

ANÁLISE DO NÍVEL DE DEGRADAÇÃO APÓS TRATAMENTOS DE SECAGEM DO PAPEL KRAFT TERMOESTABILIZADO EM TRANSFORMADORES E REATORES DE ALTA POTÊNCIA

Bárbara M. Padilha¹, Ruth M. C. Santana¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia de Materiais, Porto Alegre, RS, Brasil

Resumo: Este trabalho avalia o impacto da secagem por fase de vapor nas propriedades do papel kraft termoestabilizado usado como isolante sólido em transformadores e reatores de alta potência. Seis lotes industriais foram monitorados na pré-secagem e pós-fase de vapor por grau de polimerização, MEV, ângulo de contato, colorimetria e FTIR. A secagem induziu cornificação e queda de molhabilidade, preservando grau de polimerização acima de 950, o que assegura a integridade do isolante.

Palavras-chave: Papel kraft termoestabilizado; Fase de vapor; Grau de polimerização; Cornificação; Transformadores de potência.

INTRODUÇÃO

A estabilidade do sistema interligado nacional (SIN) no Brasil é diretamente dependente da confiabilidade de seus ativos de alta tensão. Transformadores e reatores de potência consolidam-se como componentes críticos, operando como elos fundamentais na transmissão de energia. Devido à sua complexidade e escala, tais equipamentos representam investimentos significativos, cujos valores para unidades de grande porte podem oscilar entre R\$ 8 milhões e R\$ 25 milhões. Consequentemente, a ocorrência de falhas operacionais transcende o dano material imediato, desencadeando prejuízos sistêmicos e sanções regulatórias severas por hora de interrupção (TAMURA, 2022; MALAQUIAS, 2017).

O tempo de utilização de transformadores e reatores é, em última análise, determinado pela integridade de seu sistema isolante. Diferentemente do óleo de isolamento, cujas propriedades podem ser restauradas, a degradação da isolação sólida celulósica é um processo químico e físico irreversível. Assim, a vida útil de um transformador é definida pela resistência de seu papel isolante, e o grau de polimerização (GP) médio viscosimétrico consolidou-se como o parâmetro técnico mais fiel para mensurar a extensão das cadeias moleculares de celulose, visto que sua redução implica na fragilização mecânica das fibras (DE PABLO, 2017; MARTINS, 2010). No entanto, o envelhecimento do isolante não se restringe à quebra de suas macromoléculas: engloba também alterações físicas, microestruturais e de superfície, que ditam sua

capacidade de interagir com o meio e suportar as solicitações operacionais.

No ambiente industrial, o isolante celulósico é submetido a condições severas de estresse mecânico e térmico muito antes da entrada em operação em campo. Durante a manufatura, as fibras do papel isolante enfrentam condições que alteram sua morfologia, porosidade, capacidade de absorção e coloração. Nas etapas de encolunamento e, principalmente, de secagem por fase de vapor (*vapour phase* – VP), o material é exposto a vácuo extremo e temperaturas próximas a 125 °C. Esse tratamento térmico induz fenômenos como a cornificação (*hornification*), que promove o colapso capilar irreversível das paredes celulares e modifica a energia de superfície e a molhabilidade do papel, além de provocar o relaxamento térmico de tensões elásticas acumuladas. Evidências sugerem que esses ciclos, se não controlados, podem alterar de forma heterogênea as propriedades físicas e reduzir prematuramente a massa molecular da celulose ainda em ambiente fabril (LUKIC et al., 2021). Para mitigar os riscos de exposição excessiva e a redução da vida útil do equipamento, a indústria emprega o papel kraft termoestabilizado, quimicamente modificado com aditivos nitrogenados para elevar sua estabilidade térmica. Atualmente, a indústria opera, em grande parte, com base em estimativas normativas e avaliações macroscópicas, existindo uma lacuna no mapeamento empírico sobre o comportamento real da fibra, tanto em nível molecular, analisado pelo GP, quanto em nível físico e superficial, em cada movimentação e ciclo térmico real.

