



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

FI/GTM/14
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - XIII

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

**ENVELHECIMENTO ACELERADO COMPARATIVO DOS PAPÉIS KRAFT TERMOESTABILIZADO E NOMEX®
910 EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE**

Lisiane L. da Silva*	Helena M. Wilhelm	Neffe A. Gomez	Leandro G. Feitosa	Paulo O. Fernandes	Maurício Mattoso	Adriana P. Martins	Célia R. C. Franco	Vera L. P. dos Santos
DIAGNO			CEMIG			UFPR		Uninter

RESUMO

O objetivo foi avaliar os efeitos do envelhecimento acelerado de um papel kraft termoestabilizado e Nomex® 910 em óleo mineral isolante (OMI). Para isso corpos de prova desses isolantes sólidos foram inseridos em células de envelhecimento acelerado e submetidas à temperatura (170 °C) e vácuo por 10, 20, 30 e 45 dias, em OMI. Análise de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada nos papéis novos. Os resultados das análises do grau de polimerização (GP), infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), nitrogênio total, raio-x e termogravimetria (TGA) obtidos após envelhecimento dos papéis isolantes foram comparados com resultados dos produtos novos.

PALAVRAS-CHAVE

Degradação; envelhecimento acelerado; isolante sólido; Nomex® 910; papel kraft termoestabilizado

1.0 - INTRODUÇÃO

A degradação térmica dos papéis isolantes de um transformador elétrico ocorre mesmo quando sob temperaturas normais de operação. Entretanto, esse processo é acelerado quando alterações do funcionamento normal provocam a ocorrência de sobreaquecimento de pontos específicos, ou mesmo, de todo transformador (1). Nesse contexto, transformadores que operam em sobrecarga e, conseqüentemente maior temperatura, apresentam maior índice de falhas/defeitos. Apesar disso, a Resolução ANEEL 53 de 2009 (2) obriga as unidades transformadoras a trabalhar com carregamento não inferior a 120%, por um período de 4 horas, ou 140% por um período de 30 minutos. Com isso, é de extrema importância a utilização de isolantes sólidos que apresentam boa qualidade para que a vida útil da isolamento sólida atenda a sobre carga de trabalho necessária.

Atualmente, o papel isolante mais utilizado é o papel kraft neutro. Porém quando são esperadas altas temperaturas de operação é utilizado o papel kraft termoestabilizado (classe térmica: 120 °C, com elevação da temperatura média dos enrolamentos de 65 °C). O papel kraft pode ser "termoestabilizado" por meio de reações de cianoetilação ou de acetilação da celulose; ou pela adição de agentes estabilizantes como uréia, melanina, dicianoamida ao papel kraft neutro (3). Tais papéis, tanto o kraft neutro quanto o termoestabilizado, são compostos por uma base celulósica. Por outro lado, uma outra alternativa aos papéis a base de celulose são aqueles que possuem em sua composição o polímero aramida, os quais são comercialmente denominados de Nomex®. Atualmente os isolantes sólidos tipo Nomex®. Existem também os papéis compósitos, que são formulados por Nomex® e celulose, que apresentam várias nomenclaturas comerciais relacionadas à quantidade de celulose e aramida contida no compósito. Entre eles o Nomex® 910 que é constituído por 3 camadas, formadas por celulose e o polímero aramida. O centro do material é 100% constituído por celulose enquanto que as duas camadas externas são constituídas por uma blenda de celulose/aramida. Segundo o fabricante, as propriedades físicas e elétricas deste novo papel isolante são semelhantes às dos papéis existentes, mas com propriedades térmicas aprimoradas em relação ao papel kraft termoestabilizado, permitindo a prorrogação da vida útil do transformador sob condições térmicas convencionais. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos do envelhecimento acelerado de um papel kraft termoestabilizado e do Nomex® 910 em óleo mineral isolante (OMI).

2.0 - MATERIAL E MÉTODO

2.1 Materiais

Amostras de Nomex® 910 utilizadas no presente trabalho foram fornecidas pela Dupont® e o papel kraft termoestabilizado foi adquirido na Isoletri®. As amostras de papel foram envelhecidas em OMI Petrobras AV – 60 IN, caracterizado de acordo com a Resolução ANP nº 36 (4).

Os ensaios de envelhecimento, foram realizados em células de envelhecimento confeccionadas em alumínio (FIGURA 1). Essas células possuem válvulas de enchimento e de alívio de pressão. Foram utilizadas ao todo 8 células de envelhecimento: 4 para os ensaios com papel termoestabilizado e 4 para Nomex® 910. O cobre foi utilizado na forma de fios flexíveis esmaltados (3 mm).

2.2 Caracterização dos Papéis Novos

Para realização dos ensaios de caracterização, as amostras dos papéis, Nomex® 910 e kraft termoestabilizado novos, foram utilizadas tal qual entregues pelos fornecedores e coletadas em tiras de 1,5 cm de largura (FIGURA 2). Nas amostras novas foi realizada a determinação da espessura, do teor de água (5), do nitrogênio total (método Kjeldahl) (6), além dos ensaios de espectroscopia na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) (7), difração de raio X, termogravimetria (8) e microscopia de eletrônica de varredura (MEV).



FIGURA 1. Célula de envelhecimento acelerado confeccionada em alumínio equipada com manômetro para controle da pressão e válvula de engate rápido para conexão à bomba de vácuo e aos cilindros de gás.

