



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTM/08
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO –XIII

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

**AValiação de Papéis Isolantes e Elastômeros Após Contato com Éster Natural Isolante
Biovolt A**

**Dieli C. Silva (*)
MGM**

**Helena M. Wilhelm
MGM**

**Claudio A. Galdeano
MGM**

**Milton M. da Silva Junior
MGM**

**Davi M. Borges
AES Eletropaulo**

**Jaqueline. De Lorena
AES Eletropaulo**

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a degradação do éster natural isolante (ENI) tipo Biovolt A na presença e na ausência de diferentes papéis isolantes (papel kraft neutro, kraft termoestabilizado e nomex) e elastômeros (viton, tealon e nitrílico) a partir de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório e avaliar o efeito do óleo nas propriedades desses materiais. Também foi avaliado o óleo mineral isolante (OMI) a título de comparação com o ENI. Os ensaios de envelhecimento acelerado foram realizados em sistema fechado, a 120 °C, por 60 dias, com retirada de amostras da estufa em intervalos regulares de tempo.

PALAVRAS-CHAVE

Ésteres naturais isolantes, envelhecimento acelerado, transformadores, Biovolt A, compatibilidade.

1.0 - INTRODUÇÃO

Para preservar o meio ambiente em decorrência de contaminações oriundas de vazamentos ou até mesmo explosões de tanques de transformadores, por exemplo, foram desenvolvidos óleos isolantes biodegradáveis à base de óleos vegetais, também denominados de ésteres naturais, como potenciais substitutos ao OMI. Além da característica biodegradável e renovável, os ésteres naturais apresentam temperatura de combustão em torno de 350 °C, o que reduz a possibilidade de ocorrência de incêndios durante eventuais falhas no equipamento elétrico, propriedade que lhes confere a característica de fluido de segurança e, são isentos de compostos de enxofre corrosivo (1).

Com o desenvolvimento de novos materiais isolantes, como papéis isolantes mais resistentes à degradação térmica e elastômeros com diferentes composições químicas, é necessário conhecer as interações dos ésteres naturais isolantes com esses novos materiais. O estudo da influência dos diferentes parâmetros que provocam a degradação dos papéis Kraft neutro e termoestabilizado isolantes após contato com óleo mineral e ésteres naturais isolantes têm sido objeto de estudo de vários pesquisadores, com o objetivo de determinar valores limites do estado de envelhecimento do sistema isolante para manutenção preventiva e preditiva dos transformadores.

Existem poucos estudos realizados sobre o efeito dos ésteres naturais isolantes nas propriedades de elastômeros comumente utilizados em transformadores isolados a óleo mineral isolante e, sobre o efeito desses elastômeros e do papel nomex nas propriedades dos ésteres naturais isolantes. Neste sentido o presente trabalho teve por objetivo avaliar a degradação do éster natural isolante tipo Biovolt A na presença e na ausência de diferentes

papéis isolantes (papel kraft neutro, kraft termoestabilizado e nomex) e elastômeros (dois tipos de viton – de dois fornecedores diferentes, tealon e nitrílico), a partir de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório a 120°C por 1440 horas, também avaliou-se o efeito do óleo nas propriedades desses materiais.

2.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizado o éster natural isolante tipo Biovolt A fornecido pela MINERALTEC, o OMI Lubrax Industrial AV60-IN, adquirido da PETROBRAS. Os corpos de prova do papel isolante foram gentilmente cedidos pela WEIDMANN TECNOLOGIA ELÉTRICA LTDA. Os elastômeros foram fornecidos por fabricantes locais. Um dos fabricantes formulou um elastômero exclusivamente para essa pesquisa, visando otimizar seu desempenho frente ao óleo Biovolt A.

2.1 Caracterização dos fluidos isolantes e dos materiais

Para verificar as características dos fluidos isolantes 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, enquanto que o OMI foi caracterizado segundo a Resolução ANP nº 36.

Os papeis utilizados nos ensaios de envelhecimento acelerado foram caracterizados pela determinação do grau de polimerização (GP) de acordo com a norma IEC 60450, espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) (ASTM E1252-98) e ensaios de tração (ABNT NBR ISO 1924-2), antes e após os ensaios de envelhecimento. Os elastômeros foram avaliados por ensaios de dureza Shore A (ASTM D224) antes e após os ensaios de envelhecimento.

