



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GTM/15

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XIII

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

**ESTUDO DE SISTEMAS ISOLANTES DE REFERÊNCIA USADOS NA DETERMINAÇÃO DA CLASSE TÉRMICA
DE NOVOS SISTEMAS ISOLANTES SEGUNDO A NORMA IEEE C57.100**

H. M. Wilhelm (*)	P. O. Fernandes	L. G. Feitosa	G. C. Silva	L. Galhardo	R. P. Marek
DIAGNO	DIAGNO	DIAGNO	DIAGNO	DUPONT	DUPONT

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades de três papéis kraft termoestabilizados, obtidos de três diferentes fornecedores, como sistemas de referência de acordo com a norma IEEE Std C57.100.2011. Para tanto, as três amostras de papéis kraft termoestabilizados, foram inicialmente caracterizadas, sendo determinado seu GP, a resistência à tração e o teor de nitrogênio. Na sequência, os três diferentes papéis foram secos até atingir um teor de umidade inferior a 0,5% e envelhecidos em óleo mineral isolante em três temperaturas, a saber, 180, 165 e 150 °C, por diferentes intervalos de tempo. Após, foram realizados ensaios de GP e de resistência à tração nos papéis envelhecidos e os resultados obtidos foram comparados entre si. A reprodutibilidade desse procedimento geral, descrito na norma IEEE Std C57.100.2011, está sendo avaliada em dois laboratórios diferentes, um nacional e outro americano. O laboratório nacional testou a relação de materiais líquidos/sólidos (óleo/papel+pressboard+metais) para transformadores de potência (relação 8,8:1) enquanto que o americano testou as duas relações, distribuição (relação 16,3:1) e potência. Neste artigo estão apresentados os resultados obtidos para os diferentes papéis investigados, para as duas relações de materiais (distribuição e potência) e para as temperaturas de 180 e 165 °C. Para a relação de materiais de transformadores de potência, observou-se pequenas diferenças entre os dois laboratórios para os resultados absolutos de alguns ensaios. Mas, embora tenham sido observadas essas pequenas diferenças, ambos os laboratórios obtiveram resultados comparáveis se consideradas as características de fim de vida para os papéis testados. Sugestões para melhorar a reprodutibilidade entre os laboratórios são apresentadas e discutidas neste artigo.

PALAVRAS-CHAVE

IEEE Std C57.100, critérios de fim de vida, classe térmica, papel kraft isolante, papel kraft termoestabilizado, óleo mineral isolante, envelhecimento acelerado, sistema de referência

1.0 - INTRODUÇÃO

A norma IEEE Std C57.100 (*Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers*), que define procedimentos para determinação da classe térmica de novos sistemas isolantes, foi revisada em 2011 [1]. O sistema de isolamento para aplicação desta norma inclui o papel kraft termoestabilizado, o *pressboard* e o óleo mineral isolante (OMI). Nesta revisão, o procedimento para determinar a classe térmica de novos sistemas isolantes (denominado de *candidate system*) é baseado no uso de um sistema de referência (denominado de *industry proven system*). O procedimento exige que seja feito, inicialmente, o envelhecimento do sistema de referência (*industry proven system*) em três diferentes temperaturas, em triplicata, em células de teste fechadas, acondicionadas em uma estufa. As células de teste permanecem na estufa por um intervalo de tempo específico, determinado previamente pela curva de Arrhenius, como definido na IEEE Std C57.12.00 [2]. Nas amostras do papel de referência envelhecidas devem ser realizados ensaios de resistência mecânica à tração para determinar o percentual remanescente da resistência mecânica do papel