Este trabalho propõe analisar o desempenho do papel kraft termoestabilizado em uma amostragem de seis equipamentos de grande porte (três transformadores e três reatores de potência), mapeando de forma integrada a variação do grau de polimerização e as transformações físicas, ópticas e morfológicas sofridas pelas fibras duas etapas fundamentais: pré-secagem e pós-VP, considerando ainda uma fase intermediária (pós-secagem em estufa) no ensaio de grau de polimerização.

MATERIAL E MÉTODOS

O isolante analisado consiste em papel kraft termoestabilizado aplicado na isolação de condutores de cobre (1,0 mm × 4,4 mm), utilizados nos enrolamentos. A isolação do condutor é composta por nove camadas sobrepostas de fitas de papel kraft com 20 mm de largura e espessuras nominais de 75 µm, 76 µm e 90 µm. Para padronização da coleta, as camadas foram numeradas da mais externa (1ª) à mais interna (9ª, em contato direto com o cobre); as duas camadas mais externas e as duas mais internas foram descartadas para eliminar efeitos de contaminação por manuseio e interferências da interface metal-celulose. A amostragem baseou-se, portanto, na coleta aleatória das camadas intermediárias (3ª à 7ª) de seis lotes industriais diferentes (três transformadores e três reatores de potência), conforme ilustrado na Figura 1 na etapa de pré-secagem.



Figura 1 – Filamentos de amostras de papel kraft isolante termoestabilizado dos seis lotes na condição pré-secagem.

As amostras foram caracterizadas em dois marcos produtivos: pré-secagem e pós-fase de vapor (pós-VP), com uma etapa intermediária de pós-secagem em estufa (encolunamento) considerada apenas na discussão do grau de polimerização. A espessura foi determinada com um micrômetro digital *Mitutoyo*, em três pontos distintos de três corpos de prova por amostra (7,5 cm × 1 cm), totalizando nove leituras. A gramatura foi obtida pela razão entre a massa do corpo de prova, pesada em balança *Sartorius Basic*, e sua área, multiplicada pelo fator 10.000 (g/m²). A densidade aparente foi calculada pela relação entre gramatura e espessura média. O teor de umidade foi determinado pela variação de massa antes e após

secagem em estufa, comparando-se os estágios de pré-secagem e pós-VP.

A análise morfológica foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em microscópio ZEISS EVO, com aumentos de 100x e 1000x, totalizando 12 amostras (seis pré e seis pós-secagem). O ângulo de contato foi medido em gonioômetro *Phoenix Mini* (SEO), com unidade óptica *Minicam* para captura de imagens macro de gotas de água destilada; o tempo de registro foi padronizado em 1 segundo após o contato, uma vez que a alta porosidade do papel inviabilizou a leitura em 60 segundos, já que a absorção completa ocorria antes da captura da imagem. Dez gotas foram analisadas por amostra, em cada estágio. A caracterização colorimétrica e óptica foi realizada em espectrofotômetro *BYK spectro-guide 45/0 gloss*, sob o sistema CIELAB, avaliando-se luminosidade (L^*), as coordenadas cromáticas a^* e b^* , e o brilho (G), em triplicata para cada uma das amostras. A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR) foi conduzida em espectrômetro *Spectrum 1000* (PerkinElmer), na faixa de 450 a 4000 cm^{-1} , em modo de transmitância, totalizando 12 espectros. Ainda, o grau de polimerização médio viscosimétrico (GP) foi determinado em duplicata segundo a ABNT NBR IEC 60450. As amostras foram lavadas em Soxhlet com hexano, secas, hidratadas e solubilizadas em solução de etilenodiamina cúprica (Cuen) 1,0 M sob atmosfera de argônio. O tempo de escoamento das soluções foi medido em viscosímetro capilar a 20 °C, permitindo o cálculo da viscosidade específica, da concentração real corrigida pela umidade e, por meio da equação de Martin (constante $K1 = 0,14$), da viscosidade intrínseca. O GP foi obtido pela relação linear normativa, com constante de proporcionalidade molecular $K = 7,5 \times 10^{-3}$, totalizando a análise de seis amostras na condição pré-secagem e seis na condição pós-VP.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades físicas

A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam a média e o desvio padrão dos resultados de espessura, gramatura, densidade aparente e teor de umidade das amostras de papel kraft na pré-secagem e pós-fase de vapor (VP). Na pré-secagem (OS), considera-se o tempo 0; no pós-VP, o tempo 7 dias.

