

Envelhecimento Acelerado de Óleos de Transformadores em Serviço para Avaliação da Degradação de Papéis Isolantes

Paulo Eduardo Malaquias¹, Armando Bassetto Filho², Milton Marques Júnior³, Lázaro Partamian Carriel⁴, Claudio Aparecido Galdeano⁵, José Pissolato Filho⁶, José Hugo Aguiar⁷

Resumo - No presente estudo, foram submetidas a envelhecimento acelerado amostras de papel isolante novo e de diferentes óleos isolantes retiradas de transformadores de potência em operação no sistema interligado nacional, de modo a avaliar possível correlação entre os ácidos de baixa massa molar dissolvidos no óleo e retidos no papel isolante com os resultados de grau de polimerização em amostras de papel isolante. Em alguns casos, observou-se o papel isolante envelhecido em óleo, que teoricamente tinha pior qualidade, degradar-se menos que papel envelhecido em óleos aparentemente em melhor condição.

Palavras-chave – Transformador de potência, isolamento, envelhecimento, papel isolante, ácidos de baixa massa molar.

I. INTRODUÇÃO

A maioria dos transformadores de potência possui sistema isolante formado por óleo e papel. Os principais agentes de degradação do óleo isolante são o oxigênio e a temperatura, já os principais mecanismos de degradação do papel isolante são a água atuando em conjunto com ácidos (degradação por hidrólise), temperatura (degradação por pirólise) e o oxigênio (degradação por oxidação).

Lundgaard [1], citando outros autores, sugere que o mecanismo de deterioração do papel tem início com a oxidação, quando a água no interior do transformador é pouca e isenta de ácidos. Nessas condições, as oxidações do óleo mineral e do papel isolante produzem ácidos que progressivamente suprimem as reações de oxidação e fortalecem as reações de hidrólise. Assim, em um transformador úmido, a hidrólise torna-se o principal fator de degradação do papel isolante.

Já Azis [2], também mencionando outros autores, alude que a oxidação é o mecanismo dominante em temperaturas menores que 60 °C, enquanto a hidrólise atua

principalmente em temperaturas entre 60 °C e 150 °C. Em temperaturas acima de 150 °C, a pirólise passa a ser o principal mecanismo de degradação.

Os ácidos de baixa massa molar têm grande influência na hidrólise do papel, ao passo que os ácidos de elevada massa molar parecem não influenciá-la significativamente [3]. A causa provável deve-se à solubilidade dos ácidos de baixa massa molar em água. Isto possibilita que sejam facilmente adsorvidos pelo papel, onde se encontra a maior parte da água presente no interior do transformador [1].

Neste estudo, foram envelhecidas, de forma acelerada em laboratório, amostras de diferentes óleos de transformadores de potência em serviço e de papel isolante novo, de modo a avaliar possível correlação entre os ácidos de baixa massa molar dissolvidos no óleo e retidos no papel isolante com os resultados de grau de polimerização (GP) de amostras de papel isolante.

II. PARTE EXPERIMENTAL

Nas amostras de óleo foram medidas a tensão interfacial e o índice de neutralização. Já no papel isolante foram determinados o grau de polimerização (GP) e a acidez.

O GP é a quantidade média de anéis de glicose que formam as fibras de celulose do papel isolante. Como há uma relação entre o GP e a resistência mecânica do papel o grau de polimerização é utilizado para estimar o nível de degradação do sistema isolante sólido do transformador.

Já a tensão interfacial é a tensão na interface entre o óleo e a água. Um óleo mineral isolante em boas condições apresenta uma tensão interfacial de cerca de 40 dina/cm. Produtos resultantes do envelhecimento do óleo e contaminantes polares reduzem a tensão interfacial e assim esta medida é usada para avaliação do grau de contaminação do óleo mineral isolante.

O índice de neutralização é definido como a quantidade de miligramas de KOH necessária para neutralizar um grama de óleo, ou seja, a medida do índice de neutralização mostra o grau de acidez do óleo.

Os ensaios de envelhecimento acelerado foram feitos a 90 °C, que é uma temperatura que pode ser atingida pelo óleo em um transformador em operação normal. O período de envelhecimento foi de 1.344 horas.