(*) Rua México, n° 1053 – CEP 82.510-060 Curitiba, PR – Brasil

Tel: (+55 41) 3328-0368 – Fax: (+55 41) 3328-0367 – Email: helenaw@diagno.com.br

envelhecido, sendo que o percentual remanescente da resistência mecânica do papel envelhecido = (resistência à tração do papel envelhecido x 100)/resistência à tração do papel novo] ou o grau de polimerização (GP) e, em seguida, todos os nove resultados do teste devem ser avaliados em conjunto. Este valor da resistência à tração remanescente e ou do GP são então utilizados como critérios de fim de vida para o novo sistema isolante (*candidate system*) a sendo investigado. Esta norma define uma relação de líquido/sólidos ((óleo/papel+pressboard+metais) de diferentes materiais para transformadores de distribuição e de potência, igual a 8,8/1 e 16,3/1, respectivamente (Tabela 1). Embora este procedimento seja simples, em geral, na prática surgem algumas perguntas com relação ao tipo de óleo mineral isolante e de papel kraft termoestabilizado a serem utilizados, uma vez que variações na qualidade e no desempenho destes podem gerar resultados finais diferentes. Não está claro ainda como possíveis variações no sistema de referência podem afetar o resultado final do novo sistema isolante sob investigação (*candidate system*). No sentido de contribuir no esclarecimento destas questões foi desenvolvido este trabalho. Este artigo investigou três diferentes papéis kraft termoestabilizados, produzidos por fabricantes de três diferentes áreas geográficas, como sistemas de referência de acordo com a norma IEEE Std C57.100.2011 [1]. Um fabricante foi selecionado da Europa, um da Ásia e um da América do Norte. Para tanto, amostras dos três papéis kraft termoestabilizados, de diferentes fornecedores, foram inicialmente caracterizadas, sendo determinado o GP, a resistência à tração e o teor de nitrogênio. Neste artigo estão apresentados os resultados obtidos para os diferentes papéis investigados para as temperaturas de 180 e 165 °C.

2.0 - OBJETIVOS

- Avaliar e comparar algumas propriedades de três papéis kraft termoestabilizados, de diferentes fornecedores.
- Envelhecer amostras três papéis kraft termoestabilizados, de diferentes fornecedores, a 180 °C por 18 dias e a 165 °C por 55 dias, de acordo com a metodologia descrita na IEEE Std C57.100.
- Avaliar a aplicabilidade da IEEE Std C57.100, sua reprodutibilidade e confiabilidade.

3.0 - METODOLOGIA

3.1 Caracterização dos três papéis kraft termoestabilizados novos

Três amostras de papéis kraft termoestabilizados, aqui denominados de Papel 1, Papel 2 e Papel 3, obtidas de três diferentes fornecedores (um fabricante foi selecionado da Europa, um da Ásia e um da América do Norte) foram analisadas, sendo realizados os seguintes ensaios nos papéis:

- Teor de água (ASTM D3277) [3]. Antes da determinação do teor de água, amostras dos papéis foram acondicionadas em ambiente com temperatura e umidade controladas (18,8 °C e 14% de umidade relativa) e em ambiente não controlado (temperatura ambiente de aproximadamente 26 °C e umidade relativa aproximada de 65%).
- Nitrogênio total (método Kjeldahl, AOAC 955.04D) [4].
- Grau de polimerização (GP) (IEC 60450) [5].
- Resistência mecânica à tração (ASTM D882 [6] para Laboratório 1 e ASTM D828 [7] para Laboratório 2). Para os ensaios mecânicos de tração a distância entre as garras e a velocidade de separação das mesmas foram fixadas em 76 mm e 12,5 mm/min, respectivamente, para o Laboratório 1, e em 63,5 mm e 6,35 mm/min, respectivamente, para o Laboratório 2. O ensaio mecânico foi realizado em amostras de papel impregnadas com OMI. A impregnação dos papéis com OMI foi realizada segundo a ASTM D2413 [8].

3.2 Envelhecimento acelerado dos três papéis kraft termoestabilizados

O Laboratório 1 testou a relação de materiais para transformadores de distribuição e de potência e o Laboratório 2 apenas para transformadores de potência (Tabela 1). Os 2 laboratórios usaram células de envelhecimento com diferentes dimensões (Tabela 2), sendo as células do Laboratório 1 construídas em aço e as do Laboratório 2 em alumínio (Figura 1). Ambas as células são equipadas com uma válvula de alívio de pressão ajustada para 69 kPa (10 Psi). Na Figura 1 consta o interior de uma célula de envelhecimento, utilizada pelo Laboratório 1, com a relação típica de materiais para transformadores de distribuição (16,3/1).