Tabela 1 – Espessura e gramatura das amostras na pré-secagem e pós-fase de vapor.

Lote	Espessura (μm)		Gramatura (g/m ²)	
	PS	Pós-VP	PS	Pós-VP
1	89,0±2,3	94,0±2,7	93,3±2,3	84,5±2,7
2	90,8±3,5	96,0±2,2	77,5±6,5	71,0±5,3
3	91,0±3,7	77,0±3,6	81,6±3,8	74,6±3,2
4	91,0±3,7	84,6±8,7	94,0±4,5	84,0±5,8
5	91,8±2,1	89,2±2,6	86,8±4,8	77,7±6,1
6	90,4±2,5	89,5±1,9	87,8±0,5	79,7±1,1

Tabela 2 – Densidade aparente (dens.) na pré-secagem e pós-fase de vapor, e teor de umidade das amostras.

Lote	Dens. PS (g/cm ³)	Dens. pós-VP (g/cm ³)	Umidade (%)
1	1,050±0,026	0,951±0,030	9,40±4,93
2	0,872±0,073	0,799±0,044	8,32±0,99
3	0,918±0,043	0,839±0,036	8,59±1,30
4	1,058±0,051	0,945±0,065	10,74±2,14
5	0,977±0,054	0,829±0,069	10,90±4,25
6	0,988±0,005	0,897±0,012	9,21±0,87

A Figura 2 apresenta a gramatura das amostras dos seis lotes em função do tempo de secagem.

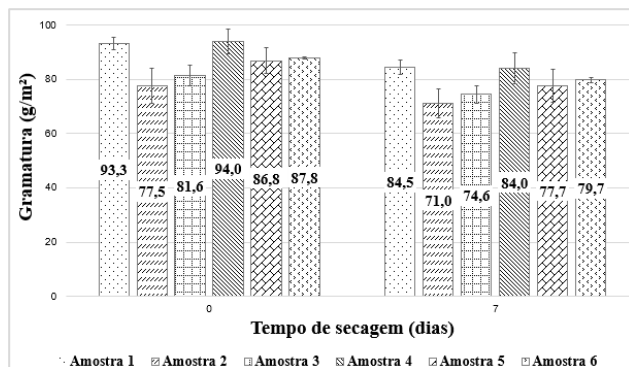


Figura 2 – Gramatura das amostras dos seis lotes em função do tempo de secagem.

A partir dos dados expostos, observa-se que todas as seis amostras analisadas apresentaram redução sistemática em seus valores absolutos de gramatura após o ciclo de secagem por fase de vapor. A amostra 5, por exemplo, exibiu a maior variação absoluta, reduzindo sua gramatura de $86,84 \pm 4,79$ g/m² para $77,68 \pm 6,10$ g/m². Essa perda de massa por unidade de área está diretamente atrelada à eliminação da umidade característica higroscópica fortemente ligada às regiões amorfas da celulose, validando a

alta eficiência do processo industrial de dessorção térmica sob vácuo. Essa interpretação é corroborada pelos expressivos valores de teor de umidade inicial determinados na pré-secagem, que variaram de $8,32 \pm 0,99\%$ (amostra 2) até $10,90 \pm 4,25\%$ (amostra 5). De acordo com a literatura (CIGRE TB 730, 2018; TAZHIBAYEV et al., 2024), o processo de fase de vapor expõe o isolante a vapores de solvente hidrocarboneto a aproximadamente 125 °C sob vácuo severo, reduzindo drasticamente o teor de umidade final do papel para patamares inferiores a 0,5%, o que justifica a redução generalizada da gramatura observada experimentalmente.