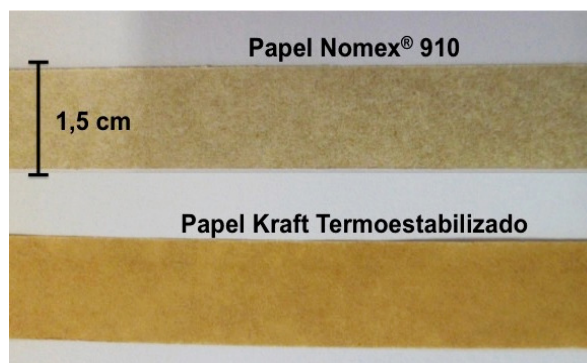


FIGURA 2. Papéis isolantes novos (Nomex® 910 e kraft termoestabilizado), cortados em tiras de 1,5 cm, utilizados nos ensaios de envelhecimento acelerado.

O ensaio de GP foi realizado de acordo com a metodologia descrita na norma ABNT NBR IEC 60450 (9), com inserção de uma etapa de filtração, não prevista no procedimento experimental da norma. Para realização do ensaio utilizou-se um viscosímetro capilar imerso em um banho de água termostaticado a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e solução de etilenodiamina cúprica (concentração de etilenodiamina = 1 mol/L, concentração de cobre = 1 mol/L) como solvente. Foram pesadas 0,0250 g de papel em um erlenmeyer com posterior adição de 20 mL de água, borbulhou-se gás nitrogênio por 2 minutos e, em seguida, foram adicionados 20 mL da solução de etilenodiamina cúprica, com agitação constante por 16 horas. Após as 16 horas, as amostras digeridas em etilenodiamina cúprica e água destilada foram filtradas antes da análise no viscosímetro capilar, com auxílio de um sistema de filtração a vácuo e filtro de fibra de vidro (Machery-Nagel® 85/90) pré-pesado, gerando um resíduo e um filtrado. O filtro, contendo o resíduo, foi seco em estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 1,5 horas, retirado da estufa, posto em dessecador para resfriamento à temperatura ambiente e após, pesado. O teor de resíduo retido no filtro foi mensurado por meio da diferença entre o peso final do filtro seco (1,5 horas em estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$) e o peso inicial do filtro (antes da filtração). O filtrado foi inserido no viscosímetro capilar, que foi colocado em um banho viscosimétrico onde a amostra foi deixada por 20 minutos antes da realização das medidas para que sua temperatura se equilibrasse com a temperatura do banho. Após o tempo requerido, elevou-se o nível da solução acima da marca superior do viscosímetro e mediu-se o tempo de escoamento da amostra. Esse mesmo procedimento foi realizado para uma amostra "branco", que contém todos os reagentes menos a amostra sob investigação (papel isolante). A partir dessas medidas foi calculado o GP, conforme as equações descritas na norma.

2.3 Ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório

O ensaio de envelhecimento acelerado dos papéis isolantes em OMI foi conduzido de acordo com a metodologia descrita na IEEE C57.100 (10), com algumas alterações que estão descritas na conclusão. O guia da IEEE define razões de materiais isolantes sólido/líquido para sistemas de distribuição e de potência. Nesse estudo foi utilizada a relação para transformadores de distribuição, a saber relação de óleo/papel de 8,8/1,0 (g) e cobre metálico (6,4 cm^3). Para isso, foram cortadas, manualmente, tiras de 1,5 cm de largura dos dois tipos de papel (FIGURA 2). O peso total de papel utilizado em cada uma das células de envelhecimento está descrito na Tabela 1, juntamente com o peso de óleo utilizado. Esse peso corresponde ao papel acondicionado no laboratório (papel úmido), sem

qualquer tratamento de secagem. Os fios flexíveis de cobre utilizado nos ensaios foram preparados por meio da remoção do esmalte superficial que o recobria seguido de lavagem com hexano.

Os corpos de prova dos papéis isolantes foram acondicionados nas células de envelhecimento (FIGURA 3 – (a)) juntamente com o cobre metálico. Na sequência foi aplicado vácuo nas células por um período de 30 minutos. As células evacuadas foram dispostas na estufa a 170 °C por 24 h. Após esse intervalo de tempo as células foram retiradas da estufa, o vácuo foi desfeito com gás argônio (5.0 analítico - White Martins®) e as células foram mantidas em repouso em temperatura ambiente (~ 20 °C) até completo resfriamento.

TABELA 1. Peso individual do papel e peso individual do OMI adicionado nas células para realização do ensaio de envelhecimento acelerado.