TABELA 1 – Relações de materiais para os transformadores de distribuição e de potência definidas para o teste em tubos selados [1].

Material	Tipo de transformador	
	Potência	Distribuição
Líquido isolante	200 cm ³	200 cm ³
Papel isolante 0,05 até 0,10 mm	6,4 cm ³	
Papel isolante 0,13 até 0,38 mm		11,2 cm ³
Pressboard de baixa densidade 1,00 até 3,00 mm		1,2 cm ³
Pressboard de baixa densidade 2,00 até 8,00 mm	16,4 cm ³	
Relação líquido/sólido	8,8:1	16,3:1

TABELA 2 – Dimensões das células de envelhecimento.

	Laboratório 1	Laboratório 2
Altura	20,3 cm	18,0 cm
Largura	12,7 cm	8,2 cm
Volume total	2573,9 cm ³	950,6 cm ³

As células de envelhecimento foram preenchidas com óleo mineral isolante e os metais. Então, as amostras de papel e *pressboard* foram removidas do dispositivo de impregnação e inseridas nas células. Neste momento foi coletada uma amostra de papel para determinação do teor de umidade. As células foram fechadas (tampa foi aparafusada) e o ar do *headspace* removido pela introdução de gás nitrogênio até a pressão, registrada pelo manômetro, atingir 4 Psi.



FIGURA 1 - Célula de envelhecimento contendo os materiais sólidos.

As células, contendo as razões de materiais apresentadas na Tabela 1, foram dispostas em estufas. O envelhecimento acelerado foi realizado a 180 °C por 18 dias e a 165 °C por 55 dias, pelos Laboratórios 1 e 2. Os ensaios foram realizados em triplicata. Ao final do tempo de envelhecimento (18 dias a 180 °C e 55 dias a 165 °C) as células foram removidas da estufa e avaliado se houve queda de pressão. As células foram esfriadas à temperatura ambiente e após foram abertas. Os metais foram descartados. O papel e o *pressboard* foram guardados em sacos plásticos tipo “Zip”, para evitar contato com a umidade do meio ambiente.

3.3 Caracterização dos papeis envelhecidos

Os seguintes ensaios foram realizados nos papeis kraft termoestabilizados envelhecidos:

- Teor de água (ASTM D3277) [3].
- Grau de polimerização (GP) (IEC 60450) [5].
- Resistência mecânica à tração (ASTM D882 [6] para Laboratório 1 e ASTM D828 [7] para Laboratório 2). Para os ensaios mecânicos de tração o óleo não foi extraído das amostras de papel.

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades dos papeis kraft termoestabilizados novos

Na Tabela 3 estão apresentadas as concentrações de nitrogênio presente nos três papéis kraft termoestabilizados novos. Os Papéis 2 e 3 apresentaram teores de nitrogênio similares enquanto que o Papel 1 apresentou o menor valor.

TABELA 3 – Valor médio do teor de nitrogênio total dos papeis kraft termoestabilizados novos, determinado pelo método Kjeldahl.

	Nitrogênio total (%)	
Papel	Laboratório 1	Laboratório 2
Papel 1	1,67	1,80
Papel 2	2,17	2,15
Papel 3	2,18	2,13

O teor de umidade determinado nos papéis kraft termoestabilizados novos são mostrados na Tabela 4. Quando expostos a diferentes condições de umidade e temperatura, os 3 papéis apresentaram teores de umidade semelhantes.

TABELA 4 – Teor de umidade dos papeis kraft termoestabilizados novos.