A Figura 3 apresenta a espessura do papel kraft dos seis lotes em função do tempo de secagem.

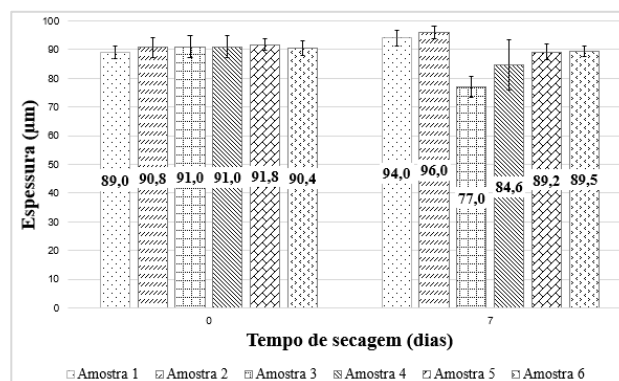


Figura 3 – Espessura das amostras dos seis lotes em função do tempo de secagem.

Observa-se que todas as amostras no tempo 0 apresentaram espessuras semelhantes, entre 89,0 e 91,8 μm; após sete dias de secagem, contudo, houve diferenças significativas entre os lotes. A amostra 3 apresentou contração de $91,0 \pm 3,7$ μm para $77,0 \pm 3,6$ μm, acompanhada por redução proporcional nos lotes 4, 5 e 6. Divergindo desse padrão, as amostras 1 e 2 apresentaram inversão comportamental atípica e relevante: após o ciclo pós-VP, houve aumento nos valores médios de espessura (de $89,0 \pm 2,3$ μm para $94,0 \pm 2,7$ μm, na amostra 1). Como consequência direta desse aumento volumétrico combinado à perda de massa, a densidade aparente de ambos os lotes decaiu de forma acentuada. Esse comportamento indica que o calor do processo provocou relaxamento das tensões mecânicas acumuladas nas fibras durante o tensionamento do enrolamento ao redor do condutor de cobre, em um fenômeno conhecido como efeito *spring-back*, já relatado por Lukic et al. (2021) e pelo CIGRE (TB 982, 2026). Quando esse alívio de tensões predomina sobre a contração capilar, a estrutura se expande localmente, reduzindo a densidade aparente e tornando o isolante mais poroso, o que, na prática, pode favorecer a

impregnação pelo óleo mineral isolante nas etapas seguintes de fabricação. Já nas demais amostras, a densidade aparente tendeu a decrescer de forma sutil ou se estabilizar, como verificado na amostra 5, que variou de $0,977 \pm 0,054$ para $0,829 \pm 0,069$ g/cm³. Esse fenômeno é discutido como cornificação da celulose. Conforme descrito por Hill (2010) e verificado nos ensaios de Wolmarans *et al.* (2021), a remoção da água que atuava como agente plastificante nas regiões amorfas induz a formação de novas ligações de hidrogênio intramoleculares e irreversíveis entre as fibras de celulose adjacentes. Esse rearranjo microestrutural fecha os poros internos da fibra e provoca o encolhimento macroscópico do papel, explicando a diminuição simultânea de espessura e densidade aparente observada na maioria dos lotes industriais avaliados.

Análise morfológica

A Figura 4 apresenta as micrografias obtidas por MEV das amostras do lote 1, configurando (a) e (b) imagens da superfície do papel kraft na pré-secagem, com aumentos de 100x e 1000x, respectivamente; (c) e (d) imagens da superfície do papel kraft pós-fase de vapor, nos mesmos aumentos.