2.2 Ensaio de envelhecimento acelerado dos fluidos isolantes na ausência e presença de materiais testados

O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado a 120 °C, por 1440 h, na presença e na ausência dos seguintes materiais: papel kraft neutro, papel kraft termoestabilizado, papel nomex, elastômeros nitrílico, viton, viton (OV7) e tealon. Inicialmente os papeis foram secos em estufa a 100 °C por 24 horas. A proporção utilizada de papel e cobre para 150 mL de óleo foi de 16,35 g e 90,85 cm, respectivamente. Para remover parte do oxigênio presente no líquido, borbulhou-se nitrogênio durante 2 minutos. Após esse borbulhamento foram levados à estufa, programada para temperatura de 120 °C, frascos contendo apenas Biovolt A (branco) e frascos contendo Biovolt A e os papeis isolantes e o cobre metálico.

Amostras foram retiradas da estufa em intervalos regulares de tempo e os óleos analisados por ensaios físico-químicos. Esse mesmo procedimento e condições foram aplicados no ensaio de envelhecimento acelerado dos óleos na presença dos elastômeros, no entanto, neste caso, foi utilizada a mesma relação material/óleo descrita no ensaio de compatibilidade da norma ABNT NBR 14274.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterizações dos fluidos isolantes

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados obtidos para os óleos isolantes utilizados no estudo. As propriedades determinadas para o Biovolt A estão 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 1 - Caracterização físico-química do ENI e OMI novos.

Ensaio	Método (ABNT)	Biovolt A	OMI
Análise visual	VISUAL	Claro e límpido	Claro e límpido
Índice de neutralização, (mg KOH/g óleo)	NBR 14248	0,01	0,01
Teor de água, (ppm,m/m)	NBR 10710/B	190	19
Densidade a 20 °C, (g/ml)	NBR 7148	0,9171	0,8823
Rigidez dielétrica, (kV)	NBR 6869	42	51
Fator de Perdas Dielétricas a 25 °C, (%)	NBR 12133	0,057	0,03
Fator de Perdas Dielétricas a 100 °C, (%)	NBR 12133	0,81	0,15
Viscosidade cinemática a 40 °C, (cSt)	NBR 10441	38,95	10,60
Ponto de combustão, (°C)	NBR 11341	354	154
Ponto de fulgor, (°C)	NBR 11341	324	142

3.2 Ensaio de envelhecimento acelerado

Comparando-se os 03 tipos de papel isolante investigados, as menores variações no fator de perdas dielétricas foram obtidas para o papel nomex (Figura 1C) e as maiores para o papel kraft (Figura 1A) e kraft termoestabilizado (Figura 1B), independente do tipo de óleo isolante utilizado. Os altos valores reportados para o papel kraft termoestabilizado (Figura 1B) indicam que algum componente do papel está sendo extraído pelo óleo. Resultados semelhantes foram obtidos por Wilhelm e colaboradores (3). Na presença do papel kraft neutro o Biovolt A teve comportamento similar ao apresentado na presença do nomex enquanto que o OMI apresentou valores superiores (Figura 1A). De uma forma geral observou-se que o fator de perdas dielétricas para as amostras de OMI envelhecidas com os diferentes papéis apresentou um maior aumento após cerca 35 dias de ensaio. Esse resultado pode ser atribuído ao consumo do aditivo antioxidante do OMI, pois se trata de um óleo inibido, a partir desse intervalo de tempo, deixando o OMI mais susceptível a oxidação.

