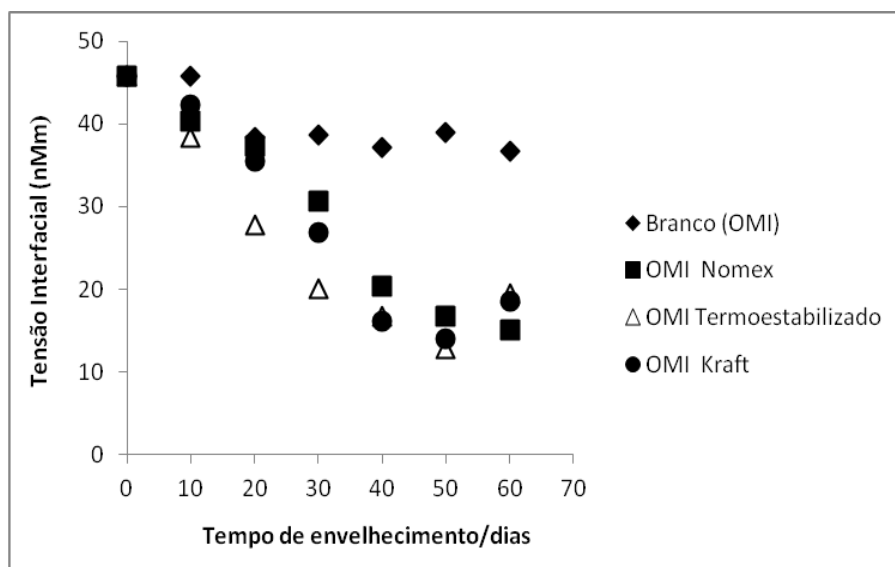


Figura 11. Efeito do tempo de envelhecimento dos papéis kraft neutro, kraft termoestabilizado e nomex sobre tensão interfacial do OMI

4.4 Análise visual de cor dos óleos envelhecidos na presença e ausência dos papéis isolantes

Na Figura 12, observa-se a diferença de coloração do ENI e OMI envelhecidos na ausência dos papéis isolantes (amostra branco). Nota-se uma coloração mais escura para o OMI em comparação ao ENI, sendo que não houve mudança significativa na cor do ENI durante o ensaio de envelhecimento acelerado. Condição diferente foi observada para o OMI.

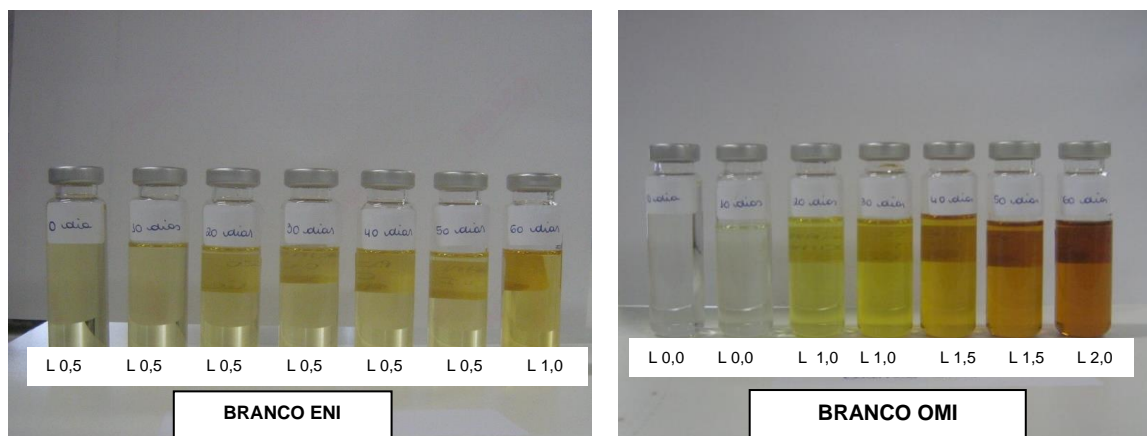


Figura 12. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120 °C, por 60 dias, realizado na ausência de papel (branco)

Na Figura 13 observa-se a diferença de cor do ENI e OMI envelhecidos na presença de papel kraft neutro. Novamente, comparado com a Figura 12, nota-se uma coloração mais escura para o OMI em relação ao ENI em função do aumento do tempo de envelhecimento.

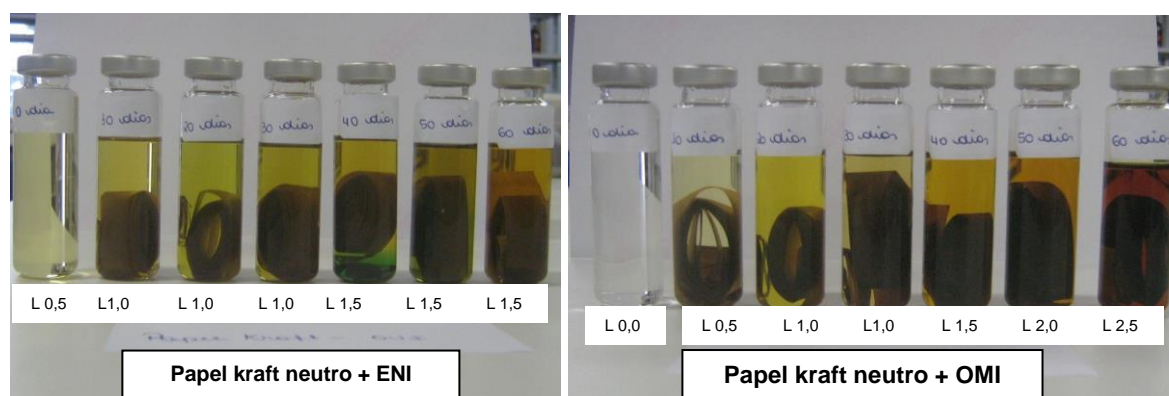


Figura 13. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório, a 120 °C, realizado na presença de papel kraft neutro

O ENI e o OMI envelhecidos na presença do papel kraft termoestabilizado (Figura 14) apresentaram colorações mais escuras desde o início do ensaio comparativamente aos óleos envelhecidos na presença de papel kraft neutro (Figura 13). Essa coloração escura foi mais intensa para o ENI comparativamente ao OMI. Esses resultados comprovam a hipótese de extração de algum componente do papel pelos óleos durante o ensaio de envelhecimento acelerado, conforme discutido no item 4.3.1, justificando os altos valores observados para o fator de

perdas dielétricas dos óleos envelhecidos na presença do papel kraft termoestabilizado (Figura 8). Outros ensaios devem ser feitos para avaliar melhor esta hipótese.

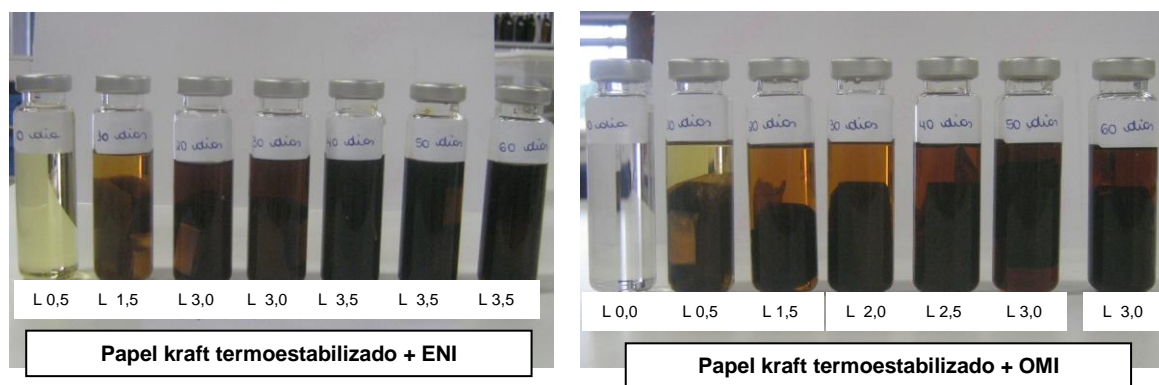


Figura 14. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório, a 120°C, realizado na presença de papel kraft termoestabilizado

O ENI envelhecido na presença do papel nomex não apresentou uma mudança significativa na cor durante o período de envelhecimento, enquanto que para o OMI envelhecido na presença de nomex é possível observar uma coloração mais escura do óleo até o final do ensaio (Figura 15).

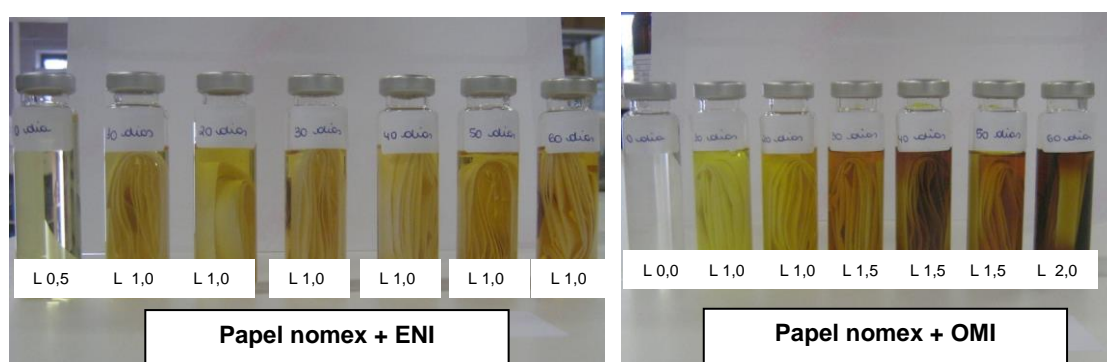


Figura 15. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório, a 120 °C, realizado na presença de papel nomex

4.5 Grau de polimerização (GP) para o papel kraft neutro e kraft termoestabilizado envelhecidos em ENI e OMI

A degradação dos papéis kraft e termoestabilizado submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado foi avaliada por meio do GP.