Cada um dos óleos estudados foi envelhecido com amostra de papel úmido, ou de papel seco para avaliação da influência da umidade na degradação do papel. O papel úmido estava em equilíbrio com a umidade do ar do laboratório. A secagem das amostras para os ensaios com

¹ Paulo Eduardo Malaquias trabalha na AES Tietê (E-mail: paulo.malaquias@AES.com).

² Dr. Armando Bassetto Filho é consultor independente e trabalha para a ZHZ Pesquisa e Desenvolvimento Ltda. (E-mail: armandobf@uol.com.br).

³ Milton Marques Júnior trabalha na MGM Consultoria e Diagnósticos em Equipamentos Elétricos Ltda. (E-mail: junior@mgmdiag.com.br).

⁴ Lázaro Partamian Carriel trabalha na ZHZ Pesquisa e Desenvolvimento Ltda. (E-mail: lpcarriel@uol.com.br).

⁵ Claudio Aparecido Galdeano trabalha na MGM Consultoria e Diagnósticos em Equipamentos Elétricos Ltda. (E-mail: claudio@mgmdiag.com.br).

⁶ Prof. Dr. José Pissolato Filho trabalha na UNICAMP (E-mail: pissolato@gmail.com).

⁷ José Hugo Aguiar trabalha na ZHZ Pesquisa e Desenvolvimento Ltda. (E-mail: jhugoaguiar@gmail.com).

papel seco foi feita previamente em estufa a 80 °C por 3 horas.

O papel isolante foi cortado em tiras, com 0,10 g de massa cada uma, que foram introduzidas em frascos fechados com tampa de vidro esmerilhado. Em cada frasco, foram colocados 80 g de óleo isolante e uma massa total de 0,8 g de papel isolante novo, tipo *kraft* neutro, de espessura de 0,105mm, densidade aparente 1,11 g/cm³, fabricado por Pucaro Elektro-Isolierstoffe. Os frascos foram fechados em seguida e colocados em estufa previamente aquecida a 90°C.

Mediu-se a tensão interfacial [4], índice de neutralização total [5] e índice de neutralização correspondente aos ácidos de baixa massa molar de todas as amostras de óleo antes do início dos ensaios de envelhecimento acelerado e a cada intervalo de tempo estabelecido.

Para a separação dos ácidos de alta e baixa massa molar em cada etapa de medida agitou-se uma alíquota de 25 ml da amostra de óleo com água destilada (na proporção de 1:1) durante 16 horas. Após a separação das fases água e óleo, o óleo foi titulado com solução alcoólica de hidróxido de potássio (KOH) a 0,05N para medição do índice de neutralização do óleo conforme a norma NBR-14248 [5]. A fase aquosa foi titulada com KOH aquoso a 0,005 N, usando fenolftaleína como indicador, de acordo com o método usual de titulação ácido-base em meio aquoso, a fim de determinar o índice de neutralização dos ácidos de baixa massa molar que se solubilizaram na água.

Mediu-se o grau de polimerização (GP) inicial do papel utilizado [6]. A cada intervalo de tempo estabelecido, além do GP, foi feita a medição do índice de neutralização solúvel em água, segundo procedimento descrito em [2]. Para tanto, fez-se a preparação de uma amostra de papel com massa entre 0,5 e 1,0 g. Colocou-se essa amostra em 25 ml de água destilada durante 72 horas sem agitação. Após esse período de extração, 10 ml do extrato de água foi titulado segundo a norma NBR 14248 [4]. Secou-se o papel em estufa a 70 °C com circulação de ar durante 48 horas. Calculou-se o índice de neutralização, dividindo 40% da massa seca de papel, uma vez que apenas 10 ml foram utilizados para titulação.

O cálculo dos ácidos de baixa massa molar (ABM) é feito com base na equação 1:

$$ABM \text{ no papel} = \frac{(V_p - CV_W) \times m_v \times C_v}{m_p} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: V_p ... Volume titulado contendo extrato da água + solvente (ml).
 CV_W ... Volume titulado contendo água + solvente (ml).
 m_v ... Massa molar do reagente (g/mol).
 C_v ... Concentração do reagente (mol/l).
 m_p ... Massa seca do papel (g).