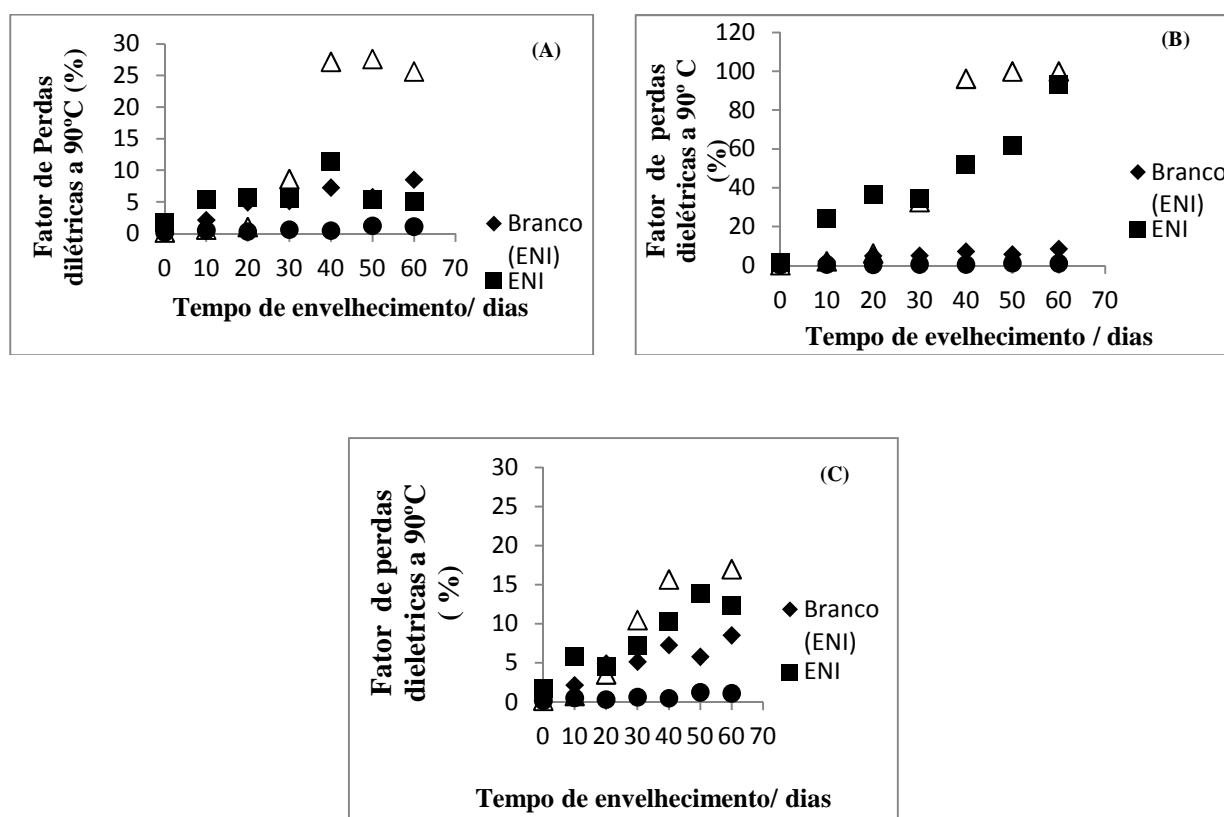


FIGURA 1 - Efeito do tempo de envelhecimento sobre as perdas dielétricas a 90 °C do ENI e OMI na presença dos Papeis (A) kraft neutro, (B) kraft termoestabilizado, (C) nomex.

Na Figura 2 estão ilustrados os resultados para o ensaio de tensão interfacial do OMI com os papéis isolantes. Os menores valores de tensão foram observados para o ensaio de envelhecimento realizado na presença do papel kraft termoestabilizado. Independente do tipo de papel observou-se que a tensão permaneceu constante após 30 dias de ensaio corroborando com os dados de fator de perdas dielétricas a 90 °C (Figura 1), onde foi sugerido o consumo do aditivo antioxidante a partir desse intervalo de tempo.

Para o índice de neutralização (Figura 3), o OMI apresentou valores mais elevados em relação ao ENI, para o

papel kraft neutro (Figura 3A) e kraft termoestabilizado (Figura 3B) principalmente após 30 dias do início do envelhecimento, corroborando com os resultados de fator de perdas dielétricas apresentados na Figura 1. O ENI tende a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que o OMI tende a formar ácidos orgânicos, sendo estes muito mais agressivos em comparação aos formados no ENI. Para o papel nomex (Figura 3C) o aumento do índice de neutralização foi constante com o tempo de envelhecimento. A viscosidade de ambos os óleos não foi alterada significativamente durante o tempo de envelhecimento para nenhum dos papéis isolantes.

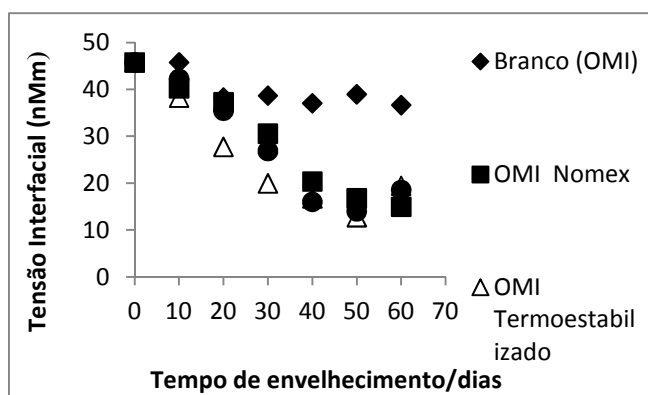


FIGURA 2 - Efeito do tempo de envelhecimento dos papéis nomex, kraft neutro e termoestabilizado sobre tensão interfacial do OMI.