Teor de umidade (%)		
Papel	Laboratório 1 RH = 14%	Laboratório 2 RH = 65%
Papel 1	1,3	8,9
Papel 2	1,5	8,0
Papel 3	1,7	8,3

Os resultados dos ensaios mecânicos de tração estão mostrados na Tabela 5. Os 3 papéis kraft termoestabilizados novos apresentaram espessuras, alongamento e módulo de Young similares (Tabelas 5 e 6) em ambos os laboratórios. As diferenças observadas entre os resultados obtidos nos Laboratórios 1 e 2 podem ser atribuídas às diferenças na distância e velocidade de separação das garras. O Papel 3 apresentou maior resistência à tração comparativamente aos demais papeis.

TABELA 5 – Propriedades mecânicas de tração (valor médio \pm desvio padrão) dos papeis kraft termoestabilizados novos, medidas pelo Laboratório 1.

Papel	Espessura (mm)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (GPa)
Papel 1	0,082 \pm 0,004	130,1 \pm 11,6	2,12 \pm 0,19	9,20 \pm 1,57
Papel 2	0,082 \pm 0,001	136,4 \pm 13,9	1,72 \pm 0,14	10,43 \pm 1,32
Papel 3	0,073 \pm 0,001	176,6 \pm 17,8	1,81 \pm 0,18	12,04 \pm 1,30

TABELA 6 – Propriedades mecânicas de tração (valor médio \pm desvio padrão) dos papeis kraft termoestabilizados novos, medidas pelo Laboratório 2.

Papel	Espessura (mm)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (GPa)
Papel 1	0,086 \pm 0,003	100,5 \pm 3,6	3,47 \pm 0,10	6,22 \pm 0,28
Papel 2	0,090 \pm 0,003	106,9 \pm 4,1	2,94 \pm 0,11	7,14 \pm 0,35
Papel 3	0,078 \pm 0,006	138,6 \pm 8,6	3,15 \pm 0,02	8,63 \pm 0,48

O valor do GP médio dos papeis kraft termoestabilizados novos está apresentado na Tabela 7. Os valores foram semelhantes para os 3 papeis analisados.

TABELA 7 – Grau de polimerização (GP) (valor médio \pm desvio padrão) dos papeis kraft termoestabilizados novos, medidas pelos Laboratórios 1 e 2.

Papel	Laboratório 1	Laboratório 2
Papel 1	1014	1189
Papel 2	1155	1257
Papel 3	1028	1184

4.2 Propriedades dos papeis kraft termoestabilizados envelhecidos

Os resultados dos ensaios mecânicos de tração para os papeis kraft termoestabilizados envelhecidos a 180 °C, na relação de materiais para transformadores de potência, são mostrados nas Tabelas 8 e 9. Para ambos os laboratórios, o Papel 3 envelhecido apresentou maior resistência à tração comparativamente aos demais.

TABELA 8 – Propriedades mecânicas (valor médio \pm desvio padrão) dos papéis kraft termoestabilizados envelhecidos a 180 °C (relação de materiais para transformadores de potência), obtidas pelo Laboratório 1.

Papel	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (GPa)
Papel 1	21,77 \pm 1,36	0,79 \pm 0,31	6,442 \pm 0,133
Papel 2	19,15 \pm 1,21	0,67 \pm 0,24	8,075 \pm 0,186
Papel 3	32,64 \pm 1,89	0,58 \pm 0,20	11,513 \pm 0,244

TABELA 9 – Propriedades mecânicas (valor médio \pm desvio padrão) dos papeis kraft termoestabilizados envelhecidos a 180 °C (relação de materiais para transformadores de potência), obtidas pelo Laboratório 2.

Papel	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (GPa)
Papel 1	18,04 \pm 3,85	0,93 \pm 0,37	2,724 \pm 0,30
Papel 2	13,74 \pm 2,70	1,67 \pm 0,27	0,938 \pm 0,13
Papel 3	26,52 \pm 2,01	0,83 \pm 0,6	0,942 \pm 0,38

O teor de umidade medido nos papeis envelhecidos a 180 e 165 °C, para a relação de materiais para transformadores de potência, estão apresentados na Tabela 10. Resultados similares foram obtidos para ambos laboratórios para os papeis envelhecidos a 180 °C mas, a 165 °C, valores diferentes foram obtidos. Esta diferença

pode ser devido ao tempo de resfriamento das células após retirada da estufa, que não foi pré definido entre os laboratórios.