Em todos os ensaios de envelhecimento acelerado foi empregado como referência (branco) óleo mineral isolante naftênico novo, fabricado pela Nynas, tipo Nytro II GBX-US.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Acompanhamento do Envelhecimento em Laboratório dos Óleos de Transformadores em Operação

A1. Aspectos Gerais

Buscou-se avaliar o comportamento de alguns óleos de transformadores de potência pertencentes à empresa AES Tietê e em operação no sistema elétrico nacional. A Tabela 1 apresenta as principais características das unidades selecionadas.

Tabela 1 – Unidades do Projeto-Piloto.

Usina	Unidade	Fabricante	Nº Série	Ano
Água Vermelha	TR-2 fase A	Austhom	1934452	1977
Água Vermelha	TR-3 fase A	Austhom	1934460	1977
Bariri	TR-3	ABB	3788	2007*
Euclides da Cunha	TR-3	WEG	5477922	2009
Euclides da Cunha	TR-2	ABB	8687-2	2000*
Ibitinga	TR-2	WEG	5100395	2000*
Ibitinga	TR-3	WEG	5100394	2001*
Limoeiro	TR-1	ITEL	32278	1978
Limoeiro	TR-2	ASEA	15808	1964
Nova Avanhandava	TR-2	COEMSA	46.488	1982

O asterisco (*) no ano significa que foi reformado ou reconicionado neste ano.

O papel utilizado foi *kraft* comum nas seguintes condições iniciais:

- GP 1213;
- Amostras secas com 0,38% de umidade;
- Amostras úmidas com 6,27% de umidade.

As amostras foram analisadas antes do início dos ensaios e nos seguintes intervalos de tempo: 168, 504 e 1.344 horas. Os resultados obtidos nos ensaios apresentados a seguir são valores médios de duplicatas.

A2. Grau de Polimerização (GP)

As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados do ensaio de GP em amostras de papel seco e úmido, respectivamente, envelhecidas em óleo.

Na Figura 1 pode-se observar, ao final do ensaio, que a maioria dos papéis envelhecidos nos óleos dos transformadores apresentou resultados de GP maiores dos que os observados para o papel seco, envelhecido em óleo novo. No caso do papel úmido (Figura 2), constata-se o mesmo comportamento, porém em menos casos (TR-3 de Bariri, TR-2 de Limoeiro, TR-3 de Euclides da Cunha e TR-3 de Ibitinga).

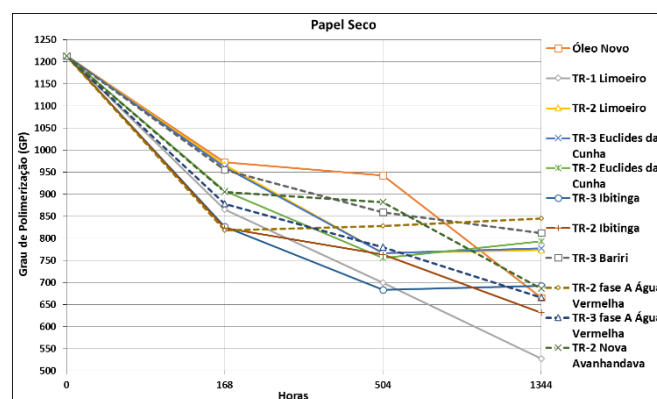


Figura 1. GP de papel seco, envelhecido em óleo a 90°C.

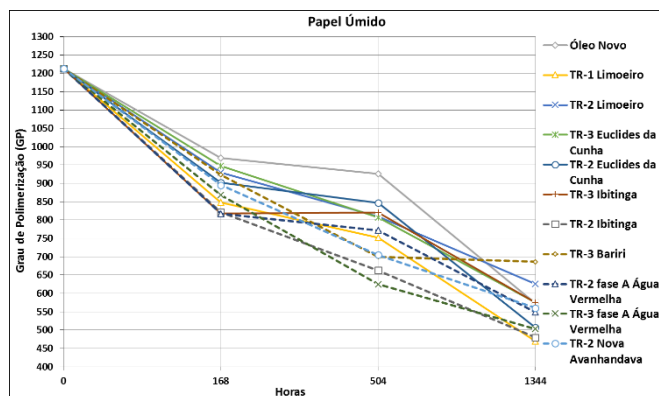


Figura 2. GP de papel úmido, envelhecido em óleo a 90°C.