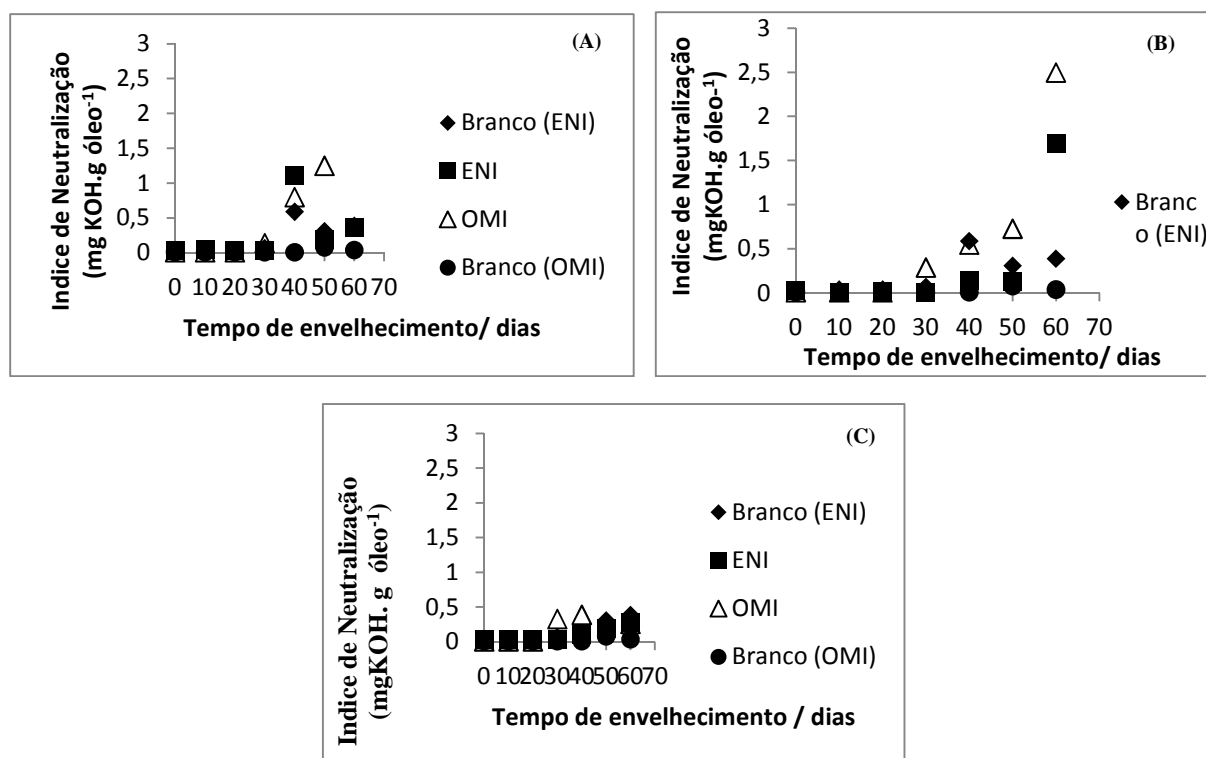


FIGURA 3 - Efeito do tempo de envelhecimento sobre o índice de neutralização do ENI e OMI na presença dos papéis (A) kraft Neutro, (B) kraft termoestabilizado e (C) nomex.

A Figura 4 mostra os resultados do ensaio de GP dos papéis kraft neutro e termoestabilizado submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado a 120 °C. Os resultados de GP comprovaram a maior resistência do papel kraft termoestabilizado em relação ao papel kraft neutro, para ambos os óleos. Observa-se uma menor degradação para o papel kraft neutro envelhecido no Biovolt A em comparação ao OMI, sendo atingido ao final do envelhecimento um GP de ~250 para o OMI e de ~ 500 para o ENI. Já para o papel kraft termoestabilizado não foram observadas diferenças significativas para os dois tipos de óleo, sendo atingido um GP de ~600 ao final do envelhecimento.

As propriedades mecânicas dos papéis nomex e termoestabilizado não foram alteradas após envelhecimento com Biovolt A e OMI (Tabela 2). No entanto, no papel kraft neutro foi observado um decréscimo de aproximadamente

30% na resistência a tração após envelhecimento em ENI e de 45% em OMI, sendo que um papel que apresente um GP de ~ 200 e uma redução de 50% na resistência a tração está no final da sua vida útil. O papel kraft envelhecido em OMI praticamente atingiu esses valores ao final do ensaio de envelhecimento.