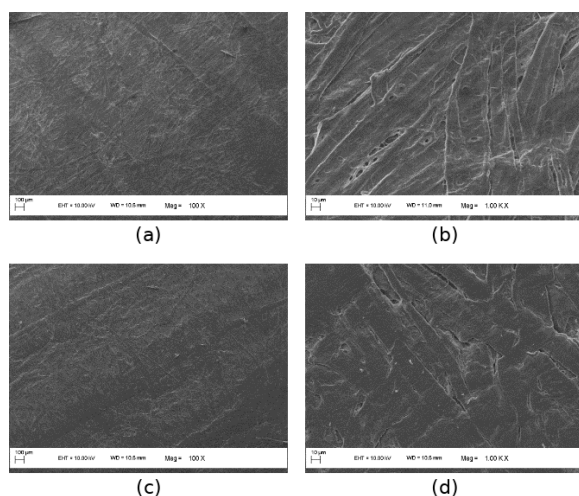


Figura 4 – Micrografias da superfície do papel kraft do lote 1: (a) e (b) pré-secagem, 100x e 1000x; (c) e (d) pós-fase de vapor, 100x e 1000x.

Nas micrografias correspondentes à pré-secagem, observa-se rede tridimensional porosa e desordenada, composta por fibras celulósicas longas, achatadas e entrelaçadas de forma aleatória, evidenciando espaços vazios preenchidos por umidade higroscópica difusa. A flexibilidade aparente das fibras nesse estágio decorre do efeito plastificante da água intrínseca, que diminui a rigidez das regiões amorfas. Para o grupo composto pelas amostras 3, 4, 5 e 6, as imagens pós-VP mostraram fibras

individuais visivelmente mais compactadas, planas e unidas entre si, com redução da porosidade superficial visível: comprovação visual do fenômeno de cornificação sofrido pela celulose durante a secagem industrial profunda. Na literatura (HILL, 2010; MCNEIL *et al.*, 2019), a eliminação da umidade induz fechamento irreversível das fendas capilares internas da fibra, consolidando arranjo denso que justifica o aspecto liso, rígido e aglutinado verificado nas imagens pós-VP. Divergindo desse padrão, as micrografias das amostras 1 e 2 no estágio pós-VP exibem morfologia rugosa, caracterizada pelo surgimento de microfissuras superficiais, desalinhamento de fibras e aparente estufamento na interface entre fibras entrelaçadas. Essa textura pode ser a evidência física direta do relaxamento de tensões elásticas residuais sofrido por esses dois lotes durante o ciclo térmico a 125 °C, conforme o efeito *spring-back* já discutido. De acordo com Lukic *et al.* (2021) e as diretrizes do CIGRE (TB 982, 2026), quando as forças de atrito e as restrições geométricas do encabeçamento cedem ao alívio térmico, a rede entre a fibra e a porosidade do papel se expande localmente em nível microscópico, confirmando que, para esse grupo, o relaxamento mecânico superou a contração por cornificação.

Propriedades físico-químicas

O ensaio de ângulo de contato foi padronizado para registro fotográfico em 1 segundo após o contato da gota com o papel, uma vez que a alta porosidade do material impedia a medição em tempos maiores: a absorção completa do líquido ocorria de forma acelerada, inviabilizando a captura da imagem da gota. A Tabela 3 apresenta os valores médios de ângulo de contato e seus respectivos desvios-padrão, e a Figura 5 ilustra o comportamento da gota antes e após o tratamento na amostra de maior variação (lote 5).

Tabela 3 – Ângulo de contato (°) na pré-secagem e pós-fase de vapor.

Lote	Ângulo PS (°)	Ângulo pós-VP (°)
1	47,11±4,41	67,90±8,20
2	65,17±8,42	77,21±4,68
3	55,06±5,83	84,59±6,26
4	63,48±4,32	74,68±7,04
5	43,75±5,92	81,73±7,90
6	57,95±6,80	79,74±3,03



Figura 5 – Gota de água sobre a superfície do papel kraft do lote 5: (a) pré-secagem, ângulo de 43,75°; (b) pós-fase de vapor, ângulo de 81,73°.