A3. Tensão Interfacial

Como tendência geral, a queda da tensão interfacial teve o comportamento esperado (Figuras 3 e 4), ou seja, os óleos com menores valores iniciais apresentaram valores comparativamente mais baixos ao término do ensaio. Entretanto, a umidade do papel não teve impacto negativo significativo na queda da tensão interfacial de nenhum dos óleos.

Os óleos dos transformadores TR-1 de Euclides da Cunha e TR-3 de Bariri, entretanto, mesmo tendo tensão interfacial inicial ligeiramente inferior ao valor inicial daquela do óleo novo, a partir de 504 horas de ensaio, apresentaram valores um pouco mais elevados do que o óleo novo envelhecido tanto em papel seco quanto úmido, respectivamente.

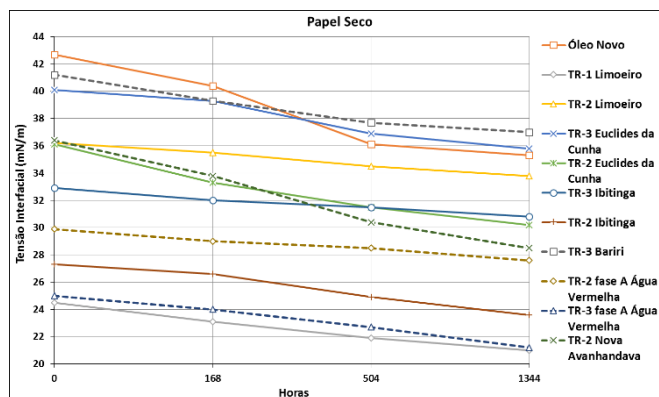


Figura 3. Tensão interfacial de óleo envelhecido a 90°C com papel seco.

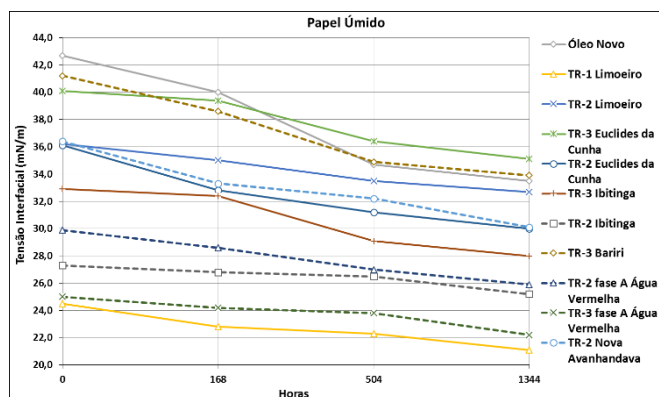


Figura 4. Tensão interfacial de óleo envelhecido a 90°C com papel úmido.

A4. Índice de Neutralização

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os resultados do índice de neutralização das amostras de papel seco e úmido, respectivamente.

No caso dos papéis secos, até 504 horas de ensaio, o índice de neutralização do papel envelhecido em óleo novo manteve-se menor do que o dos papéis envelhecidos nos demais óleos em todos os casos. Entretanto, após 1.344 horas de ensaio, verificou-se queda de valores em cinco dos óleos estudados (Figura 5). Embora essa queda não fosse esperada, observou-se que os resultados de GP dos papéis envelhecidos nesses óleos, após 1.344 horas de envelhecimento, foram maiores do que o do papel envelhecido em óleo novo.

Quanto aos papéis úmidos, o índice de neutralização do papel envelhecido nos óleos em serviço permaneceu, na maioria dos casos, acima dos valores observados para o papel envelhecido em óleo novo, embora tenha havido ligeiras quedas em alguns dos casos, na análise comparativa dos resultados após 504 e 1.344 horas de envelhecimento (Figura 6).

A exceção observada foi a do papel úmido envelhecido no óleo do TR-3 de Bariri, cujo índice de neutralização teve queda significativa após 1.344 horas de envelhecimento (Figura 6).