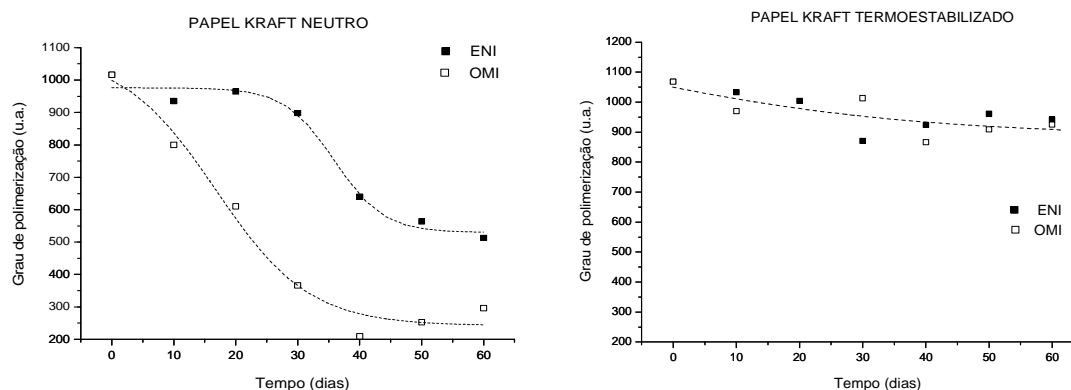


FIGURA 4 - GP para amostras de papel kraft neutro e termoequilibrado envelhecidas em ENI e OMI a 120 °C.

TABELA 2 - Resultados de resistência a tração para os papéis.

Amostra	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 Termoequilibrado	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

Na Figura 5 A pode-se observar a principal diferença entre o papel kraft neutro e termoequilibrado, que está localizada na região de 1500 a 1900 cm^{-1} , região de compostos a base de nitrogênio. Esta banda pode ser atribuída ao aditivo que é adicionado ao papel Kraft termoequilibrado. Ambos os espectros indicaram bandas de absorção características da ligação de hidroxila livre em números de onda na faixa de 3320 – 3335 cm^{-1} e para o grupamento C – OH na faixa de 1025 – 1032 cm^{-1} .

Na Figura 5 B estão apresentados os espectros de FTIR das amostras do papel Kraft Termoequilibrado novo e envelhecido em ENI e OMI. Observa-se o desaparecimento das bandas localizadas nas regiões de 1500 a 1900 cm^{-1} do papel envelhecido em ambos os óleos, evidenciando o consumo do aditivo durante o período de realização do ensaio de envelhecimento.

Na Figura 5 C estão apresentados os espectros das amostras do papel kraft novo e envelhecido em OMI e ENI, nenhuma alteração foi observada em comparação ao papel novo para os principais grupos funcionais constituintes da celulose. Nas regiões de 3500 e 3080 cm^{-1} onde foi identificado o estiramento de ligação de hidrogênio do grupamento O-H; e na região entre 1350 e 1260 cm^{-1} identificou-se uma deformação intensa do mesmo grupo. Nenhuma nova banda pode ser identificada neste papel após o ensaio de envelhecimento para ambos os óleos.

Na Figura 5 D estão apresentados os espectros do papel Nomex novo e envelhecido em OMI e ENI, 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.

Na Figura 6 estão apresentados os resultados do fator de perdas dielétricas do ENI e OMI na presença dos elastômeros, em função do tempo de envelhecimento. Nota-se que o fator de perdas dielétricas a 90 °C aumentou muito na presença do elastômero nitrílico envelhecido no OVI (Figura 6A). Este aumento pode ser devido a algum componente adicionado na formulação deste elastômero que pode estar afetando diretamente o fator de perdas dielétricas do ENI. Os resultados obtidos indicam que esse material não é indicado para aplicação em transformadores isolados com esse fluido. O fator de perdas dielétricas do ENI também foi alterado na presença do elastômero viton (Figura 6B), porém em menor proporção em relação ao elastômero nitrílico. Para o OMI os valores ficaram constantes até o final dos 60 dias de envelhecimento. Na Figura 6C, observa-se 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 apresentou melhor desempenho com o ENI.