No estágio pré-secagem, os ângulos de contato medidos situaram-se entre $43,75 \pm 5,92^\circ$ (amostra 5) e $65,17 \pm 8,42^\circ$ (amostra 2), confirmando a elevada molhabilidade e alta energia livre de superfície iniciais da celulose, governada pela ampla disponibilidade de grupos hidroxila ($-\text{OH}$) livres na superfície das fibras. Após a exposição ao ciclo térmico de fase de vapor, observou-se aumento generalizado e estatisticamente significativo dos ângulos de contato em todas as amostras. O maior aumento absoluto ocorreu na amostra 5 ($\Delta = +37,98^\circ$). Embora o material permaneça classificado como hidrofílico ($\theta < 90^\circ$ em todos os casos), essa elevação angular reflete perda parcial de afinidade termodinâmica pela água, provocada pelo fenômeno de cornificação: a severa desidratação sob vácuo induz o colapso interno das paredes celulares, aproximando as fibras e reduzindo a densidade de sítios hidrofílicos ativos disponíveis para interagir com a água. As amostras 3, 5 e 6 apresentaram os maiores ângulos de contato pós-VP, aproximando-se do limiar de hidrofobicidade, reflexo direto da compactação e do aplainamento superficial observados no MEV. Já as amostras 1, 2 e 4 exibiram comportamentos mais discretos e os menores valores finais pós-VP, associados ao relaxamento de tensões residuais e ao desfibramento detectados nesses lotes. De acordo com o modelo de Wenzel para ciência de superfícies, em materiais intrinsecamente hidrofílicos o aumento da rugosidade superficial amplifica a hidrofilicidade química local, o que justifica o motivo pelo qual essas amostras mantiveram ângulos pós-VP inferiores. Na literatura de engenharia de alta tensão (TAZHIBAYEV et al., 2024; CIGRE TB 982, 2026), essa redução controlada da molhabilidade superficial é apontada como indicador técnico positivo, pois diminui a taxa de higroscopicidade cinética instantânea do papel nas etapas subsequentes de montagem.

Propriedades colorimétricas e ópticas

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os valores das propriedades colorimétricas e ópticas obtidos por lote de amostra na pré-secagem e pós-VP, e a Figura 6 apresenta a variação do parâmetro de maior alteração conforme o tempo de secagem.

Tabela 4 – Parâmetros colorimétricos L^* (luminosidade) e a^* (verde-vermelho) das amostras na pré-secagem (PS) e pós-fase de vapor (VP).

Lote	L^*	a^*
1 PS	62,93±1,84	8,48±0,66
1 VP	64,13±0,63	7,80±0,19
2 PS	63,64±0,31	9,06±0,11
2 VP	65,31±1,14	6,92±0,08
3 PS	63,09±0,59	10,19±0,22
3 VP	66,32±0,69	8,16±0,26
4 PS	61,82±1,39	10,40±0,71
4 VP	66,66±0,57	7,88±0,18
5 PS	68,34±0,81	7,52±0,48
5 VP	66,19±0,66	8,07±0,12
6 PS	64,08±0,77	7,58±0,39
6 VP	64,73±0,35	7,55±0,46

Tabela 5 – Parâmetros colorimétricos b^* (azul-amarelo) e G (brilho) das amostras na pré-secagem (PS) e pós-fase de vapor (VP).

Lote	b^*	G
1 PS	23,74±0,71	2,50±0,45
1 VP	24,51±0,40	2,26±0,25
2 PS	22,95±0,16	2,76±0,21
2 VP	21,38±0,27	3,63±0,31
3 PS	26,53±0,28	2,86±0,57
3 VP	23,50±0,27	3,10±0,20
4 PS	27,22±0,27	3,04±0,40
4 VP	24,54±0,30	3,40±0,21
5 PS	23,77±0,71	2,10±0,65
5 VP	25,28±0,52	3,03±0,21
6 PS	22,40±0,58	3,70±0,34
6 VP	23,34±0,46	3,40±0,20

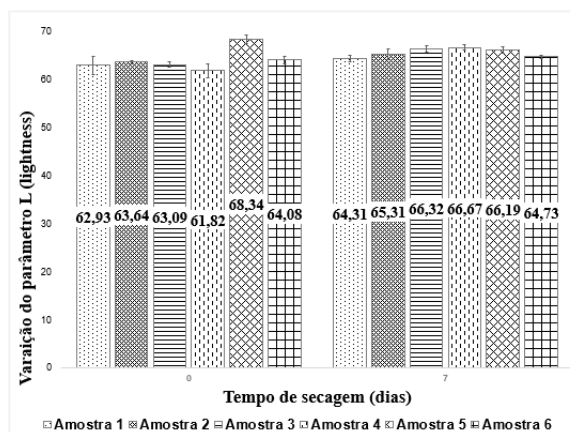


Figura 6 – Variação do parâmetro L^* (luminosidade) das amostras em função do tempo de secagem.