Célula	Tipo de Papel	Peso do papel (g)	Peso do óleo (g)
1	Nomex® 910	17,47	153,70
2	Kraft termoestabilizado	19,83	174,53
3	Nomex® 910	17,33	152,57
4	Kraft termoestabilizado	19,71	173,51
5	Nomex® 910	17,46	153,71
6	Kraft termoestabilizado	19,73	173,62
7	Nomex® 910	16,92	148,93
8	Kraft termoestabilizado	20,24	178,14

Após a secagem do papel (teor de umidade do Nomex® 910 = $0,31 \pm 0,07\%$ e do kraft termoestabilizado = $0,43 \pm 0,07\%$), as células de envelhecimento resfriadas foram abertas, individualmente, e rapidamente foi adicionado o OMI. A adição do OMI ocorreu em um intervalo de tempo inferior a 30 segundos. Esse procedimento foi aplicado a cada uma das demais células de envelhecimento resfriadas. Após adição de OMI às células de envelhecimento acelerado, contendo amostras de papel + OMI, foi borbulhado gás nitrogênio no óleo por 2 minutos, com o objetivo de expulsar parcialmente o oxigênio dissolvido. Na sequência as células foram fechadas, inserido gás argônio na válvula de preenchimento até a pressão atingir, aproximadamente, 58 Psi e, imediatamente dispostas na estufa pré-aquecida a 170 °C. Após 10, 20, 30 e 45 dias de envelhecimento foram retiradas da estufa duas células: uma contendo Nomex® 910 e outra, papel termoestabilizado (FIGURA 3 – (b) e (c)).

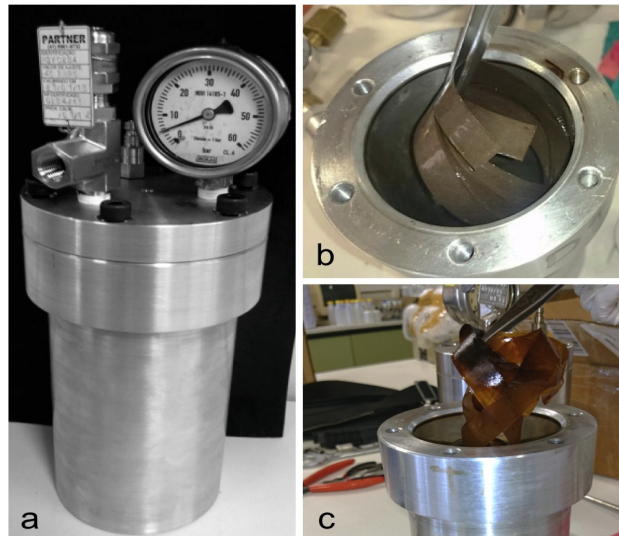


FIGURA 3. Células de envelhecimento acelerado retiradas da estufa (170 °C) após envelhecimento. a) Células em alumínio resfriando em temperatura ambiente, b) célula contendo corpos de prova do Nomex® 910 envelhecido em OMI e b) célula contendo papel kraft termoestabilizado envelhecido em OMI.

Para efeito de registro, deve-se notar que os procedimentos no documento IEEE C57.100-2011 não foram rigorosamente seguidos nesse estudo, com as seguintes modificações / desvios:

- As células de teste utilizadas foram confeccionadas em alumínio em vez de aço inoxidável ou de vidro.
- Nenhum núcleo de aço ou cartão prensado de baixa densidade foram incluídos nas células.
- As células foram pressurizadas com gás argônio a 58 Psi, em vez de simular um sistema de preservação de óleo do transformador típico.

Uma vez resfriadas em temperatura ambiente, as células retiradas da estufa (0, 20, 30 e 45 dias de envelhecimento) foram abertas e o papel isolante separado do OMI. Corpos de prova dos papéis envelhecidos foram desimpregnados em um sistema Soxhlet, por um período de 4 horas, utilizando hexano como solvente. Os corpos de prova desimpregnados foram retirados do Soxhlet e secos em um dessecador, a temperatura ambiente,

protegidos da luz. Após a desimpregnação foram realizados os seguintes ensaios para a determinação da espessura, espectroscopia na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), resistência à tração, difração de raio-X, termogravimetria, e determinação do nitrogênio total (vide descrição dos ensaios no item 2.2). Assim como para a caracterização do papel novo, o ensaio para a determinação do GP foi realizada somente nas amostras de papel kraft termoestabilizado.

Os dados obtidos foram tabulados em planilhas do software Excel[®]. Após a tabulação, os gráficos de FTIR, TGA e raio X foram gerados com auxílio do software Origin[®] e os gráficos de GP e nitrogênio total foram gerados no software GraphPad Prism[®]. Os resultados de GP foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk's para verificação da tendência de distribuição através da curva de normalidade. Os resultados de nitrogênio total dos diferentes papéis não foram comparados estatisticamente entre si. Para a análise dos resultados de caracterização e os obtidos após envelhecimento dos papéis, foi utilizado o teste de análise de variância (One-Way ANOVA) seguido do teste de comparação de médias de Tukey ou teste de Kruskal-Wallis, para os dados paramétricos e não-paramétricos, respectivamente (11).

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parâmetros Avaliados nos Isolantes Sólidos Novos

A caracterização morfológica dos papéis estudados foi realizada somente em amostras dos produtos novos. A análise ultraestrutural do Nomex[®] 910 (FIGURA 4) e do papel termoestabilizado (FIGURA 5) evidencia o padrão de organização das fibras que o constituem. Observa-se que o papel kraft termoestabilizado apresenta uma malha composta de fibras regulares, sendo constituído por fibras de semelhantes diâmetros que se inter cruzam. Por outro lado, o Nomex[®] 910 apresenta fibras desordenadas com poucas fibras individualizadas e cruzadas entre si, dando a impressão de estarem colapsadas. O papel apresenta ainda várias regiões eletro-densas. Quando comparado com o papel kraft termoestabilizado, observa-se que o Nomex[®] 910 apresenta aspecto diferenciado, porém, com semelhança no depósito de material particulado.