A Figura 16 mostra os resultados do ensaio de GP dos papéis kraft neutro e termoestabilizado submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado a 120 °C. Os resultados obtidos mostram que no papel isolante kraft neutro a celulose envelhecida em ENI degradou mais lentamente do que em OMI. Ao final do envelhecimento foi atingido um GP de ~ 250 para o OMI e de ~ 500 para o ENI. Estudos anteriores já mostraram que o papel envelhecido em OMI degrada em uma taxa significativamente mais rápida do que no ENI (MCSHANE et al., 2010).

Observou-se maior resistência do papel termoestabilizado à degradação em relação ao papel kraft neutro, independentemente do tipo de óleo utilizado. O papel termoestabilizado degradou de maneira semelhante durante o tempo de envelhecimento para ambos os óleos, sendo atingido um GP de ~ 900 ao final do ensaio de envelhecimento. Ensaio de envelhecimento realizados por Liao e colaboradores, mostraram que o resultado de GP das amostras de papel termoestabilizado envelhecido tanto em OMI quanto em ENI foram maiores quando comparados com os obtidos para o papel kraft neutro (LIAO et al., 2010). Os resultados de Liao e colaboradores também mostraram que o valor de GP para o papel kraft neutro e para o papel termoestabilizado envelhecidos em ENI foram superiores quando comparados com os envelhecidos em OMI (LIAO et al., 2010). Esses resultados não foram observados nas condições experimentais utilizadas neste trabalho, pois Liao e colaboradores utilizaram condições de temperatura diferentes e tempo de envelhecimento superior à utilizada neste trabalho.

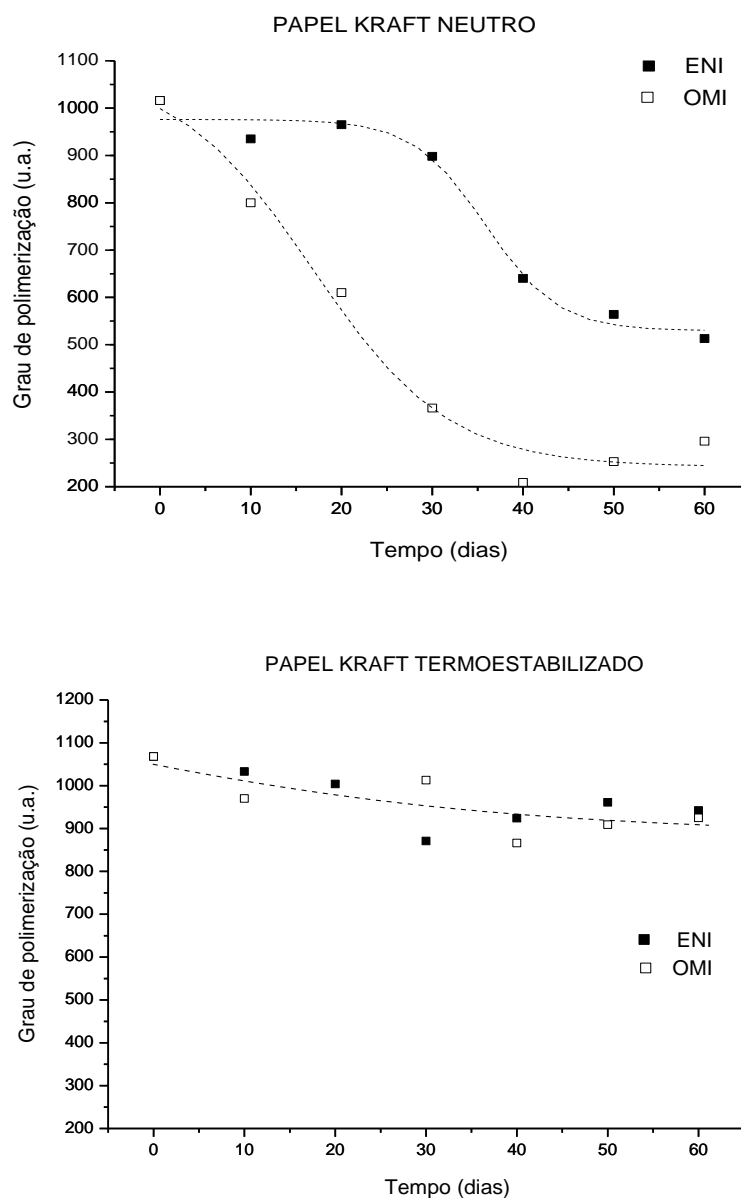


Figura 16. GP para amostras de papel kraft neutro e termoestabilizado envelhecidas em ENI e OMI a 120 °C

4.5.1 Determinação do teor de nitrogênio total

Para saber se o papel kraft termoestabilizado utilizado nesse trabalho foi modificado com compostos de nitrogênio foi determinado o teor de nitrogênio. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos para o ensaio no papel termoestabilizado novo e envelhecido. O resultado obtido foi de 3,3% para o papel novo, sendo esse

valor coerente com o especificado pelo fabricante. O teor de nitrogênio total diminuiu para ~ 1,0% nos papéis envelhecidos em ambos os tipos de óleos. Esses resultados comprovam o consumo do aditivo termoestabilizante durante o envelhecimento do papel termoestabilizado, o que justifica o maior aumento de GP em comparação ao papel kraft neutro, observado na Figura 16, independente do tipo de óleo isolante. Justifica também, a coloração escura observada na Figura 14 e os altos valores do fator de perdas dielétricas dos óleos envelhecidos na presença deste tipo de papel, conforme mostrado na Figura 8.

Também foi realizado o ensaio de teor de nitrogênio no papel kraft neutro. O resultado obtido foi de 0,02%, isso indica que este papel não passou por um processo de tratamento especial.

Tabela 7. Resultados obtidos para o ensaio de nitrogênio total para o papel kraft termoestabilizado

Tempo de envelhecimento (dias)	Teor de Nitrogênio Total g/100g (%)		
	Papel novo	Envelhecido em ENI	Envelhecido em OMI
0	3,31	-	-
10		1,4	1,2
15		1,3	1,3
30	-	1,4	1,4
60	-	1,0	1,2

4.5.2 Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 17 pode-se observar a principal diferença entre os espectros de FTIR do papel kraft neutro e do papel kraft termoestabilizado. Essa diferença está localizada na região de 1600 a 2200 cm^{-1} , região de compostos a base de nitrogênio, como os grupamentos contendo ligações $\text{C}\equiv\text{N}$ e N-H . Estas bandas podem ser atribuídas ao aditivo que foi adicionado ao papel kraft termoestabilizado para lhe conferir uma maior estabilidade térmica.

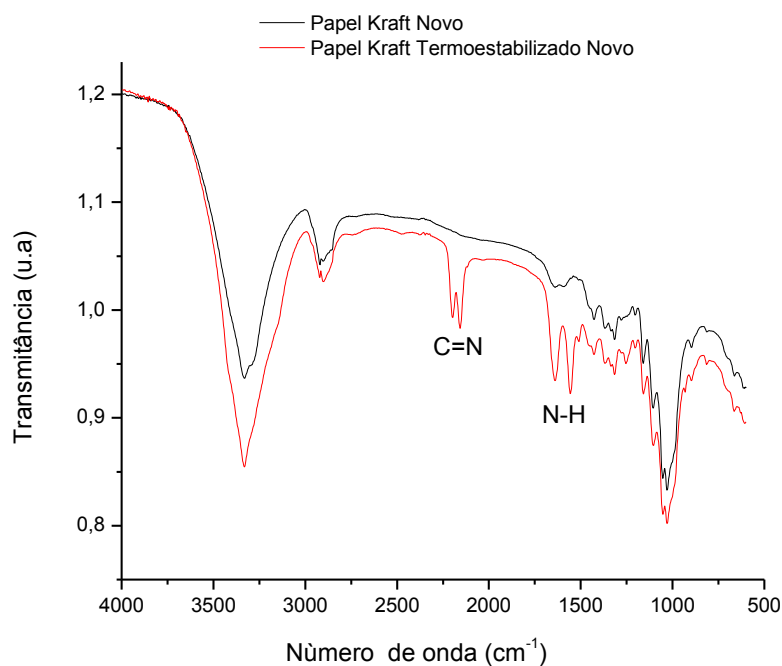


Figura 17. Caracterização por FTIR das amostras de papel kraft neutro e kraft termoestabilizado novos

Na Figura 18 estão apresentados os espectros de FTIR das amostras do papel kraft termoestabilizado novo e envelhecido em ENI e OMI. Observa-se no papel envelhecido em ambos os óleos o desaparecimento das bandas localizadas nas regiões de 1600 a 2200 cm^{-1} , evidenciando o consumo do aditivo durante o período de realização do ensaio de envelhecimento. Estes dados conferem com os obtidos no ensaio de dosagem de nitrogênio total, expressos na Tabela 7.