O parâmetro de luminosidade (L^*) apresentou acréscimo não significativo após o ciclo de secagem por fase de vapor na maioria dos lotes. O comportamento mais expressivo foi registrado na amostra 4, cujo valor de L^* variou de $61,82 \pm 1,39$ na pré-secagem para $66,66 \pm 0,57$ no estágio pós-VP, seguida pela amostra 3 (de $63,09 \pm 0,59$ para $66,32 \pm 0,69$). O aumento de L^* indica que a superfície do papel kraft tornou-se opticamente mais clara após o tratamento térmico, fenômeno relacionado à cornificação e ao colapso físico das paredes celulares das fibras: a eliminação da umidade higroscópica e a subsequente compactação mecânica achatam as fibras, reduzindo a porosidade aberta e gerando superfície topograficamente mais lisa e densa, o que diminui a absorção espalhada da luz incidente e aumenta a leitura de luminosidade. Divergindo dessa tendência, a amostra 5 apresentou redução em sua luminosidade (de $68,34 \pm 0,81$ para $66,19 \pm 0,66$), indicando que, nesse lote específico, os efeitos cinéticos de degradação térmica localizada se sobrepuseram aos efeitos ópticos de compactação física. Como esse lote ingressou no fluxo produtivo com o maior teor de umidade inicial ($10,90 \pm 4,25\%$), a associação entre elevado volume de água e temperaturas próximas a 125°C favorece reações de hidrólise ácida da celulose e degradação prematura de frações de hemicelulose, com formação de subprodutos cromóforos que justificam o escurecimento localizado. Os parâmetros cromáticos complementares corroboram o rearranjo estrutural: observa-se tendência generalizada de redução ou estabilização nas coordenadas a^* e b^* para a maioria dos lotes, como na amostra 3 (a^* de 10,19 para 8,16; b^* de 26,53 para 23,50), indicando deslocamento para assinatura cromática menos saturada. Os valores de brilho (G) exibiram ganho nítido na maior parte das amostras, com destaque para a amostra 2 (de $2,76 \pm 0,21$ para $3,63 \pm 0,31$), consolidando a interpretação de que o processo de secagem promoveu a planificação da face externa do papel isolante.

Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam, respectivamente, os espectros de infravermelho com transformada de Fourier das amostras na pré-secagem e após o tratamento de secagem por fase de vapor.

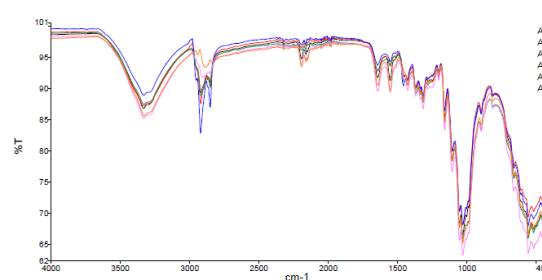


Figura 7 – Espectros de FTIR das amostras na pré-secagem.

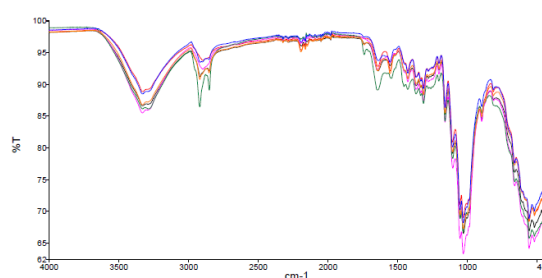


Figura 8 – Espectros de FTIR das amostras pós-fase de vapor.