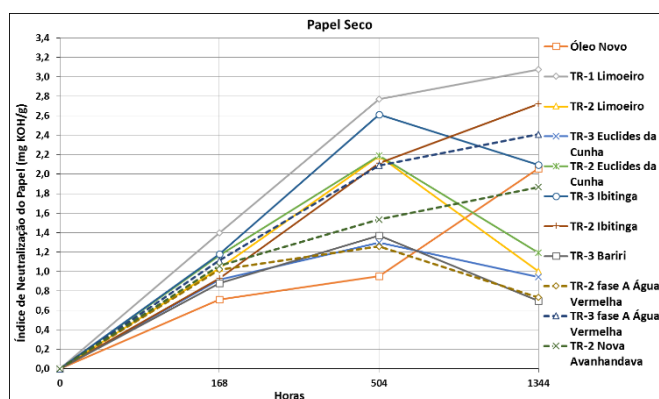


Figura 5. Índice de neutralização do papel seco, envelhecido em óleo a 90°C.

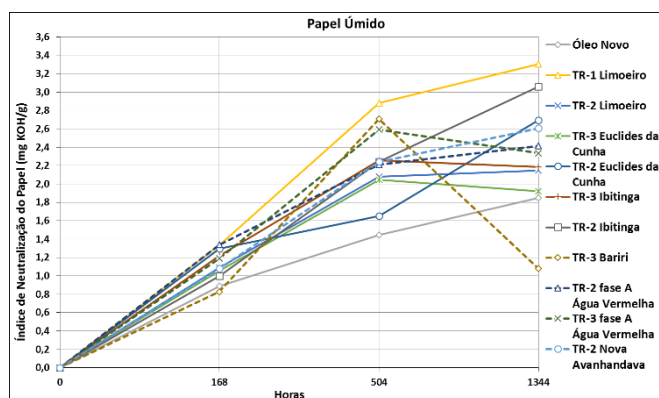


Figura 6. Índice de neutralização do papel úmido, envelhecido em óleo a 90°C.

As Figuras 7 a 12 apresentam o índice de neutralização da água contendo os ácidos de baixa massa molar extraídos de amostras de óleo, bem como do óleo antes e após a extração dos ácidos de baixa massa molar, com papel seco e úmido, respectivamente.

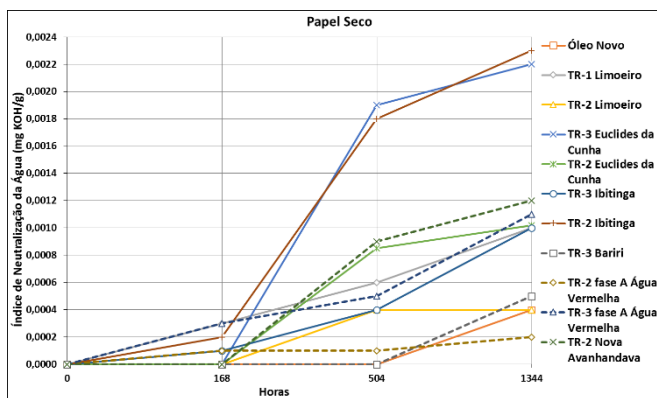


Figura 7. Índice de neutralização da água contendo os ácidos de baixa massa molar extraídos de amostras de óleo envelhecido a 90°C com papel seco.

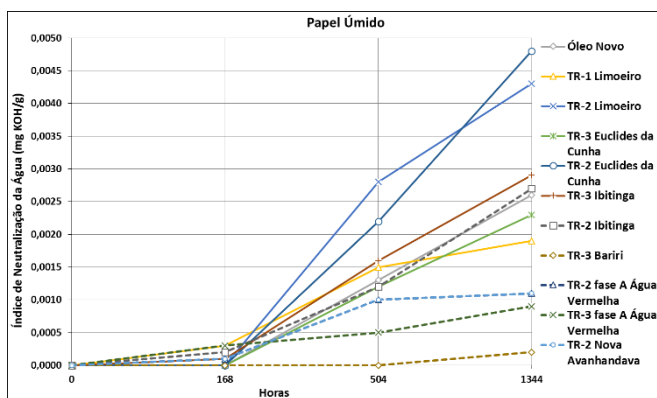


Figura 8. Índice de neutralização da água contendo os ácidos de baixa massa molar extraídos de amostras de óleo envelhecido a 90°C com papel úmido.