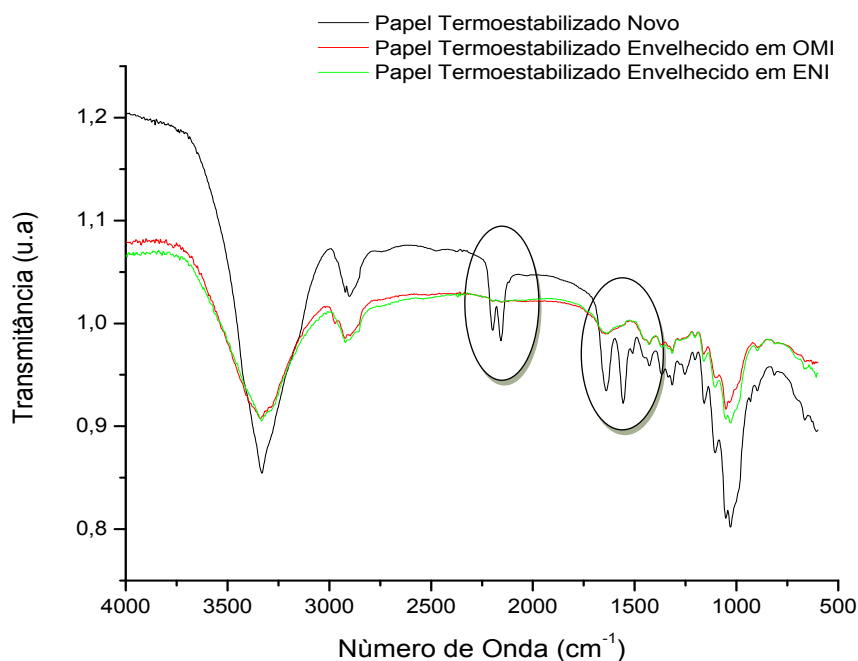


Figura 18. Caracterização por FTIR das amostras de papel kraft termoestabilizado novo e envelhecido em ENI e OMI a 120 °C

Na Figura 19 estão apresentados os espectros das amostras do papel kraft novo e envelhecidas em OMI e ENI. Nenhuma alteração significativa foi observada em comparação ao papel novo para os principais grupos funcionais constituintes da celulose. Além disso, nenhuma nova banda pôde ser identificada neste papel após o ensaio de envelhecimento para ambos os óleos.

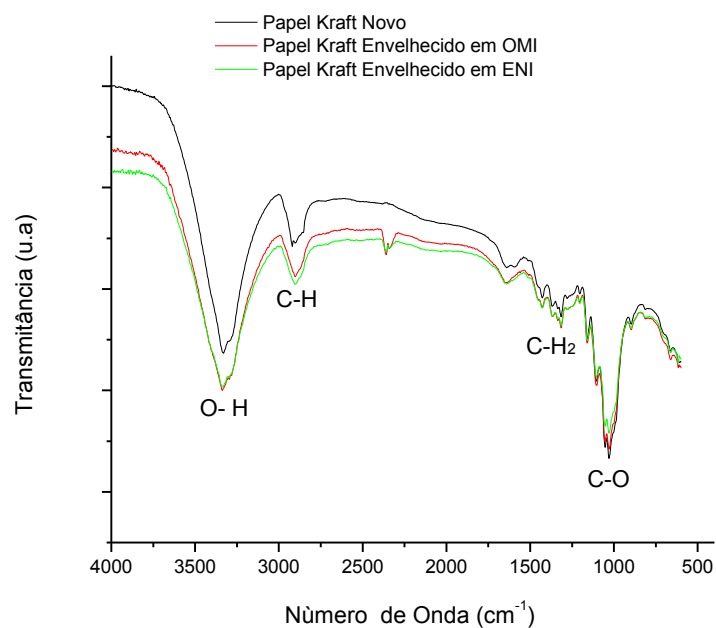


Figura 19. Caracterização por FTIR das amostras de papel kraft novo e envelhecido em ENI e OMI a 120 °C

Os espectros de FTIR do papel nomex novo e envelhecido em OMI e ENI podem ser observados na Figura 20, onde podem ser visualizadas as bandas características da poliamida aromática. Na região de 3300 cm⁻¹ é mostrado o estiramento do grupo N-H; na região de 2900 cm⁻¹ a banda de estiramento e deformação da ligação entre os átomos de carbono e hidrogênio (C-H); e na região de 1660 cm⁻¹ a banda de absorção correspondente ao estiramento do grupo carbonila (C=O), característico de amidas secundárias. Após envelhecimento nos dois tipos de óleo não foram observadas diferenças significativas nos espectros das amostras de nomex.

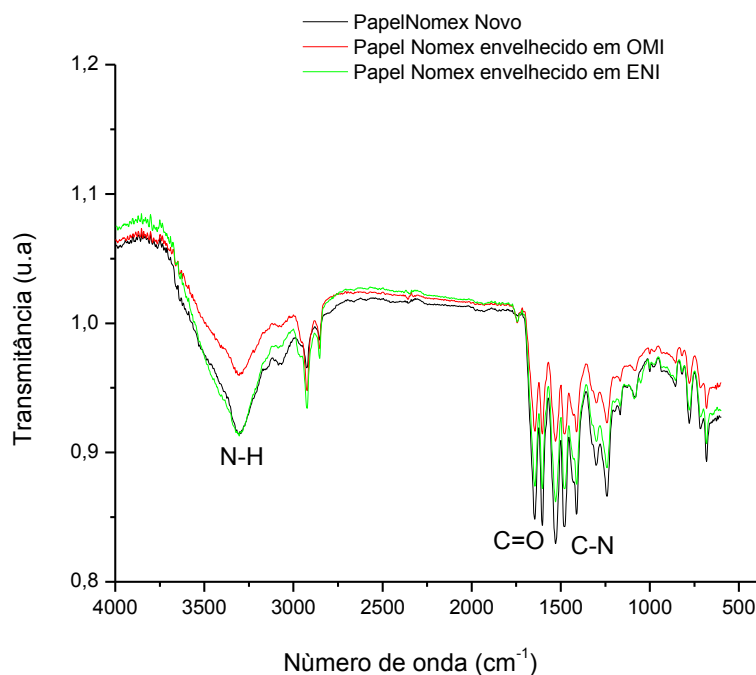


Figura 20. Caracterização por FTIR das amostras de papel nomex novo e envelhecido em ENI e OMI a 120 °C

4.5.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

No caso dos papéis isolantes a exposição a altas temperaturas, em longo prazo, pode levar ao aumento da fragilidade do mesmo, com a quebra das fibras e consequente diminuição da densidade, com o aparecimento de espaços vazios. As micrografias de MEV para os papéis kraft neutro, termoestabilizado e nomex novos podem ser observadas na Figura 21. Pode ser observada uma fase mais compacta e intercalada sem deformações, com fibras transversais de diferentes dimensões para os papéis kraft (A) e termoestabilizado (B). As fibras do papel termoestabilizado (B) estão mais aderidas à matriz em comparação as do papel kraft (A). Já para o papel nomex (C), nota-se uma fase mais compacta, intercalada por fibras com dimensões da mesma ordem de grandeza e dispostas em várias direções, as quais devem contribuir para a alta resistência mecânica do material.