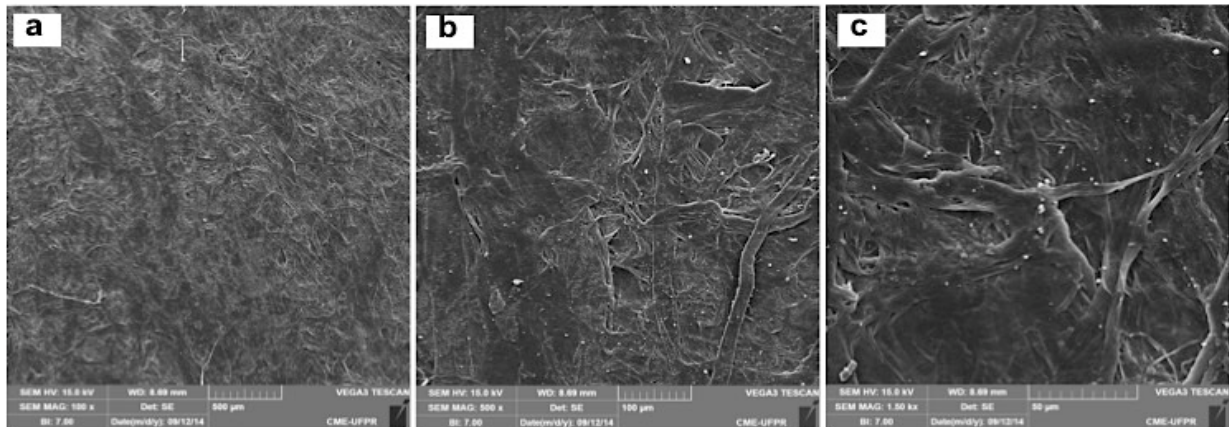


FIGURA 4. Análise ultraestrutural em MEV do Nomex[®] 910, analisado no microscópio eletrônico de varredura Tescan. Imagem a) aumento de 100x, b) 500x e c) 1500x.

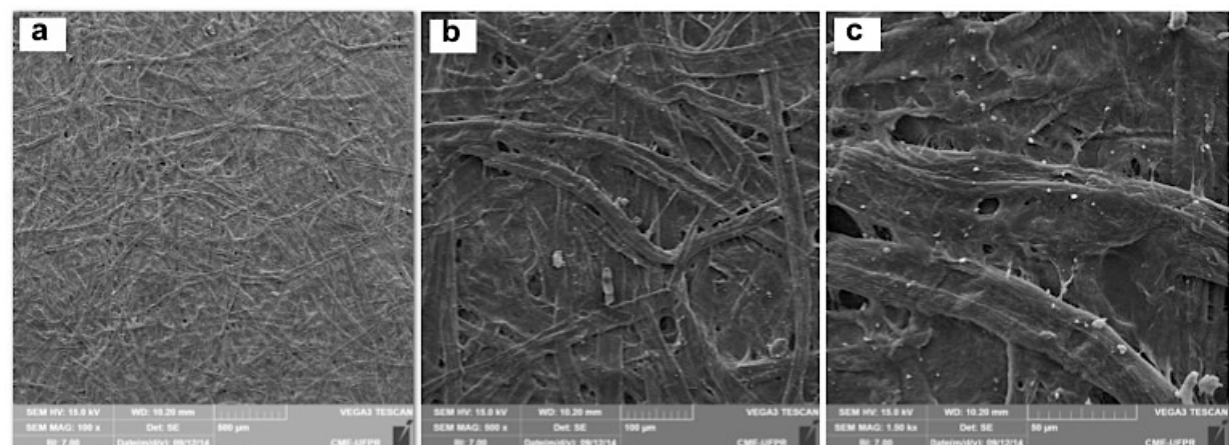


FIGURA 5. Análise ultraestrutural em MEV do papel kraft termoestabilizado, analisado no microscópio eletrônico de varredura Tescan. Imagem a) aumento de 100x, b) 500x e c) 1500x

Apesar da clara diferença ultraestrutural observada entre os dois tipos de papéis novos, não houve diferença significativa ($p > 0,05$) nos resultados de resistência à tração (FIGURA 6) das amostras novas. Por outro lado, o alongamento observado no papel Nomex[®] 910 foi pouco menor ($p < 0,05$) que o do kraft termoestabilizado

(FIGURA 7). Isso indica que, mesmo apresentando composição distintas, os papéis testados apresentaram resistências físicas muito similares. The mechanical results from the aged papers is not yet complete and the analysis continues. Os resultados mecânicos dos papeis envelhecidos ainda não foram finalizados e as análises continuam em andamento.

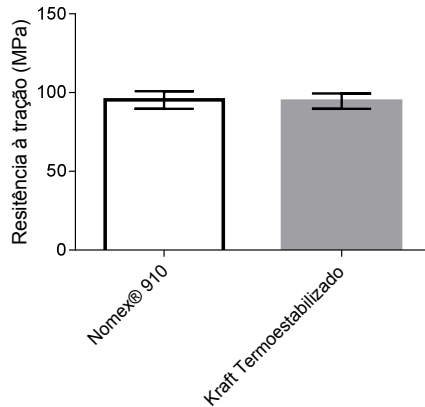


FIGURA 6. Resistência à tração (média \pm desvio padrão) dos papéis isolante Nomex® 910 e kraft termoestabilizado novos, comparadas pelo teste *t* de Student.