TABELA 10 - Teor de umidade (valor médio) dos papeis kraft termoestabilizados envelhecidos, obtidos pelos Laboratórios 1 e 2.

Relação de materiais e temperatura (°C)	Papel	Teor de umidade (%)	
		Laboratório 1	Laboratório 2
Distribuição, 180 °C	Papel 1	1,3	
	Papel 2	1,0	
	Papel 3	1,3	
Distribuição, 165 °C	Papel 1	1,3	
	Papel 2	1,2	
	Papel 3	1,5	
Potência, 180 °C	Papel 1	1,4	0,9
	Papel 2	1,2	0,9
	Papel 3	0,9	0,9
Potência, 165 °C	Papel 1	1,4	5,1
	Papel 2	1,3	4,8
	Papel 3	1,1	4,5

Os percentuais remanescentes da resistência à tração dos ensaios realizados com a relação de materiais para transformadores de distribuição estão mostrados na Tabela 11. Os resultados mostram boa uniformidade, exceto para o Papel 3 a 165 °C. Sem excluir nenhum dado, o valor médio da resistência à tração remanescente é de 23% e o GP médio é de 160 para os testes com a relação de materiais para transformadores de distribuição.

Os percentuais remanescentes da resistência à tração dos ensaios realizados com a relação de materiais para transformadores de potência estão apresentados nas Tabelas 12 e 13. Os resultados obtidos mostram boa uniformidade entre temperaturas e laboratórios, exceto para os valores de GP dos Papeis 1 e 2 a 180 °C obtidos pelo Laboratório 2. Sem excluir nenhum dado, o valor médio para a resistência à tração remanescente é de 13,5% e o valor médio do GP é de 113 para os testes com a relação de materiais para transformadores de potência.

Todos os papeis envelhecidos apresentaram valores de GP menores que 182 para as razões de materiais para transformadores de distribuição (Tabela 11) e menores que 151 para as razões de materiais para transformadores de potência (Tabela 12), com alguns valores menores que 31, indicando que os papeis foram muito envelhecidos (degradados). A taxa de envelhecimento do papel isolante também é afetada pela concentração de oxigênio no óleo [9]. Contudo, nestes experimentos a concentração de oxigênio no óleo não foi medida pelos laboratórios e possíveis variações nas concentrações de oxigênio podem explicar algumas das variações observadas no GP e nos valores da resistência à tração remanescente obtidas pelos dois laboratórios. Outra possibilidade é a degradação não uniforme do papel ao longo do comprimento da amostra.

TABELA 11 - Percentual remanescente da resistência à tração e GP dos papeis envelhecidos a 180 e 165 °C (relação de materiais para transformadores de distribuição) obtidos pelo Laboratório 1.

Temperatura (°C)		Papel 1	Papel 2	Papel 3
180	Resistência à tração remanescente, %	20,28	31,38	19,98
		18,24	19,98	22,53
		26,16	23,23	21,03
	Valor médio	21,56	24,87	21,18
	GP	161	224	168
		128	193	199
		147	128	168
	Valor médio	145	182	178
165	Resistência à tração remanescente, %	21,32	31,58	14,21
		36,13	21,95	9,99
		28,84	32,60	10,47
	Valor médio	28,76	28,71	11,56
	GP	154	180	128
		218	168	101
		141	193	82
	Valor médio	171	180	104

TABELA 12 - Percentual remanescente da resistência à tração e GP dos papeis kraft termoestabilizados envelhecidos a 180 °C (relação de materiais para transformadores de potência), obtidos pelos Laboratórios 1 e 2.