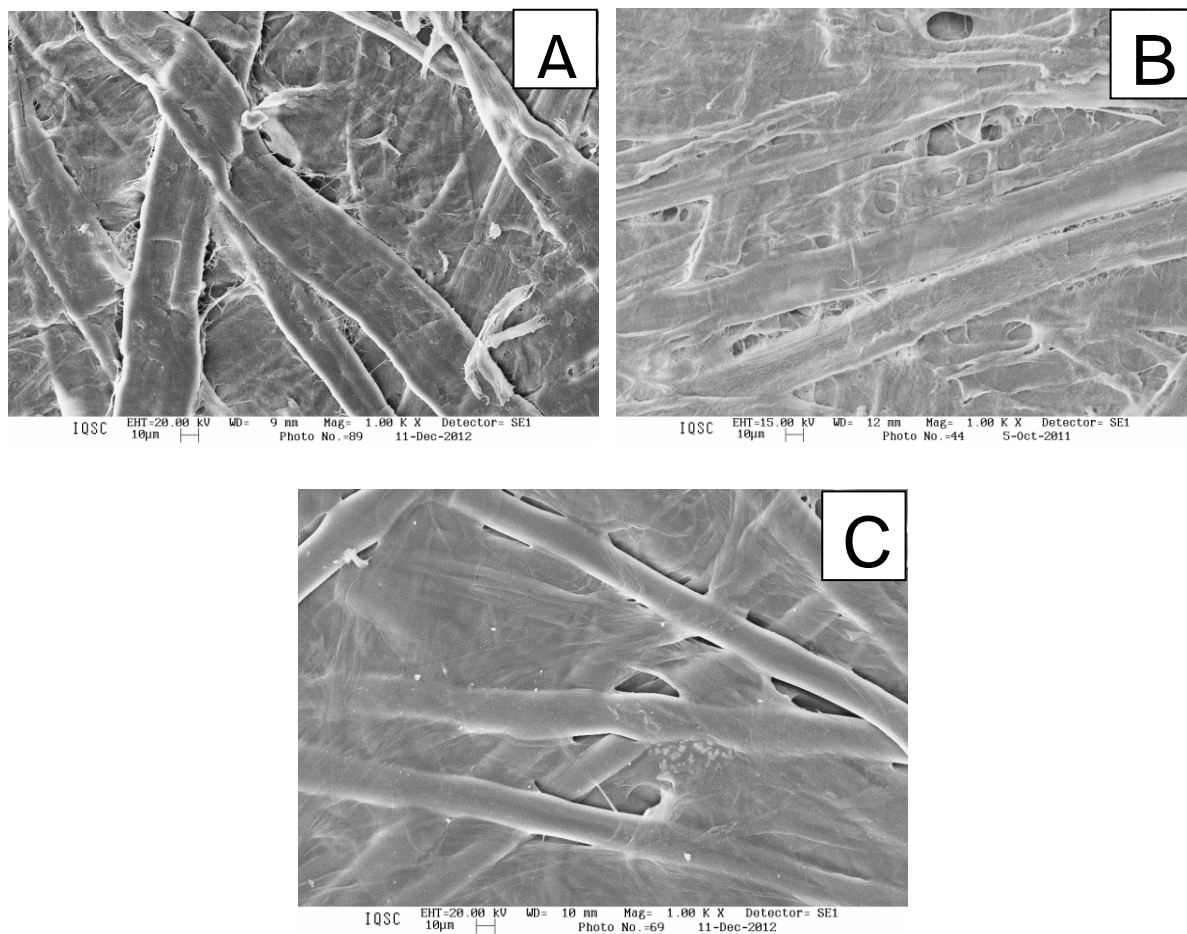


Figura 21. Micrografias por MEV dos papéis: (A) kraft neutro; (B) termoestabilizado; e (C) nomex

Para cada um dos papéis envelhecidos durante 60 dias em ENI e OMI foram obtidas micrografias de uma área geral (Figuras 22 e 23). Comparando as imagens dos papéis kraft neutro e termoestabilizado envelhecidos em ENI e OMI foi possível perceber que o envelhecimento de ambos se deu de forma bem semelhante. Houve o aparecimento de alguns espaços vazios. Para o papel nomex envelhecido tanto em ENI como em OMI não foi possível notar alterações significativas nas fibras e nem o aparecimento de espaços vazios com o tempo de envelhecimento.

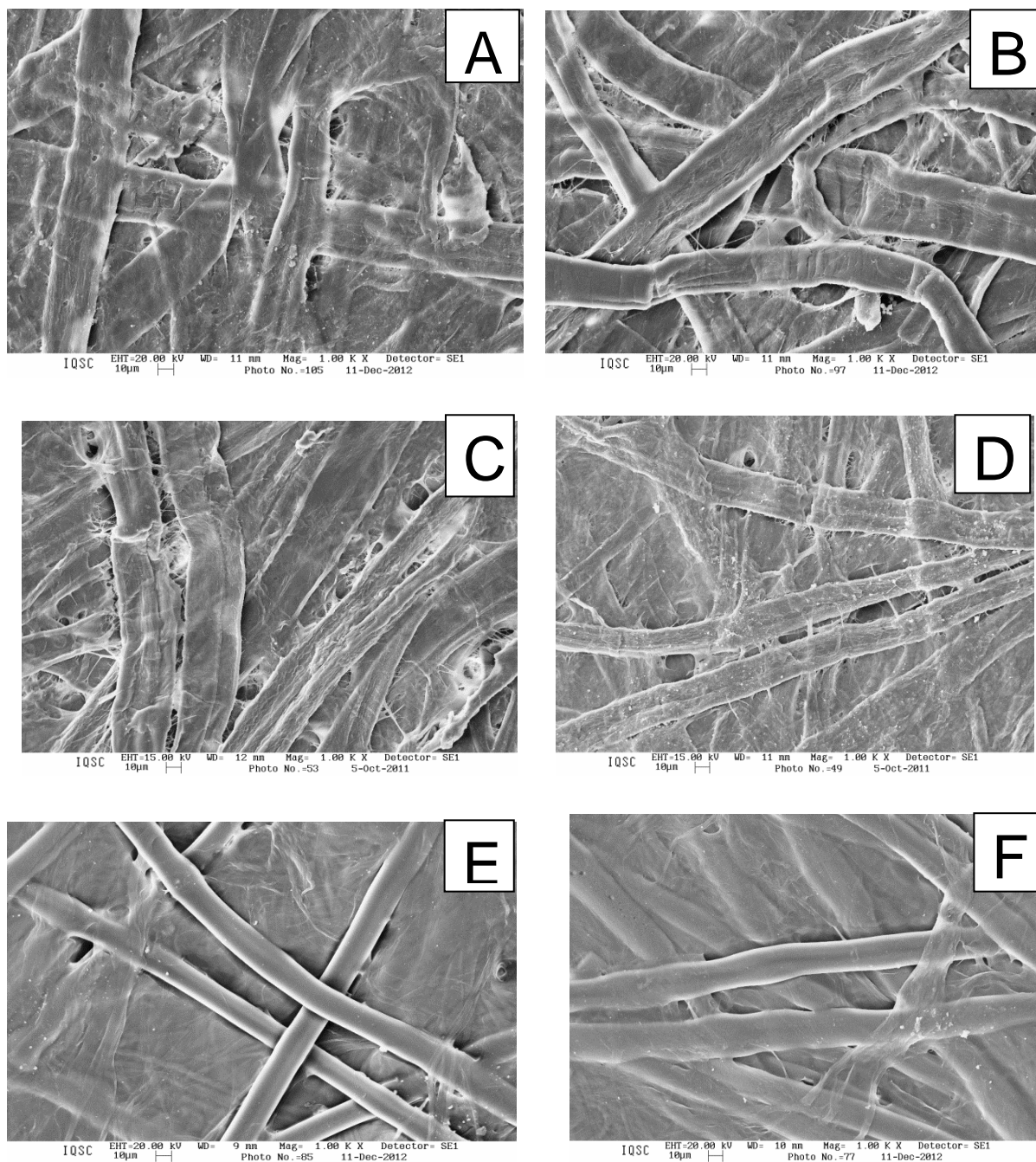


Figura 22. Micrografias por MEV dos papéis envelhecidos a 120 °C: (A) papel kraft envelhecido em ENI; (B) papel kraft envelhecido em OMI; (C) papel termoestabilizado envelhecido em ENI; (D) papel termoestabilizado envelhecido em OMI; (E) papel nomex envelhecido em ENI; (F) papel nomex envelhecido em OMI

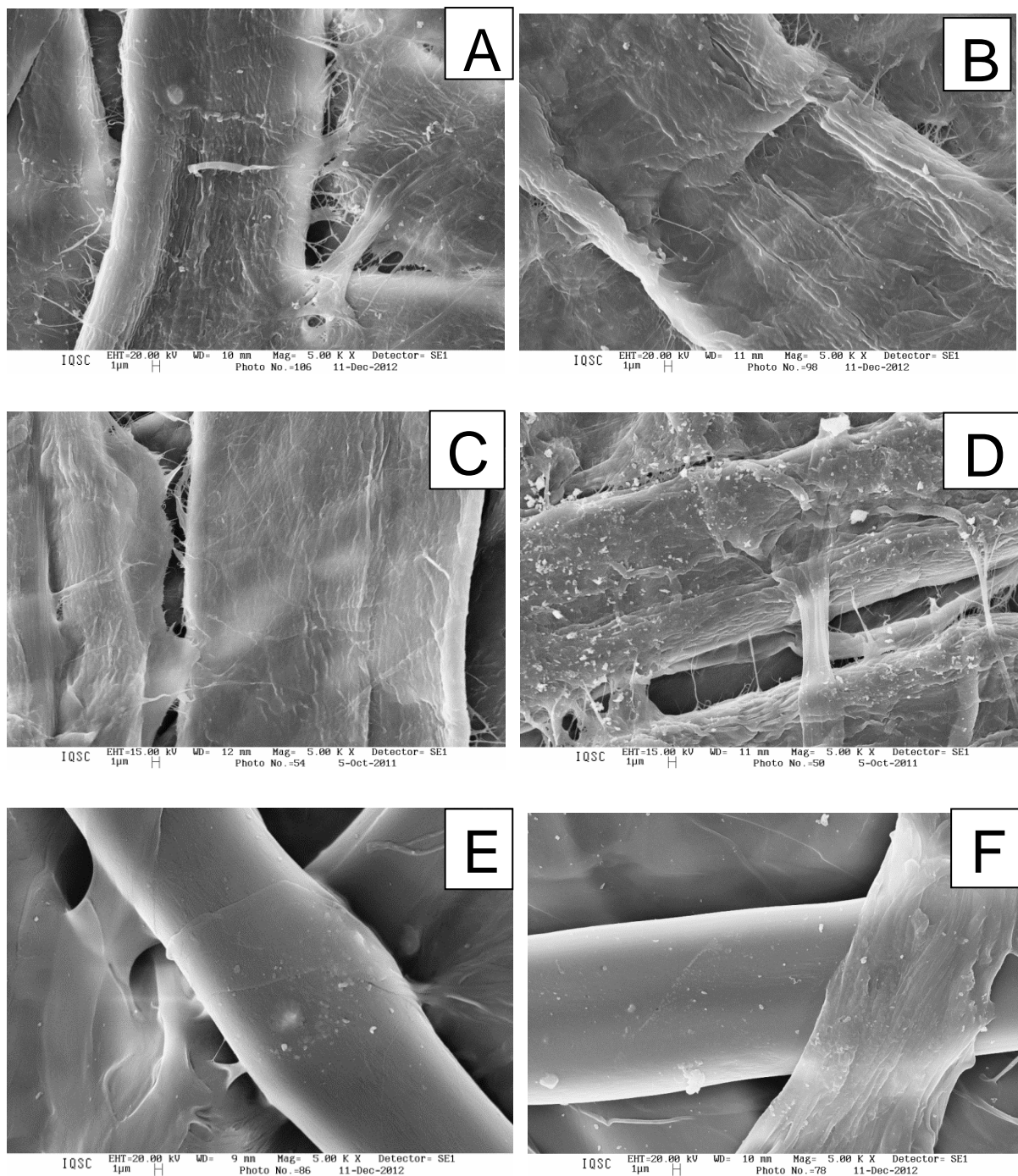


Figura 23. Micrografias por MEV dos papéis envelhecidos a 120 °C: (A) papel kraft envelhecido em ENI; (B) papel kraft envelhecido em OMI; (C) papel termoestabilizado envelhecido em ENI; (D) papel termoestabilizado envelhecido em OMI; (E) papel nomex envelhecido em ENI; (F) papel nomex envelhecido em OMI