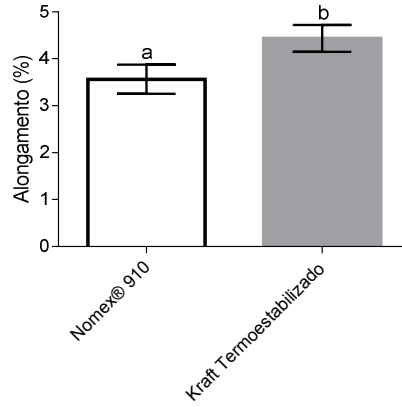


FIGURA 7. Alongamento (média \pm desvio padrão) dos papéis isolante Nomex® 910 e kraft termoestabilizado novos. Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) entre os papéis pelo teste *t* de Student.

3.2 Parâmetros Avaliados nos Isolantes Novos e Envelhecidos

A mensuração da espessura dos corpos de prova dos papéis Nomex® 910 e kraft termoestabilizado envelhecidos em OMI (FIGURA 8), demonstrou que houve variação para o papel Nomex® 910 envelhecido em comparação ao papel novo ($p < 0,05$). A pequena variação observada para o papel kraft termoestabilizado, por outro lado, não apresentou diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$).

O aspecto visual das amostras de Nomex® 910 e kraft termoestabilizado novos e após envelhecimento acelerado pode ser visualizado na Figura 9. Nota-se que, para ambos os papéis, houve aumento do escurecimento da matriz em virtude do envelhecimento, sendo o escurecimento mais evidente para o papel kraft termoestabilizado.

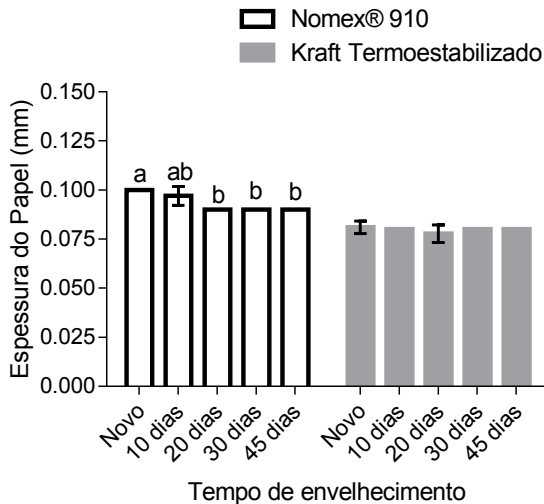


FIGURA 8. Valores de espessura (média \pm desvio padrão) dos papéis isolante Nomex® 910 e kraft termoestabilizado envelhecidos em OMI. Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) entre diferentes tempos de envelhecimento pelo teste *Kruskal-Wallis*.

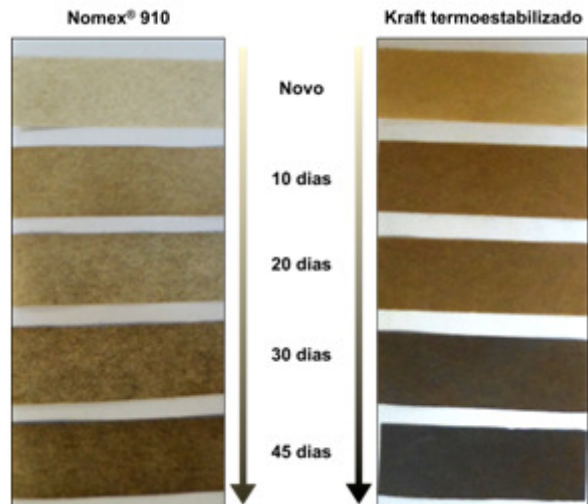


FIGURA 9. Aspecto visual das amostras de papel Nomex® 910 e kraft termoestabilizado novos e envelhecidos em OMI, à 170 °C, por diferentes períodos de tempo.

Considerando que mais da metade do papel Nomex® 910 não solubilizou na solução de etilenodiamina cúprica (FIGURA 10), o GP foi calculado apenas para o papel kraft termoestabilizado. Os resultados do grau de GP das amostras de papel kraft termoestabilizado, nova e envelhecidas, podem ser observados na Figura 11. Os valores de GP variaram de acordo com o tempo de envelhecimento, principalmente em relação ao papel novo e o envelhecido por 10 dias onde houve redução de 61,5%. Em 30 e 40 dias de envelhecimento o GP do papel kraft termoestabilizado atingido foi em torno de 200, indicando que o papel atingiu o final de sua vida útil (12).



FIGURA 10. Acúmulo de partículas dos papéis isolante não digeridas pela solução de etilenodiamina cúprica e água. Aspecto do a) filtro de fibra de vidro novo, b) após filtragem da solução de digestão da amostra de papel kraft termoestabilizado novo e c) após filtragem da solução de digestão de papel Nomex® 910 novo.