Propriedade	Papel 1		Papel 2		Papel 3	
	Laboratório 1	Laboratório 2	Laboratório 1	Laboratório 2	Laboratório 1	Laboratório 2
Resistência à tração remanescente, %	16,67	10,04	12,58	9,82	16,08	9,82
	17,39	13,62	12,41	9,15	16,60	14,58
	16,07	15,00	18,98	12,30	21,41	18,80
Valor médio	16,71	12,89	14,65	10,43	18,03	14,40
GP	121	64	141	29	132	169
	108	40	115	30	115	184
	82	29	108	35	147	101
Valor médio	104	44	121	31	131	151

TABELA 13 – Percentual remanescente da resistência à tração e GP dos papeis kraft termoestabilizados envelhecidos a 165 °C (relação de materiais para transformadores de potência), obtidas pelos Laboratórios 1 e 2.

Propriedade	Papel 1		Papel 2		Papel 3	
	Laboratório 1	Laboratório 2	Laboratório 1	Laboratório 2	Laboratório 1	Laboratório 2
Resistência à tração remanescente, %	13,73	8,24	6,85	8,12	12,24	14,31
	15,58	16,71	11,06	16,02	10,42	15,36
	11,70	17,05	9,63	13,27	9,73	15,35
Valor médio	13,67	14,0	9,18	12,47	10,80	15,01
GP	108	127	121	150	161	140
	108	127	108	123	147	143
	128	129	128	127	121	148
Valor médio	115	128	119	125	143	144

5.0 - CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos até o momento e apresentados neste trabalho, é possível apontar algumas conclusões preliminares:

- Os resultados obtidos neste estudo mostram claramente que o procedimento dos ensaios realizados foi adequado pois foi possível atingir o fim de vida útil para todas as amostras de papel testados, como previsto.
- Embora o procedimento da norma IEEE Std C57.100 permita escolher a análise do GP ou do percentual remanescente da resistência à tração como critérios de fim de vida útil, este último apresentou menores variações.
- Com exceção das medidas de GP, que variaram mais significativamente, os resultados dos testes de ambos os laboratórios se compararam razoavelmente bem, sugerindo que o procedimento também é reprodutível em diferentes laboratórios. Embora pequenas diferenças entre os dois laboratórios foram observadas para os resultados absolutos de alguns testes, ambos os laboratórios obtiveram resultados comparáveis ao considerar as características de fim de vida para todos os papéis testados. É possível que uma melhor correspondência para os resultados dos testes possa ser obtida controlando todos os detalhes dos procedimentos de teste tais como, como o teor de oxigênio dissolvido nas amostras de óleo e o tempo de repouso das células antes da sua abertura.
- Os dados de teste dos dois laboratórios foram satisfatórios, embora as células de teste usadas tenham sido diferentes do ponto de vista construtivo, provando que o procedimento é escalável em uma faixa substancial.
- Uma adição notável ao procedimento padrão foi o uso de dispositivos de alívio de pressão ajustados para valores típicos do transformador. Este foi um requisito retirado do procedimento escrito na IEC 62332-2 [10]. Isso previne aumentos anormais de pressão que podem afetar o processo de envelhecimento. Este e outros detalhes serão apresentados ao Comitê de Transformadores da IEEE para consideração na próxima revisão do documento IEEE Std C57.100 [1].

Este estudo teve também por objetivo comparar os resultados das séries de distribuição (relação de materiais para transformadores de distribuição) e potência (relação de materiais para transformadores de potência) e comparar os resultados de três diferentes papéis. A série de potência apresentou um percentual remanescente de resistência à tração substancialmente inferior à da série de distribuição nas temperaturas de envelhecimento utilizadas, 180 e 165 °C. Os dados estão incompletos, pois os ensaios a 150 °C estão em andamento, mas, em princípio, sugerem que a elevada proporção de *pressboard* de baixa densidade e o valor reduzido de óleo em comparação ao material sólido resultam numa maior degradação do sistema de referência. Resta avaliar se esta diferença é suficiente para

resultar em um índice térmico diferente para aplicações em transformadores de potência e de distribuição para o mesmo papel. A comparação dos papéis de diferentes fornecedores mostra algumas diferenças, mas elas não são notáveis e mais testes são necessários para tirar qualquer conclusão final. Os resultados apresentados neste artigo, obtidos para os três papéis kraft termoestabilizados, permitem concluir que o desempenho de ambos foi similar.