4.5.4 Ensaios mecânicos de resistência à tração dos papéis

Com o envelhecimento térmico dos papéis kraft isolantes há um enfraquecimento das fibras do material, conseqüentemente ocorre a perda de massa molar da celulose, possível de ser detectada pelo ensaio de GP (Figura 16). Com isso, o isolamento sólido se torna mais quebradiço e frágil devido às perdas de suas propriedades mecânicas. Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tração dos papéis que foram submetidos aos ensaios de envelhecimento acelerado a 120 °C. As propriedades mecânicas dos papéis nomex e termoestabilizado não foram alteradas após envelhecimento em Biovolt A e OMI. Estes dados estão em conformidade com os apresentados na Figura 16, que mostram pouca variação nos valores de GP dos papéis termoestabilizados envelhecidos em relação ao papel termoestabilizado novo e valores similares para o papel envelhecido em ambos os óleos.

No entanto, no papel kraft neutro foi observado um decréscimo considerável, de aproximadamente 30% na resistência a tração após envelhecimento em ENI e de 45% em OMI. Segundo a literatura, um papel que apresenta GP em torno de 200 e uma redução de 50% na sua resistência a tração está no final da sua vida útil (LIAO, 2011). Neste trabalho foram obtidos resultados semelhantes a esses da literatura. O papel kraft neutro envelhecido em OMI apresentou um GP de ~200 (Figura 16) e uma redução de 45% na resistência a tração (Tabela 8). O papel kraft neutro envelhecido no ENI apresentou uma resistência superior (cerca de 1,2 vezes) e um GP cerca de 2,7 vezes superior em relação ao envelhecido em OMI. Esses dados evidenciam a maior durabilidade de um transformador isolado com ENI e papel kraft neutro em comparação a um equipamento isolado com OMI e papel kraft neutro.

Tabela 8. Resultados de resistência a tração para os papéis novos e envelhecidos

Tipo de papel	Resistência a tração (kN/m) para o papel:		
	Novo	Envelhecido em ENI por 60 dias	Envelhecido em OMI por 60 dias
Papel kraft neutro	17,09 ± 0,78	12,75 ± 1,02	9,88 ± 2,04
Papel kraft termoestabilizado	15,10 ± 0,31	15,01 ± 0,47	15,30 ± 0,11
Papel nomex	24,49 ± 0,42	23,55 ± 0,68	24,03 ± 0,70

4.6 Ensaio de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes com elastômeros nitrílico, viton, viton (OV7) e tealon

Na Figura 24 estão apresentados os resultados do fator de perdas dielétricas do ENI e OMI envelhecidos na presença dos elastômeros em função do tempo de envelhecimento. Nota-se que o fator de perdas dielétricas aumentou muito na presença do elastômero nitrílico envelhecido em ENI (Figura 24 A). Este aumento pode ser devido a algum componente adicionado na formulação deste elastômero que pode estar afetando diretamente o fator de perdas dielétricas desse óleo.

O fator de perdas dielétricas do ENI também foi alterado na presença do elastômero viton. Não houve aumento significativo nesse parâmetro para o OMI envelhecido na presença desse elastômero (Figura 24B).

Também houve um aumento no fator de perdas dielétricas do ENI na presença do elastômero viton OV7 (Figura 24C) porém esse aumento foi em menor proporção em relação aos elastômeros nitrílico (Figura 24A) e viton (Figura 24B). Para o OMI os valores para esse parâmetro físico-químico ficaram constantes até o final dos 60 dias de envelhecimento.

Na Figura 24D é possível observar que houve pouca variação no fator de perdas dielétricas do ENI em função do tempo de envelhecimento na presença do elastômero tealon. Dentre os elastômeros testados neste trabalho, este elastômero foi o que menos afetou a qualidade do ENI considerando como parâmetro de qualidade o fator de perdas dielétricas do óleo.

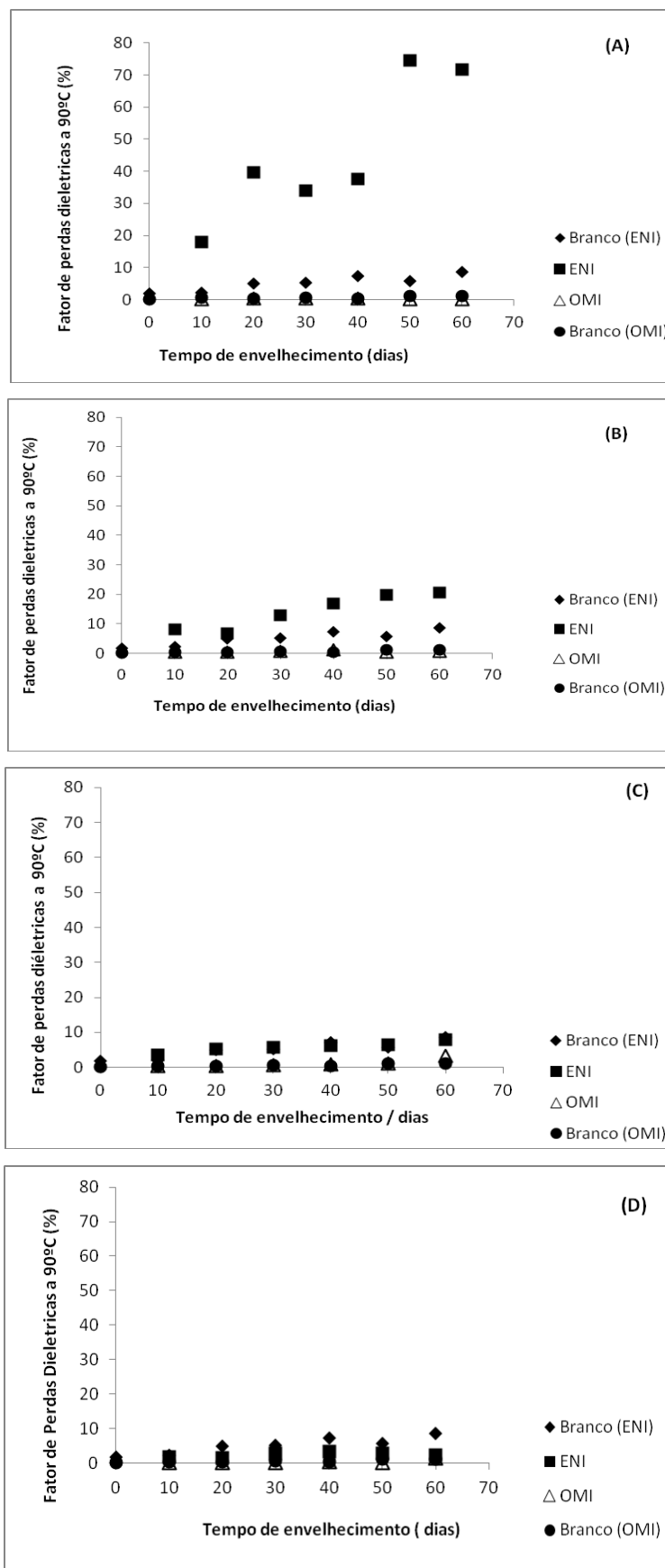


Figura 24. Efeito do tempo de envelhecimento sobre as perdas dielétricas a 90 °C do ENI e OMI na presença dos elastômeros (A) nitrílico, (B) viton, (C) viton (OV7) e (D) tealon

Na Figura 25 estão apresentados os resultados para o ensaio de índice de neutralização dos óleos em função do tempo de envelhecimento. Com o decorrer do tempo de envelhecimento houve um aumento significativo no índice de neutralização do ENI na presença do elastômero nitrílico (Figura 25A). Para o OMI não houve variação significativa, os valores permaneceram constantes durante os 60 dias de envelhecimento. Para os elastômeros viton (Figura 25B) e viton OV7 (Figura 25C), observa-se que houve um aumento no índice de neutralização do ENI após 40 dias de ensaio enquanto que para o OMI não houve aumento durante os 60 dias de envelhecimento. Os índices de neutralização do ENI e OMI não apresentaram alteração na presença do elastômero tealon (Figura 25 D).