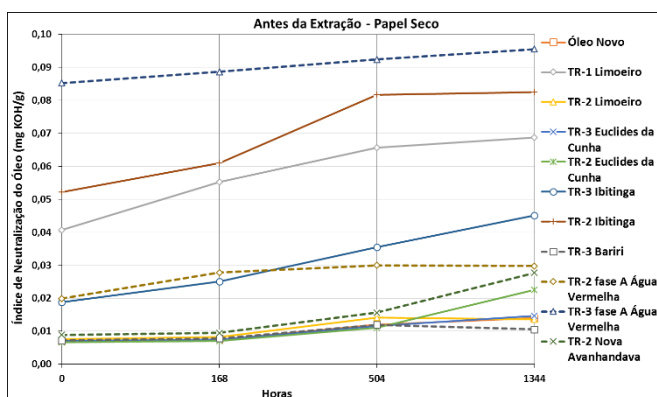


Figura 9. Índice de neutralização de óleo envelhecido a 90°C com papel seco antes da extração dos ácidos de baixa massa molar.

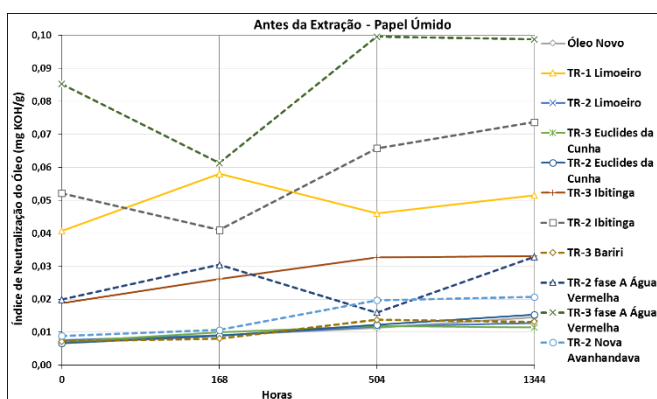


Figura 10. Índice de neutralização de óleo envelhecido a 90°C com papel úmido antes da extração dos ácidos de baixa massa molar.

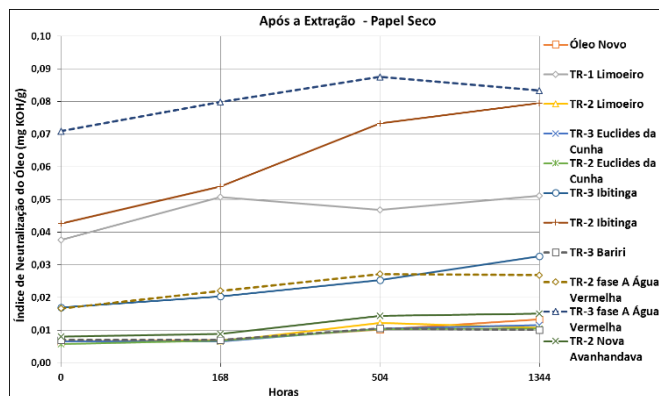


Figura 11. Índice de neutralização de óleo envelhecido a 90°C com papel seco após a extração dos ácidos de baixa massa molar.

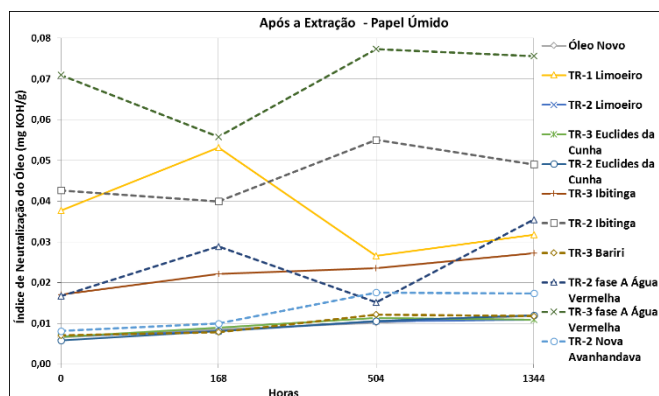


Figura 12. Índice de neutralização de óleo envelhecido a 90°C com papel úmido após a extração dos ácidos de baixa massa molar.