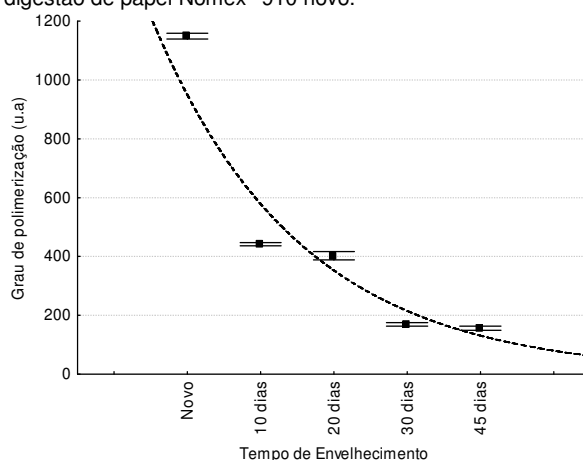


FIGURA 11. Grau de polimerização (média \pm desvio padrão) de amostras de papel kraft termoestabilizado envelhecidas em OMI por diferentes períodos de tempo à 170 °C.

As maiores diferenças entre os espectros de FTIR dos dois tipos de papel encontram-se nas bandas da região de 1600 e 1050 cm^{-1} (FIGURA 12 – (a) e (b)). As principais bandas observadas nos espectros do papel kraft termoestabilizado correspondem ao grupamento OH na região de $\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$, bandas de estiramento da ligação C – H na região $\sim 2900 \text{ cm}^{-1}$ e a banda correspondente a ligação éter na região ~ 1150 a 1085 cm^{-1} , sendo essas as principais bandas de absorção da molécula de celulose (13). Na região de 3300 cm^{-1} é mostrado no espectro do Nomex® 910 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. Essas bandas são semelhantes às identificadas na análise do Nomex® (14). O papel termoestabilizado também apresentou bandas na região de absorção de compostos à base de nitrogênio (2200 e 1600 cm^{-1}), porém em menor intensidade comparativamente ao Nomex® 910.

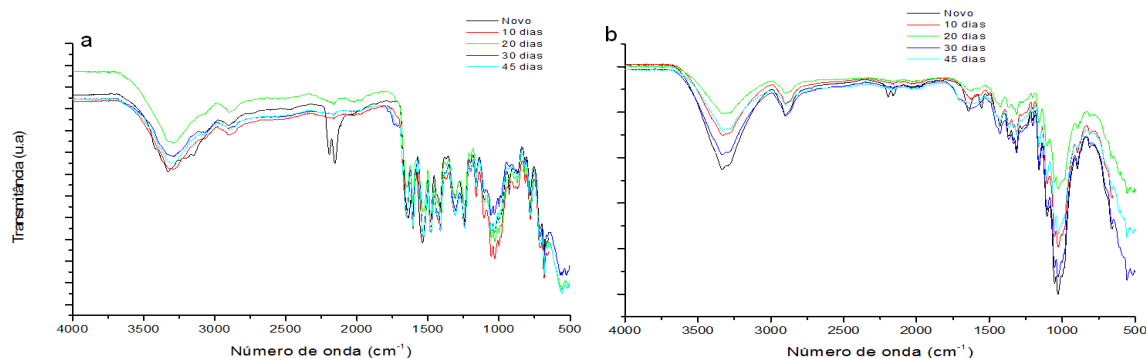


FIGURA 12. Espectros de FTIR dos papéis Nomex® 910 (a) e kraft termoestabilizado (b) novos e envelhecidos em OMI.

As bandas identificadas na região de 2200 e 1600 cm^{-1} no papel kraft termoestabilizado novo podem ser atribuídas ao aditivo incorporado a esse papel para lhe conferir maior estabilidade térmica, como por exemplo, aditivos químicos estabilizantes como uréia, melamina, dicianodiamida e poliacrilamida (15). Nos papéis termoestabilizados envelhecidos, a banda em 2194 cm^{-1} desapareceu permanecendo apenas a de 2160 cm^{-1} , em menor intensidade. Já as duas bandas em 1640 cm^{-1} e a de 1555 cm^{-1} , presentes no papel kraft termoestabilizado novo, diminuíram de intensidade mas continuam nitidamente presentes no papel envelhecido por 10 e 20 dias, enquanto que no papel envelhecido por 30 e 45 dias observa-se a existência de uma banda larga, que não permite distinguir essas duas bandas (1640 cm^{-1} e a de 1555 cm^{-1}), mas que pode ser atribuída a outros grupos à base de nitrogênio, formados entre o aditivo termoestabilizado e os compostos de degradação do óleo isolante, por exemplo.

Por outro lado, as concentrações de nitrogênio mensuradas não apresentaram grandes variações entre os papéis novos e os envelhecidos em óleo mineral. As concentrações de nitrogênio total para o Nomex® 910 e papel kraft termoestabilizado podem ser observadas na Figura 13. Houve uma diminuição de 5,1 e 7,6% no teor de nitrogênio total dos papéis envelhecidos, Nomex® 910 e kraft termoestabilizado, respectivamente, comparativamente aos novos.

Os resultados da análise termogravimétrica (TGA) dos papéis kraft termoestabilizado e Nomex® 910 envelhecidos, demonstram que houve uma perda de massa na faixa de temperatura ambiente a 120 °C , correspondente a perda de umidade. Além disso, para ambos os papéis, a temperatura de início da decomposição apresentou variação aceitável, inferior a 10 °C , ficando na faixa de $323 - 332\text{ °C}$. Apesar das diferenças observadas na segunda perda de massa, pode-se afirmar que ambos os papéis apresentaram desempenho térmico similar (FIGURA 14). Não houve alterações significativas nos termogramas dos papéis envelhecidos comparativamente aos novos.