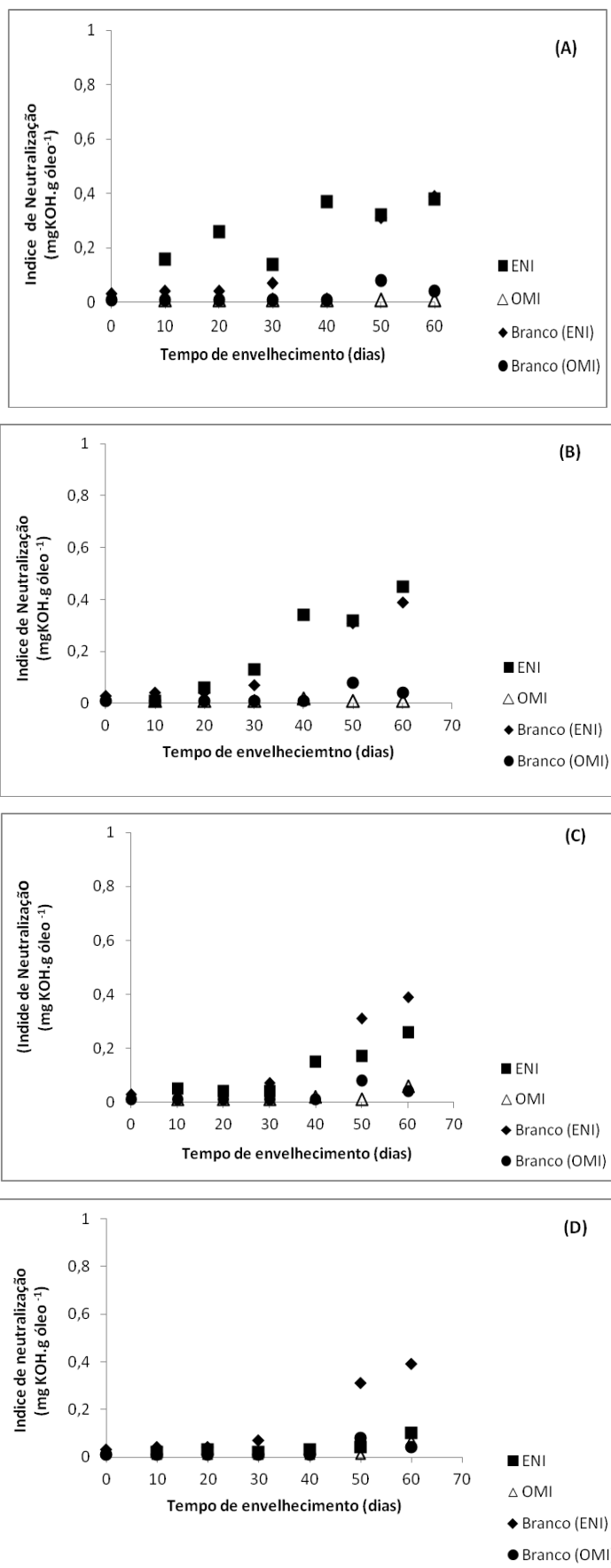


Figura 25. Efeito do tempo de envelhecimento sobre o índice de neutralização do ENI e OMI na presença dos elastômeros (A) nitrílico, (B) viton, (C) viton (OV7) e (D) tealon

Na Figura 26 estão apresentados os resultados de tensão interfacial para o OMI envelhecido na presença dos elastômeros. Não foi possível observar variação significativa ao longo do ensaio de envelhecimento na presença dos elastômeros nitrílico, viton e viton OV7 e tealon quando comparados com o branco (óleo envelhecido na ausência de corpos de prova). Apenas ao final do ensaio de envelhecimento houve diminuição significativa na tensão interfacial do OMI envelhecido na presença do elastômero tealon. A viscosidade de ambos os óleos não foi alterada significativamente ao longo do tempo de envelhecimento para nenhum dos elastômeros testados nesse estudo (dados não apresentados).

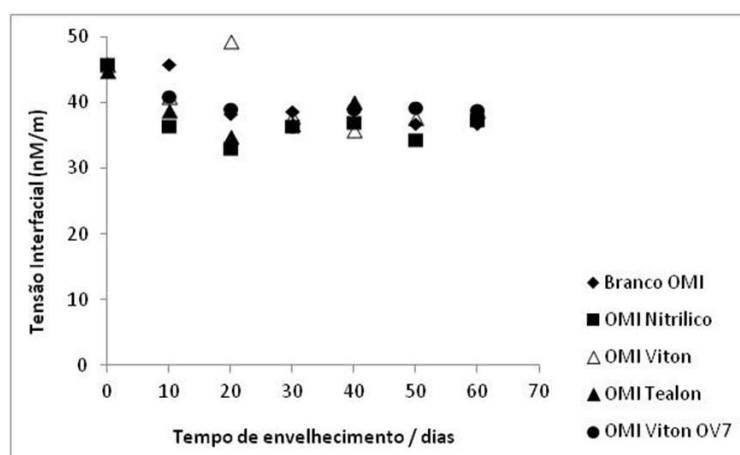


Figura 26. Efeito do tempo de envelhecimento sobre a tensão interfacial do OMI na presença dos elastômeros nitrílico, viton, viton OV7 e tealon

4.7 Análise visual de cor dos elastômeros

Na Figura 27 pode-se observar a coloração do ENI e OMI envelhecidos na presença do elastômero nitrílico. Houve uma alteração nas cores para ambos os óleos em função do tempo de envelhecimento.

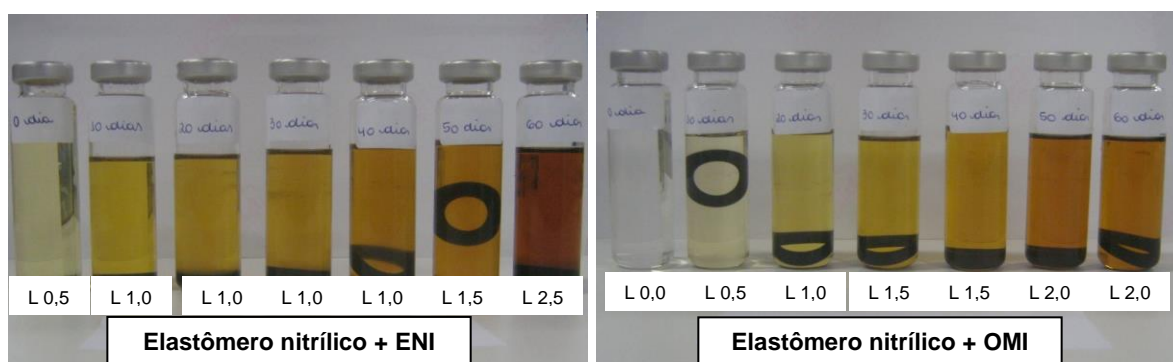


Figura 27. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120 °C com o elastômero nitrílico

Na Figura 28 pode ser observada a coloração dos óleos envelhecidos na presença do elastômero viton. Para o ENI nota-se que não houve alteração na cor ao longo do tempo de envelhecimento, enquanto que para o OMI é possível notar uma cor mais escura após 20 dias de envelhecimento. Resultados semelhantes foram obtidos para os óleos envelhecidos na presença dos elastômeros viton OV7 (Figura 29) e tealon (Figura 30). No caso do tealon o ENI apresentou uma alteração na cor apenas no 60^o dia de envelhecimento.

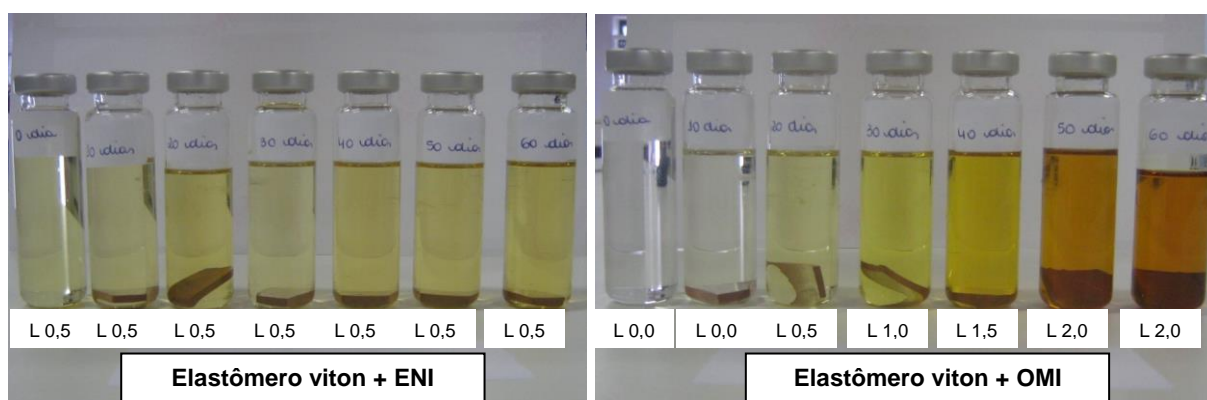


Figura 28. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120°C com o elastômero viton