Embora o estudo ainda não esteja finalizado, em geral, os resultados mostraram que o procedimento funcionou como esperado e que o teste do tubo selado (células de envelhecimento), conforme definido na norma IEEE Std C57.100.2011 [1], parece ser útil para avaliação térmica da isolamento sólida imersa em líquido isolante para transformadores de distribuição e de potência. Os resultados finais deste estudo serão apresentados à medida que forem obtidos os dados adicionais. Vale ressaltar, também, que não há norma ou guia nacional semelhante ao da norma IEEE Std C57.100.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Evanne Wang e Robert R. Nunn da DuPont Energy Solutions, de Richmond, Virginia, USA, pela realização dos testes nos papéis kraft termoestabilizados novos e envelhecidos.

7.0 - REFERÊNCIAS

- [1]. IEEE Std C57.100 - IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers.
- [2]. IEEE Std C57.12.00 - IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
- [3]. ASTM D3277 - Standard Test Methods for Moisture Content of Oil-Impregnated Cellulosic Insulation.
- [4]. AOAC 955.04D – Nitrogen determination by Kjeldahl Method.
- [5]. IEC 60450 - Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials.
- [6]. ASTM D882 - Complete Document Abbreviations Definitions Active, Most Current Item is contained in these sets Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting.
- [7]. ASTM D828 - Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus.
- [8]. ASTM D2413 - Standard Practice for Preparation of Insulating Paper and Board Impregnated with a Liquid Dielectric.
- [9]. Lelekakis, N., Wijaya, J., Martin, D., Saha T., Susa, D., Krause, C. Aging Rate of Grade 3 Presspaper Insulation used in Power Transformers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 5, 2355-2362, 2014.
- [10]. IEC 62332-2 - Electrical Insulation Systems (EIS) - Thermal evaluation of combined liquid and solid components - Part 2: Simplified Test.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Helena Maria Wilhelm nasceu em Cerro Largo, Brasil em 1971. Formou-se em Química pela Universidade Federal do Paraná em 1993, o título de mestre em Química pela Universidade Federal de Santa Catarina, em 1996 e o título de doutora em Química pela Universidade Estadual de Campinas em 2000. Atualmente trabalha como Pesquisadora em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento na empresa Diagno e é professora e orientadora no Mestrado Profissional (*stricto sensu*) em Desenvolvimento de Tecnologia dos Institutos Lactec.

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.

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 responsável pelo laboratório de análises físico-químicos de óleo isolante do DIAGNO.

Geovana C. dos Santos nasceu em São José dos Pinhais, Brasil, em 1996. É Técnica em Química pelo Centro Estadual de Educação de Curitiba e é graduanda em Física na Universidade Federal do Paraná. Desde 2013 atua como técnica no laboratório de análises físico-químicos de óleo isolante do DIAGNO.

Leonardo Galhardo nasceu em São Paulo, Brasil, em 1985. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e possui MBA em Gestão de Negócios pela FIA. Trabalhou como Engenheiro de Aplicação na Aquarius Software, Engenheiro de Produtos na ABB e atualmente trabalha com o desenvolvimento de negócios do DuPont Nomex® para motores e transformadores nas Américas.

Richard P. Marek recebeu seu diploma de Engenheiro Eletricista (BSEE) pela Universidade de Purdue e tem sido empregado da DuPont desde 1998. Sua experiência de trabalho anterior inclui um total de 28 anos como Engenheiro de Projeto, Teste e Desenvolvimento em transformadores. É membro sênior da IEEE, onde atuou no Comitê de Transformadores, em vários subcomitês e em numerosos grupos de trabalho desde 1982. Atuou como presidente e coordenador das normas IEEE Std C57.154 e IEC 60076-14, respectivamente. Participou da IEC TC14 e atualmente é membro do grupo responsável pelo guia de carregamento de líquidos, a IEC 60076-7.