Os resultados de raio-X das amostras envelhecidas demonstraram, da mesma forma que as amostras novas, o mesmo padrão de difração para o Nomex® 910 e para o kraft termoestabilizado, não sendo detectadas diferenças nas frações amorfas e cristalinas (dados não mostrados). Estes resultados similares foram esperados uma vez que uma percentagem substancial do Nomex® 910 é composta de celulose.

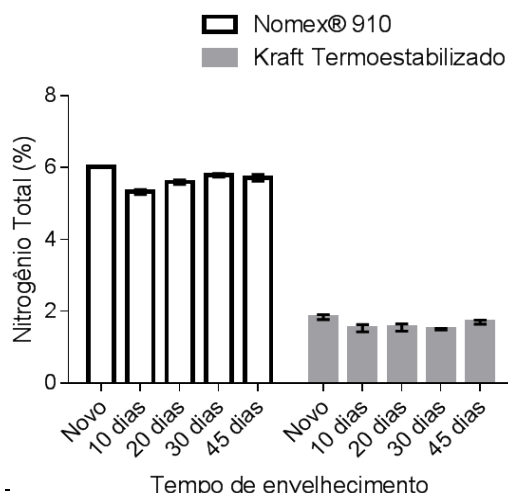


FIGURA 13. Valores de nitrogênio total (média \pm desvio padrão) dos papéis isolante Nomex® 910 e kraft termoestabilizado envelhecidos em OMI.

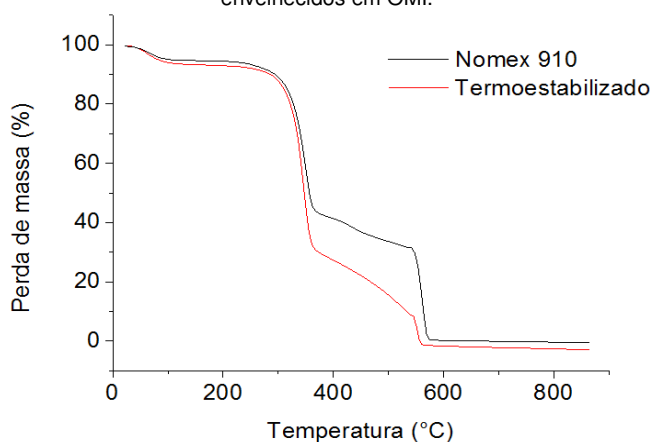


FIGURA 14. Curvas termogravimétricas dos papéis isolantes novos.

4.0 - CONCLUSÕES

Foram detectadas diferenças entre as amostras de Nomex® 910 e kraft termoestabilizado, novas, quanto às características morfológicas ultraestruturais, porém não foram observadas diferenças nas propriedades mecânicas desses papéis.

Não é possível aplicar na íntegra a metodologia da norma ABNT NBR IEC 60450 para determinar o GP do papel isolante Nomex® 910, uma vez que grande parte desse material não solubilizou no solvente etilenodiamina cúprica. No entanto, pode ser possível desenvolver um novo procedimento para determinar o GP, desse papel a partir da separação da aramida (que é insolúvel no solvente) e determinando o GP da fração celulósica. Estudos nesse sentido estão sendo realizados.

O envelhecimento térmico realizado por 45 dias a 170 °C, em OMI, foi suficiente para obtenção de um papel kraft termoestabilizado com GP em torno de 200.

Houve pequena perda de nitrogênio no papel kraft termoestabilizado após submissão ao ensaio de envelhecimento acelerado, indicando que compostos de nitrogênio estão quimicamente ligados à molécula de celulose.

O envelhecimento térmico realizado não alterou o padrão de difração de raio-X dos papéis investigados.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SCHEIRS, J., CAMINO, G., TUMIATTI, W., AVIDANO, M. Study of the mechanism of thermal degradation of cellulosic paper insulation in electrical transformer oil. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*. 1998. Volume 259.
- (2) . AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução ANEEL 053 de 20 de março de 2009.
- (3) WILHELM, H. M., STOCCO, G. B., GALDEANO, C.A., JUNIOR, M.M.S, HOSSRI, H., FERNANDES, P.O., SANTOS, L.C., CABRINO, A. Avaliação da extensão da vida útil do papel kraft isolante em ésteres naturais (óleo vegetal isolante). XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. 23 a 26 de Outubro de 2011, Florianópolis-SC-Brasil, 9pp.
- (4) AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL - ANP. Resolução ANP No 36 de 13 de novembro de 2007.
- (5) ABNT NBR NM ISO 287. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2012. Papel e cartão — Determinação do teor de umidade de um lote — Método por secagem em estufa (ISO 287:2009, IDT).
- (6) AOAC 955.040D. AOAC International. Titrimetry method (Kjeldahl digestion) for total protein determination.
- (7) ISO 1924-2. International Organization for Standardization. 2008. Paper and board - Determination of tensile properties - Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min).
- (8) ASTM E 1131. American Society for Testing and Materials. 2014. Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.
- (9) ABNT NBR IEC 60450. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009. Medição do grau de polimerização viscosimétrico médio de materiais celulósicos novos e envelhecidos para isolação elétrica.
- (10) IEEE C57.100. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2011. Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers.
- (11) SELTMAN, H. J. 2014. Experimental Design and Analysis. Disponível em: http://www.stat.cmu.edu/_hseltman/309/Book/Book.pdf. 428p.
- (12) McNUTT, W. J., Insulation thermal life consideration for transformer loading guide. *IEEE Trans. Power Delivery*, 7, pp. 392-401, 1992.
- (13) GARSIDE, P., WYETH, P. Identification of Cellulosic Fibres by FTIR Spectroscopy - Thread and Single Fibre Analysis by Attenuated Total Reflectance. *Studies in Conservation*, 48 (4), pp. 269-275, 2013.
- (14) SILVA, D. C. Avaliação da interação de materiais internos do transformador com fluidos isolantes tipo éster natural e óleo mineral. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 2013. 84 pp.
- (15) BEAVERS, M. F., RAAB, E. L., LESLIE, J. C. PERMALEX. A New Insulation System, AIEE Winter General Meeting, New York, pp. 64-70, 1960.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná pelas análises de microscopia eletrônica de varredura. Ao Eng. Richard Marek da DuPont pelo grande auxílio no delineamento experimental e na discussão dos dados.