A5. Avaliação dos Resultados

O ensaio de envelhecimento a 90 °C durante 56 dias mostrou ser útil, uma vez que permite avaliar tendências no envelhecimento dos óleos e papéis sob análise, utilizando uma temperatura de ensaio que pode ser encontrada em transformadores operando no sistema interligado e com um tempo de ensaio não muito longo.

Com a execução do envelhecimento, empregando os parâmetros estabelecidos e os ensaios preconizados, percebeu-se ser factível verificar tendências com ganho de qualidade na avaliação do envelhecimento do sistema isolante de transformadores de potência.

Routineiramente, utiliza-se o ensaio de tensão interfacial para definir limites a partir dos quais os óleos envelhecidos em serviço devem ser regenerados, ou mesmo substituídos.

Na metodologia proposta, essa avaliação é enriquecida por meio do envelhecimento acelerado do óleo na presença de papel isolante. Nesses ensaios de envelhecimento acelerado, são executados ensaios de grau de polimerização (GP) e de índice de neutralização do papel, além da tensão interfacial, bem como do índice de neutralização total e dos ácidos de baixa massa molar no óleo.

Para exemplificar essa abordagem de avaliação, envolvendo a análise de vários parâmetros, serão tomados como exemplos ilustrativos os óleos do TR-1 de Limoeiro e do TR-3, fase A, de Água Vermelha, ambos envelhecidos com papel seco. Foram observados os seguintes resultados para o TR-1 de Limoeiro, após 1.344 horas (56 dias) de envelhecimento: 527 de GP do papel, 21,0 mN/m de tensão interfacial do óleo (o valor inicial era de 24,5 mN/m) e

3,075 mg KOH/g de índice de neutralização do papel. O TR-3, fase A, de Água Vermelha, após 1.344 horas de envelhecimento, apresentou os seguintes resultados: 666 de GP do papel, 21,2 mN/m de tensão interfacial do óleo (o valor inicial era de 25,0 mN/m) e 2,408 mg KOH/g de índice de neutralização do papel.

Embora os óleos desses dois transformadores apresentassem resultados de tensão interfacial muito próximos antes do ensaio de envelhecimento em laboratório, ao final desse ensaio, o GP do papel envelhecido no óleo do TR-1 de Limoeiro foi 20,9% menor do que o do papel envelhecido no óleo do TR-3, fase A, de Água Vermelha. Também se pode observar que o índice de neutralização do papel envelhecido no óleo do TR-1 de Limoeiro foi 27,7% maior do que o do papel envelhecido no óleo do TR-3, fase A, de Água Vermelha.

Assim, ao analisar outros casos futuramente, quando ocorrerem dúvidas nas avaliações de tendências, os ensaios podem ser repetidos, uma vez que seu custo é baixo. Além do mais, podem ser feitas alterações na relação entre temperatura e duração do ensaio de envelhecimento em razão de necessidades pontuais. Por exemplo, a temperatura de ensaio passar para 100 °C e o tempo de duração ser limitado a 28 dias. O mais importante, porém, é a possibilidade de fazer análise mais ampla do que a usual até aqui na definição de prioridades de regeneração de óleos, que se baseia apenas na análise da tensão interfacial e no índice de neutralização total do óleo.

A Figura 13 apresenta a correlação entre GP e índice de neutralização do papel dos óleos do projeto-piloto. Embora haja grande dispersão de valores, as curvas de regressão estão próximas.