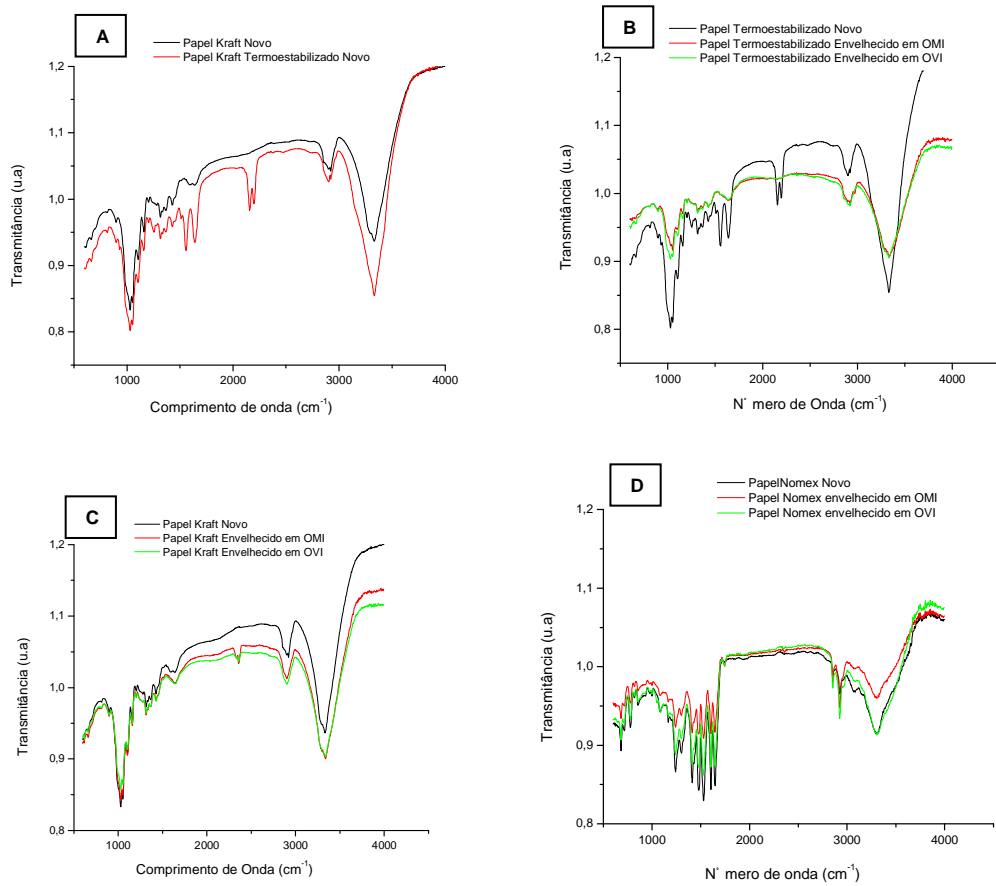


FIGURA 5 - Caracterização por FTIR das amostras de papel kraft neutro e kraft termoestabilizado novos (A), do papel kraft termoestabilizado novo e envelhecido em ENI e OMI (B), papel kraft neutro novo e envelhecido em OMI e ENI (C), papel nomex novo e envelhecido em OMI e ENI (D).

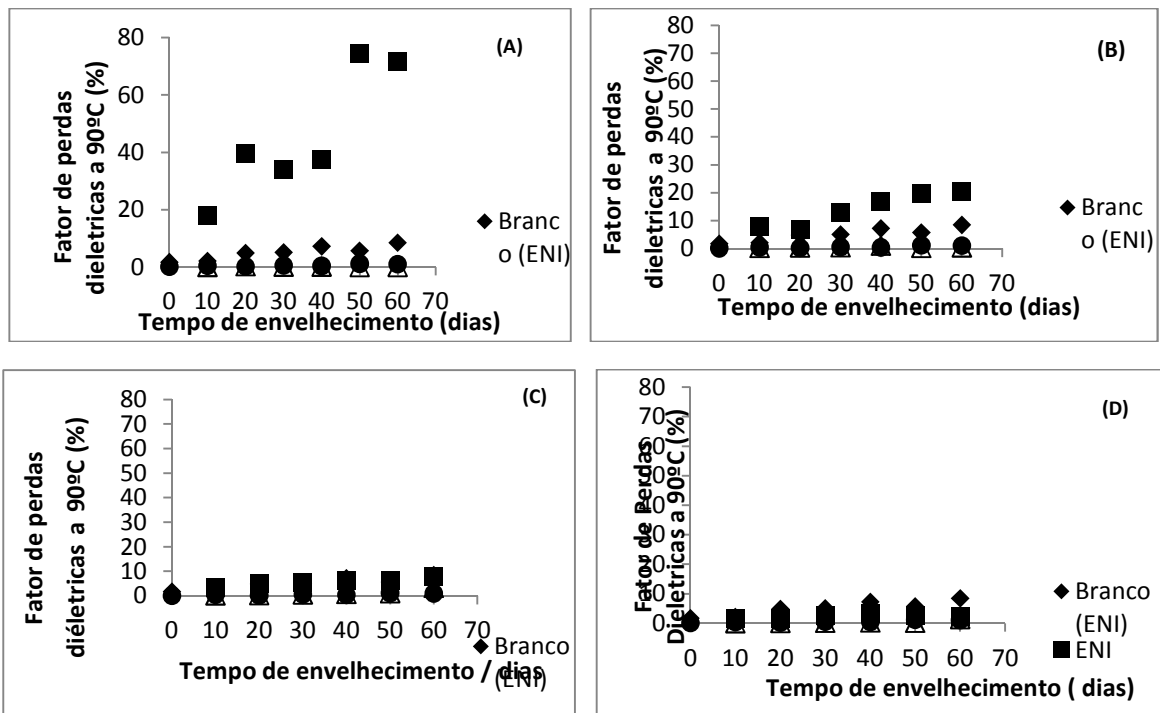


FIGURA 6 - Efeito do tempo de envelhecimento sobre as perdas dielétricas a 90 °C do ENI e OMI na presença dos elastômeros (A) nitrílico, (B) Viton, (C) Viton (OV7) e (D) Tealon.