6.0 DADOS BIOGRÁFICOS

Lisiane Lange da Silva nasceu em Clevelândia, Brasil, em 1982. Possui graduação Farmácia, Bioquímica, Indústria e Alimentos pela PUC/PR (2004) e mestrando do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (LACTEC E IEP) em Desenvolvimento de Tecnologia e Sistemas Energéticos Convencionais (2013).

Helena Maria Wilhelm nasceu em Cerro Largo, Brasil, em 1971. Graduiu-se em Química pela Universidade Federal do Paraná, em 1993. Obteve o título de mestre em Química pela Universidade Federal de Santa Catarina,

em 1996, e de doutorado em Química pela Universidade Estadual de Campinas, em 2000. Atualmente atua no desenvolvimento de projetos de pesquisa e desenvolvimento no DIAGNO e LACTEC e leciona nos cursos de pós-graduação em Engenharia de Materiais da UFPR e Desenvolvimento Tecnológico no LACTEC.

Neffe A. Gomez nasceu em Cauca, Colômbia, em 1988. Obteve o título de Bacharel em Química pela Universidade de Valle, Cali, Colômbia, em 2005, e Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Paraná, Brasil, em 2013. Atua principalmente nos seguintes temas: caracterização espectroscópica, envelhecimento térmico, transformadores de distribuição, refrigerantes dielétricos e óleo vegetal.

Leandro G. Feitosa nasceu em Paranaguá, Brasil, em 1985. É Técnico em Química pelo Centro Estadual de Educação de Curitiba e é graduando em Química na Universidade Federal do Paraná. Desde 2013 é atua como técnico no laboratório de análises físico-químicas de óleo isolante do DIAGNO.

Paulo O. Fernandes nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1954. Graduiu-se em Engenharia Química na Universidade Estadual do Rio de Janeiro em 1980 e recebeu o título de Mestre em Ciência de Polímeros e Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em 1985. Trabalhou como pesquisador para Centro de Pesquisa Eletrobras e mais tarde chefiou o departamento de serviço materiais de Westinghouse Divisão de Serviços no Brasil. Atualmente é o diretor do DIAGNO.

Maurício Mattoso nasceu em Curitiba, Brasil, em 1978. Possui graduação em Química Industrial pela PUC/PR e MBA em Sistema de Gestão Ambiental pela mesma instituição. Obteve o título de Mestre em Engenharia e Ciência dos materiais pela Universidade Federal do Paraná - UFPR em 2015. Atualmente é pesquisador do Laboratório DIAGNO. Tem experiência na área de Química, com ênfase em ensaios e Instrumentação Analítica, atuando principalmente nos seguintes temas: espumas, uretana, PCBs, ascarel e policlorados, meio Ambiente, remediação de áreas contaminadas e emissões atmosféricas.

Adriana P. Martins possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (1996), especialização em Engenharia de Materiais para o Setor Elétrico pela Universidade Federal do Paraná (1999), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (1998) e curso técnico-profissionalizante em Técnico em Química pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (1990). Atualmente é Engenheira de Planejamento de Manutenção de Geração e Transmissão Especialista, na Cemig GT. Atua principalmente na área de monitoramento preditivo de equipamentos do sistema elétrico.

Célia R. C. Franco possui graduação em Bacharelado e Licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Paraná (1988), mestrado em Biologia Celular e Molecular pela Universidade Federal do Paraná (1994), doutorado em Bioquímica e Biologia Molecular pela Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP (2002). Atualmente é professora Associada I da Universidade Federal do Paraná, membro titular do colegiado do Programa de Pós Graduação em Biologia Celular e Molecular da UFPR - Tem experiência na área de Biologia Celular, atuando principalmente nos seguintes temas: toxicologia de toxinas de animais peçonhentos.

Vera L. P. dos Santos possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Paraná (1993) e mestrado em Morfologia - Área de Concentração em Biologia Celular pela Universidade Federal do Paraná (1999). Atualmente é coordenadora dos cursos de Saúde Pública com Ênfase em Saúde da Família; Vigilância Sanitária e Enfermagem do Trabalho na modalidade EAD, no Centro Universitário Uninter e professor colaborador II - Faculdades Integradas do Brasil. Tem experiência na área de Histologia e Biologia Celular, atuando principalmente nos seguintes temas: morfologia e microscopia.