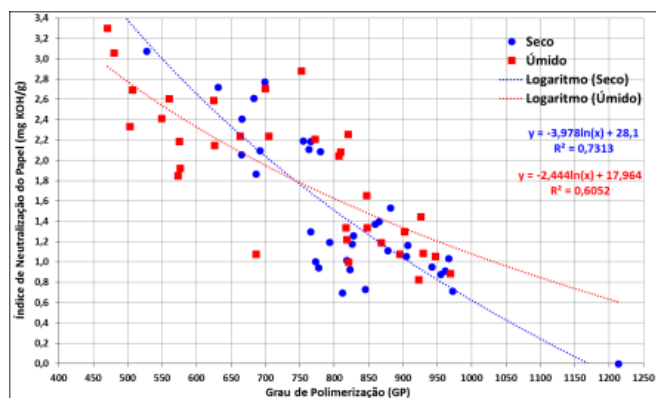


Figura 13. Correlação entre GP e índice de neutralização do papel.

IV. CONCLUSÕES

No presente estudo, foram envelhecidas em laboratório, amostras de diferentes óleos de transformadores de potência em serviço e de papel isolante novo, de modo a avaliar possível correlação entre os ácidos de baixa massa molar dissolvidos no óleo ou retidos no papel isolante com os resultados de grau de polimerização (GP) de amostras de papel isolante.

Com base nos resultados obtidos, a quantificação de ácidos de baixa massa molar diluídos no óleo não pôde ser utilizada para estimar o grau de envelhecimento do papel isolante de transformador.

Também a mensuração dos ácidos de baixa massa molar no papel isolante mostrou ser técnica pouco promissora para avaliação do envelhecimento do papel em razão da alta dispersão de dados na correlação entre GP e índice de neutralização do papel. Entretanto, com a medição dos ácidos de baixa massa molar no papel, é possível avaliar como a presença destes pode ou não ser determinante na degradação do papel, o que é muito útil para o estabelecimento de prognósticos de envelhecimento.

É consenso que a qualidade do óleo isolante tem influência na velocidade de degradação do papel isolante, mas no presente estudo, observou-se papel isolante envelhecido em óleo, que teoricamente tinha pior qualidade, ou seja, índice de neutralização total mais elevado e tensão interfacial mais baixa, degradar-se menos que papel envelhecido em óleos aparentemente em melhor condição.

Não há explicação clara para este comportamento, mas uma possibilidade é que com as diferenças na composição do óleo e de seus aditivos, bem como oscilações de temperatura de trabalho típicas do transformador, possam ser formados compostos ácidos mais agressivos ao papel.

É comum, em empresas com grande número de transformadores, que a priorização dos recursos disponíveis para tratamento ou substituição de óleo isolante seja feita com base apenas na análise do índice de neutralização e da tensão interfacial do óleo. Dessa forma, óleos realmente mais agressivos ao papel podem ser tratados tardiamente.

Como mais uma ferramenta para priorizar o tratamento de óleos isolantes de transformadores de potência em operação, propõe-se a execução de ensaios de envelhecimento a 90°C por, no mínimo, 1344 h em papel *kraft* novo imerso em amostras de óleo dos transformadores.

V. REFERÊNCIAS

- [1] LARS E. LUNDGAARD, WALTER HANSEN, DAG LINHJELL, TERENCE J. PAINTER. – “Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers”. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 19, Nº. 1, janeiro de 2.004 p. 237.
- [2] AZIS, N. – “Ageing Assessment of Insulation Paper with Consideration of In Service Ageing and Natural Ester Application”. 2012. Tese de Doutorado. Faculty of Engineering and Physical Sciences. University of Manchester. 2012. Pág 40.
- [3] MARTINS, MARIA AUGUSTA G. - Envelhecimento Térmico do Papel Isolante de Transformadores. Investigação Experimental. Modelos de Degradação. Ciência & Tecnologia dos Materiais. Volume 22; nº 1/2 2010. p. 79.
- [4] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Óleo mineral isolante - Determinação da tensão interfacial de óleo-água pelo método do anel - Método de ensaio, NBR 6234:2015. Rio de Janeiro, Jan/2015. p. 8.
- [5] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Produtos de Petróleo - Determinação do Número de Acidez e de Basicidade - Método do Indicador. NBR 14248:2009. Rio de Janeiro, Jun/2009. p. 15.
- [6] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Medição do Grau de Polimerização Viscosimétrico Médio de Materiais Celulósicos Novos e Envelhecidos Para Isolação Elétrica, NBR IEC 60450. Rio de Janeiro, Abr/2009. p. 17.