Na Figura 7 estão apresentados os resultados para o ensaio de índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento. Houve um aumento significativo no índice de neutralização do ENI na presença do elastômero Nitrílico (Figura 7 A) com decorrer do tempo de envelhecimento. Para o OMI não houve variação significativa os valores permaneceram constante durante os 60 dias de envelhecimento. Para os elastômeros Viton (Figura 7 B), e viton (OV7) (Figura 7 C) observa-se que houve um aumento no índice de neutralização do ENI após 40 dias de ensaio, para o OMI não houve aumento durante os 60 dias de envelhecimento. O índice de neutralização do ENI e OMI não tiveram alteração na presença do elastômero tealon (Figura 7 D).

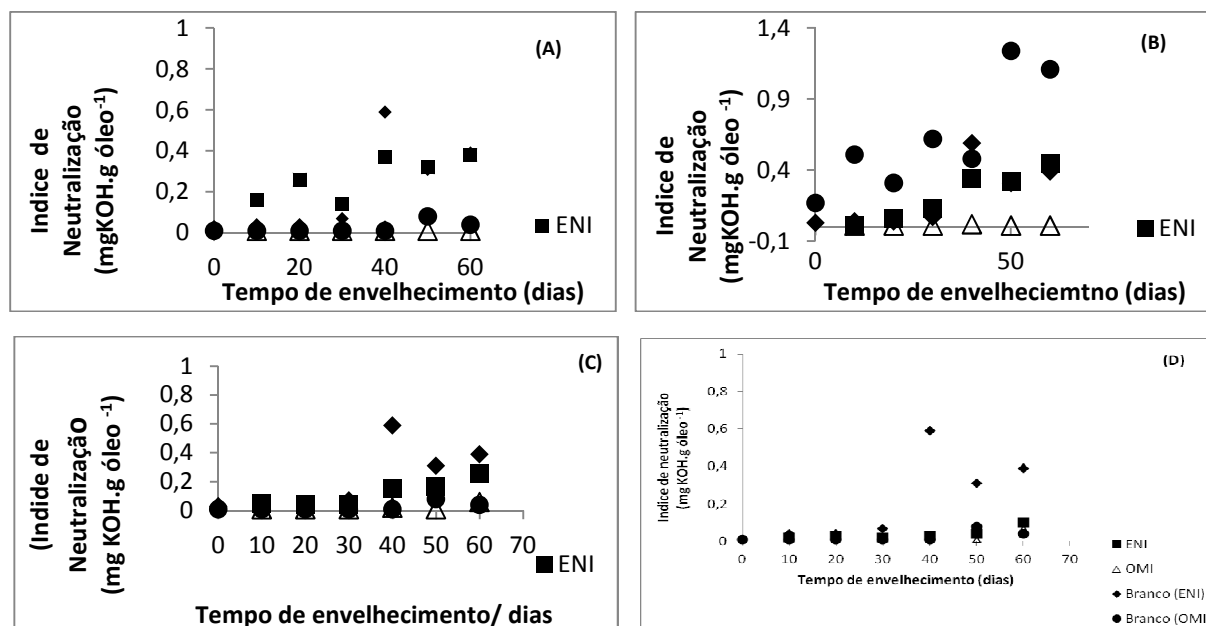


FIGURA 7 - Efeito do tempo de envelhecimento sobre o índice de neutralização do ENI e OMI na presença dos elastômeros (A) nitrílico, (B) Viton, (C) Viton (OV7) e (D) Tealon.

Na Figura 8 não foi possível observar variação significativa na tensão interfacial do OMI ao longo do ensaio de envelhecimento acelerado na presença do elastômero nitrílico, viton e viton (OV7) quando comparados com a amostra branco. Houve uma diminuição na tensão interfacial do OMI ao longo do ensaio de envelhecimento acelerado na presença do elastômero tealon, indicando que esse material não é indicado para esse tipo de fluido.