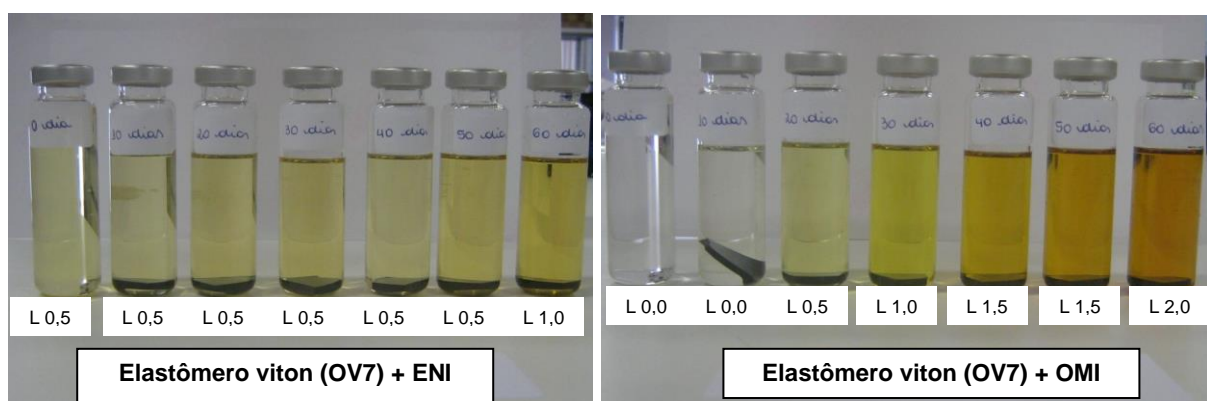


Figura 29. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120 °C com o elastômero viton OV7

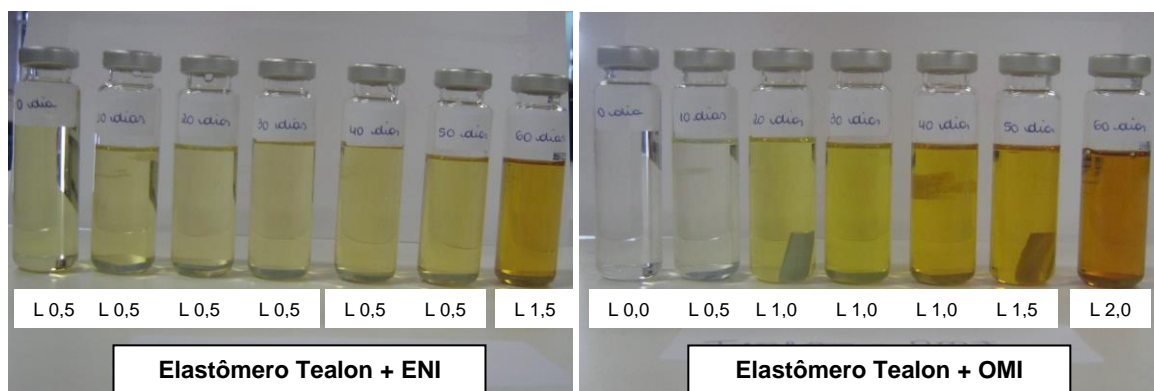


Figura 30. Comparação da cor para o ENI e OMI durante o ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório a 120°C com o elastômero tealon

4.8 Dureza Shore A dos elastômeros antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados obtidos para os elastômeros utilizados neste estudo, os quais atenderam à especificação da norma ASTM 2240 para o ensaio de dureza Shore A. Os elastômeros tealon e viton (OV7) apresentaram valores superiores ao especificado na norma ASTM 2240. Estes elastômeros são mais rígidos e duros em comparação aos outros elastômeros testados neste trabalho.

Os valores obtidos para o ensaio realizado após o envelhecimento acelerado em ENI e OMI estão mostrados na Tabela 10. Dentre os elastômeros testados apenas o nitrílico apresentou uma redução significativa na dureza (cerca de 30%) após envelhecimento em OMI, indicando que este material não é adequado para transformadores isolados com este tipo de fluido. Os elastômeros envelhecidos em ENI não tiveram alteração significativa na dureza Shore A, mostrando que o ENI não afetou a dureza desse material após o ensaio de envelhecimento.

Tabela 9. Resultados de Dureza Shore A para os elastômeros novos

Tipo de elastômero	Valor medido para Dureza Shore A*	Valor limite da norma para Dureza Shore A
Tealon	94 ± 1	65 ± 5
Viton	69 ± 1	
Viton (OV7)	84,0 ± 0,2	
Nitrílico	66 ± 1	

*Os resultados apresentados se referem à média aritmética de 10 leituras na mesma amostra

Tabela 10. Resultados de Dureza Shore A para os elastômeros envelhecidos

Tipo de elastômero	Dureza Shore A para os elastômeros*		
	Novo	Envelhecido em ENI	Envelhecido em OMI
Tealon	94 ± 1	95 ± 1	95,4 ± 1
Viton	69 ± 1	68 ± 2	70,3 ± 1
Viton (OV7)	84 ± 0,2	76,9 ± 0,1	77,6 ± 0,1
Nitrílico	66 ± 1	77 ± 4	44,9 ± 0,4

* Os resultados apresentados se referem à média aritmética de 10 leituras na mesma amostra.

4.9 Ensaio de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes com a tinta bicomponente

Na Figura 31 estão apresentados os resultados do fator de perdas dielétricas do ENI e OMI envelhecidos na presença da tinta bicomponente. Houve um aumento significativo no fator de perdas dielétricas do ENI. Este aumento pode ser devido a algum componente da formulação da tinta que pode estar afetando o fator de perdas dielétricas desse óleo, visto que não existe uma tinta formulada especificamente para ser utilizada na pintura interna de transformadores isolados com ENI. Essa tinta que foi utilizada neste estudo é a mesma tinta utilizada para a pintura interna de transformadores isolados com OMI. Para o OMI não houve alteração nesse parâmetro físico-químico na presença desse material.

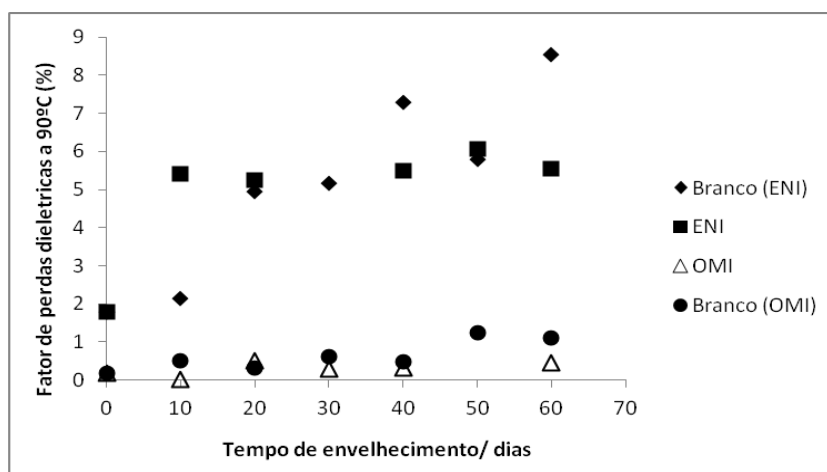


Figura 31. Efeito do tempo de envelhecimento sobre as perdas dielétricas a 90 °C do ENI e OMI na presença da tinta bicomponente

O índice de neutralização apresentou um aumento constante para ambos os óleos com o tempo de envelhecimento (Figura 32).

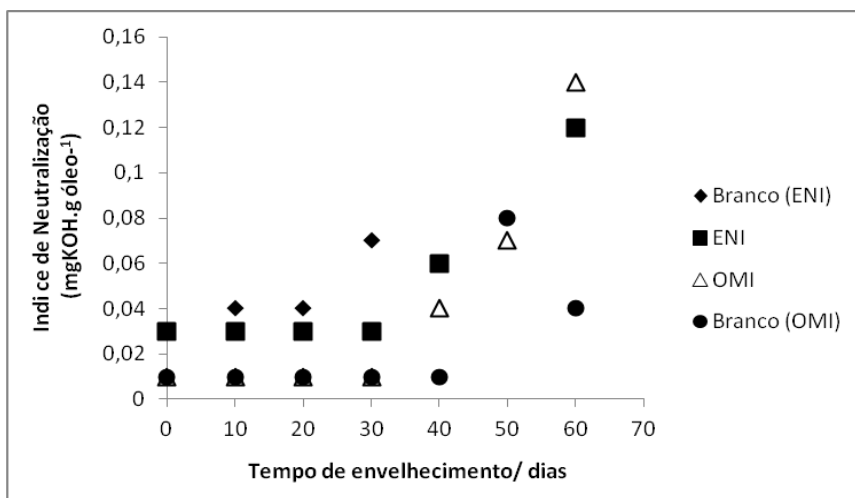


Figura 32. Efeito do tempo de envelhecimento sobre o índice de neutralização do ENI e OMI na presença da tinta bicomponente

A tensão interfacial do OMI diminuiu gradativamente com o aumento do tempo de envelhecimento realizado na presença da tinta bicomponente (Figura 33).

A viscosidade de ambos os óleos não foi alterada durante todo o tempo de envelhecimento na presença da tinta bicomponente (dados não apresentados).