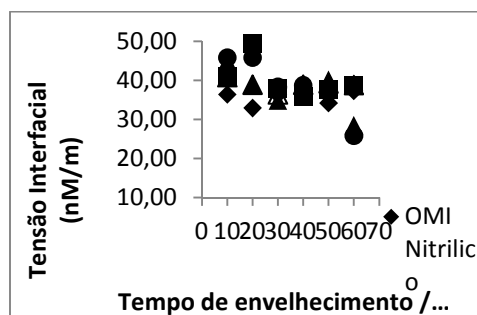


FIGURA 8 - Efeito do tempo de envelhecimento sobre a tensão interfacial do OMI na presença dos elastômeros nitrílico, Viton, Tealon e Viton OV7.

A viscosidade de ambos os óleos não foi alterada significativamente, durante o tempo de envelhecimento para nenhum dos elastômeros testados. Na Tabela 3 estão apresentados os resultados dos ensaios de identificação e de dureza shore A, antes e após os ensaios de envelhecimento. Dentre os elastômeros testados, apenas o nitrílico apresentou uma redução significativa na dureza (cerca de 30%) após envelhecimento em OMI, indicando que este material testado não é adequado para transformadores isolados com este tipo de fluido.

TABELA 3 - Resultados de Dureza shore A para os elastômeros.

Amostra 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

4.0

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que:

- O fator de perdas dielétricas do ENI é um dos parâmetros que deve ser monitorado em ENI em uso, pois foi o que apresentou as maiores variações nos ensaios de envelhecimento, principalmente na presença dos elastômeros nitrílico e viton.
- O elastômero tealon não interferiu nas propriedades físico-químicas do Biovolt A, sendo por isso considerado um material adequado para equipamentos elétricos isolados com esse fluido.
- É possível diferenciar papel kraft neutro de termoestabilizado pela técnica de FTIR.
- O papel kraft neutro envelhecido em ENI, a 120 °C, apresentou diminuição mais lenta e gradual no GP em comparação ao OMI.
- Não houve alteração nas propriedades mecânicas dos papéis nomex e kraft termoestabilizados envelhecidos em ENI e OMI enquanto que as propriedades dos papéis kraft neutro diminuíram na presença dos dois tipos de óleo.
- Observou-se o consumo do aditivo no papel kraft termoestabilizado ao final dos ensaios de envelhecimento acelerado.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BIOVOLT, em: http://www.biovolt.com.br/conteudo/artigos_cientificos/IV20Workspot%20international%20Power%20Transformers%20%Trabalho%20tecnico%20%20HELENA%20WILHELM.pdf, acessado em 08/04/13.
- (2) IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. C57.147™. Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers, 2008, 31p.
- (3) H. M. Wilhelm, L. Tulio, R. Jasinski G. Almeida, **Aging Markers for In-service Natural Ester-based Insulating Fluids**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18, No. 3; June 2011.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANEEL pela aprovação do projeto de P&D, a AES ELETROPAULO pelo apoio financeiro e a MGM e DIAGNO pela infraestrutura disponibilizada. Agradecem também ao CNPq pela bolsa de produtividade em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora – DT concedida para a pesquisadora Helena Maria Wilhelm, ao departamento de química da UFPR pelas análises pelas análises de FTIR, a RETESP pela formulação do elastômero VITON OV7 e a WEIDMANN pelo fornecimento dos papéis isolantes.

6.0 DADOS BIOGRÁFICOS

Helena Maria Wilhelm é graduada em Química pela UFPR, Mestre pela UFSC, Doutora pela UNICAMP. Atua como Pesquisadora e coordenadora de projetos de P&D nas áreas de química, materiais e meio ambiente com ênfase em fluidos isolantes e biodiesel. É bolsista de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora do CNPq desde 2006, e professora de pós-graduação dos programas PRODETEC e PIPE.

Dieli Carolina da Silva é graduada em Biotecnologia pra TUIUTI-PR, mestranda da UFPR em Engenharia de Materiais.

Claudio Galdeano possui graduação em Engenharia Química pela Faculdade Oswaldo Cruz, especialização em Legislação Ambiental pela USP, especialização em Manutenção pelo Núcleo de Treinamento Tecnológico. Atua na área de fluidos isolantes, meio ambiente e materiais.

Milton Marques da Silva Júnior é graduado em Química pela UNICAMP, Mestre pela UNICAMP. Tem larga experiência na área de Química, em óleos isolantes e emissão de diagnósticos de análises de materiais isolantes (óleos e papéis) para aplicações em equipamentos elétricos. Atua na área de fluidos isolantes, meio ambiente e materiais.

Davi Marques Borges é químico, trabalha no laboratório químico da AES ELETROPAULO e como gerente de projetos de P&D ANEEL.

Jaqueline de Lorena é química, trabalha no laboratório químico da AES ELETROPAULO.