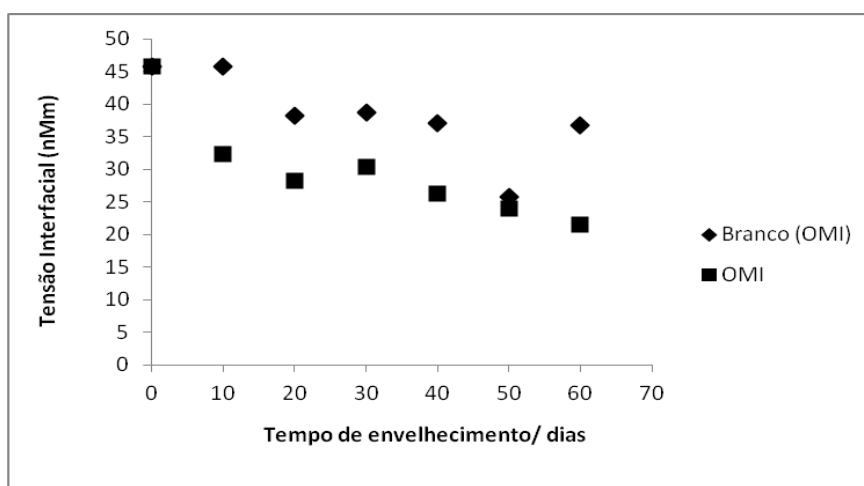


Figura 33. Efeito do tempo de envelhecimento sobre a tensão interfacial do OMI na presença da tinta bicomponente

CAPÍTULO 5

5.0 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- Os elastômeros viton OV7 e tealon apresentaram os melhores desempenhos com o ENI, sendo indicados para uso em equipamentos isolados com esses fluidos.
- O elastômero nitrílico interferiu nas propriedades físico-químicas do Biovolt A, sendo considerado um material inadequado para utilizar em equipamentos isolados com esse tipo de fluido.
- Os elastômero tealon e os fluorossilicones denominados de 5365 e 5362 foram incompatíveis com OMI.
- As propriedades mecânicas dos papéis nomex e kraft termoestabilizado não foram alteradas quando envelhecidos em ENI e OMI, enquanto que as propriedades do papel kraft neutro diminuíram na presença de ambos os óleos.
- A degradação do papel kraft termoestabilizado foi mais lenta e gradual comparativamente ao papel kraft neutro, envelhecidos em ambos óleos.
- É esperada uma maior vida útil de transformadores isolados com ENI e papel kraft neutro em comparação aos isolados com OMI.
- Foi possível diferenciar papel kraft neutro novo do papel kraft termoestabilizado novo pela técnica de FTIR.
- O aditivo do papel kraft termoestabilizado diminuiu ao longo do envelhecimento do papel e contribuiu para o aumento do fator de perdas dielétricas dos fluidos isolantes, ENI e OMI.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Visando a continuidade dos estudos referentes à utilização de ENI em equipamentos elétricos, propõe-se a realização das seguintes pesquisas:

- 1- Avaliação de novos materiais, como elastômeros e tintas, especificamente desenvolvidos para o uso com ENIs.
- 2- Criação de novas metodologias para avaliar a compatibilidade de materiais internos de transformadores isolados com ENI.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 14274-99. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Equipamento elétrico - Determinação da compatibilidade de materiais empregados com óleo mineral isolante.** 1999.

ABNT NBR 15422-06. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. OVIs para equipamentos elétricos – Especificação.** 2006.

ABNT NBR 8148. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Papéis e papelões celulósicos, novos e envelhecidos, para fins elétricos - Medida do grau de polimerização viscosimétrico médio - Método de ensaio.** 2000.

ANP. **AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.** Resolução nº 36, de 5 de dezembro de 2008.

ALI, M.; EMSLEY, A.M.; HERMAN, H; HEYWOOD, R.J. Spectroscopic studies of the ageing of cellulosic paper. *Polymer*, 42, 2893-2900, 2001.

ARANTES, J. G. **Diagnóstico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos e óleo isolante através de redes neurais.**

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá. 2005, 99 p.

BASSETO, A. F, MCNUTT, W, GRIFFIN, P, **Curso tutorial sobre papéis isolantes elétricos de transformadores**, Outubro, 1993, 31p.

BATISTA, D. A. **Desenvolvimento de Metodologia Colorimétrica para Dosagem de Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Federal do Paraná. 2005, 71 p.

CLAIBORNE, C. C.; CHERRY, D. B. - **A status update on the use of natural ester (vegetable oil) dielectric fluids in transformers**. Anais do 74th Doble International Client Conference, Boston, MA, 2006.

CLARK, F. M. **Insulating materials for design and engineering practice**. New York: John Wiley and Sons, 1962, 393 p.

FERNANDES, P. O. **Manutenção Preventiva e Preditiva de Transformadores**. Apostila SDM do Brasil Ltda, ano 2009.

FILHO, F. A, **Avaliação da Formação e Migração do Sulfeto de Cobre em Papel Isolante Utilizado em Equipamentos Elétricos**. Rio de Janeiro, 2008,115p. Dissertação (Mestrado UFRJ/COPPE)- Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

FRANCH, S. V, **Avaliação da Compatibilidade de óleos vegetais isolantes com materiais internos do transformador**, Curitiba, 2010, 128p. Dissertação - Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE- Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Jeong,I, Sik. J, Huh.C, **Accelerated Aging Effects of Mineral and Vegetable Transformer Oils on Medium Voltage Power Transformers**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 1; February 2012

LIPSHTEIN, R. A.; SHAKHNOVICH, M. I. **Transformer oil**. 2. ed. Jerusalem, Israel: 1970. 275p.

LIAO, R.; SHUAIWEI, L*; CAIXIN, S.; LIJUN, Y. E HUIGANG, S. **A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and in mineral oil**. Euro. Trans. Electr. Power 2010; 20:518–533.

LIAO R, Sun C, Yin J, Zhu M “**Influence of Vegetable Oil on the Thermal Aging of Trans-former Paper and its Mechanism**”, IEEE Transactions on Di-electric s and Electrical Insulation Vol. 18, No. 3; pp. 692 – 700, June 2011.

LIAO R, LIANG S, YANG L, HAO J, LI J, **Comparison of ageing results for transformer oil-paper insulation subjected to thermal ageing in mineral oil and ageing in retardant oil**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 1; February 2012.

LUNDGAARD, E, L, HANSEN, W, LINHJELL, D, PAINTER, J. T, **Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers**, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 1, JANUARY 2004, 10p.

McSHANE, C. P. **Vegetable-oil-based dielectric coolants**. IEEE Applications Magazine, June 2002,7 p.

McNUTT, W.J.; PROVOST, R.L.; WHEARTY, R.J. Thermal Life Evaluation of High Temperature Insulation Systems and Hybrid Insulation Systems in Mineral Oil. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 11, No. 3, 1996.

MILASH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1984. 354 p.

MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais**. São Paulo: Varela Editora e Livraria Ltda, 1998. 150 p.

MORAIS, R. M. N. de. **Estudo do envelhecimento térmico do papel isolante elétrico**. Rio de Janeiro, 1990. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PABLO, A.; PAHLAVANPOUR, B. **Furanic Compounds analysis: a tool for predictive maintenance of oil filled electrical equipment**. *Electra*, n. 175, p. 9-31, 1997.

PORTELLA, G, M, **AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE INDICADORES DE OXIDAÇÃO DO PAPEL ISOLANTE TERMOESTABILIZADO EM EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÃO**. Curitiba 2010, 123p, Dissertação - Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE- Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

QUADROS, M. A, **Papel Nomex utilizado em transformadores: avaliação das características e degradação térmica**, Florianópolis, Março de 2006, 59p, Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina.

Rapp, K.J, McShane, C. P, Corkran JL, Gauger GA, Luksich J. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid**. IEEE 14th International Conference on Transmission and Distribution Atlanta, GA 2001; 675–679.

Rapp, K.J, Corkran JL, Gauger, G.A, Luksich J. **Aging of Kraft paper in natural ester dielectric fluid**. IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids Graz 2002; 173–177.

RAAP, K. J, McSHANE, C. P., LUKSICH, J, **Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper**. Anais do 15th International conference on dielectric liquids, Coimbra, Portugal, 2005.

REDA, Y. S, Carneiro, B. P, **Óleos e gorduras aplicações e implicações**, revista Analytica , Fevereiro/Março, 2007 N°27, 8p.

ROLLAND, N. **Explosões e incêndios em transformadores: método de avaliação de custos, benefício financeiro do transformer protector.** Copyright©SERGI. 2004. 9p.

TENBOHLEN. S, KOCH.M **Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers,** IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 2, APRIL 2010

TULIO, L. **Estudo do envelhecimento acelerado de OVI em escala laboratorial.** Curitiba, 2008. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante – PRODETEC) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

TULIO, L, WILHELM, H. M, UHREN, W. – **Produção e uso de OVIs no setor elétrico.** Revista Brasil Engenharia, 2009, p. 120-124

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao OMI.** Curitiba, 2007. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

WILHELM, H. M., GRANATO, R. C.,TULIO, L., STOCCO, G. B., RAVAGLIO M. A., BATISTA, D. A., MATTOSO, M., TRINDADE, E. M., UHREN, W., JÚNIOR, S. B. G., ADONIS, N. G. **Aspectos relacionados com a utilização de OVI no Brasil.** Anais do IV International Workshop on Power Transformer (IV WORKSPOT). Abril 2006, 9p.

WILHELM, H.M, TULIO, L, JASINSKI, R, ALMEIDA, G, **Aging markers for in-service natural ester-based insulating fluids,"** IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 18, N°3, 714-719p. 2011

WILSON, A. C. M. **Insulating liquids: their uses manufacture and properties.** London: Peter Peregrinus Ltd., 1980. 221p.