No estágio pré-secagem, todas as amostras exibiram o perfil espectrográfico característico da celulose purificada de alta massa molar: banda larga e intensa em $\sim 3330\text{ cm}^{-1}$ (estiramento de ligações hidroxila), desdobramento de picos entre 2900 e 2800 cm^{-1} (ligações C—H), banda em $\sim 1630\text{ cm}^{-1}$ (deformação angular da água absorvida) e pico proeminente em $\sim 1030\text{ cm}^{-1}$ na região de impressão digital, associado ao estiramento das ligações C—O e C—C do anel glicosídico. A sobreposição das bandas entre as seis amostras no estágio inicial comprova a homogeneidade química e a padronização da matéria-prima de partida. Após o tratamento por fase de vapor, o perfil espectrográfico principal da celulose foi quimicamente preservado em todas as amostras. O resultado mais expressivo reside na ausência de bandas ou ombros entre 1700 e 1730 cm^{-1} , intervalo associado ao estiramento de ligações carbonila (C=O), assinatura química clássica de processos severos de oxidação ou pirólise destrutiva. A total ausência desse sinal comprova que o ciclo industrial de secagem operou de forma eficiente, promovendo desidratação profunda sem desencadear degradação oxidativa macroscópica na matriz de carbono, o que atesta a eficácia do vácuo severo aplicado e valida a atuação protetora dos aditivos nitrogenados de termoestabilização do papel. A análise comparativa entre as Figuras 7 e 8 revela sutil estreitamento e redução relativa de intensidade na

banda larga de —OH em $\sim 3330\text{ cm}^{-1}$ no estágio pós-VP, traduzindo a remoção da água livre e o início do processo de cornificação das fibras celulósicas: à medida que a umidade é forçada para fora da matriz polimérica, as fibras adjacentes sofrem colapso capilar e se aproximam de forma irreversível, convertendo ligações de hidrogênio antes feitas com a água em novas ligações intramoleculares entre as próprias cadeias de celulose. Esse fechamento das hidroxilas livres reduz a energia de superfície disponível, justificando o aumento do ângulo de contato e a densificação que explica o ganho de luminosidade e brilho superficial verificado na análise colorimétrica. Na literatura de diagnóstico e manutenção de transformadores (HILL, 2010; LUKIC et al., 2021; CIGRE TB 982, 2026), a espectroscopia FTIR-ATR é considerada técnica mandatória para qualificar a integridade estrutural do isolante sólido celulósico: a manutenção da região de impressão digital combinada à ausência de subprodutos de oxidação atesta a estabilidade térmica do sistema papel-óleo após os ciclos de secagem fabril.

Grau de polimerização (GP)

O ensaio de GP na etapa de secagem em estufa foi realizado apenas para verificação do comportamento intermediário do papel. A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam, respectivamente, os valores experimentais do grau de polimerização médio viscosimétrico obtidos para as seis amostras ao longo do fluxo fabril e os percentuais de redução proporcional calculados entre cada marco de processo. A Figura 9 apresenta visualmente essa variação.

Tabela 6 – Grau de polimerização do papel novo (fornecedor) e nas etapas de pré-secagem (PS), pós-secagem em estufa e pós-fase de vapor (VP).

Lote	GP novo	GP PS	GP pós-sec.	GP VP
1	1329	1134±30	1044±34	998±16
2	1329	1017±21	992±14	963±30
3	1329	1116±17	1028±25	994±24
4	1329	1048±31	975±33	954±36
5	1329	1004±27	984±31	979±29
6	1329	1104±40	1094±28	1064±33

Tabela 7 – Percentual de redução do grau de polimerização entre as etapas do fluxo fabril.

Lote	% red. novo→PS	% red. PS→pós-sec.	% red. pós-sec.→VP
1	14,67	7,94	4,41
2	23,48	2,46	2,92
3	16,03	7,89	3,31
4	21,14	6,97	2,15
5	24,45	1,99	0,51
6	16,93	0,91	2,74

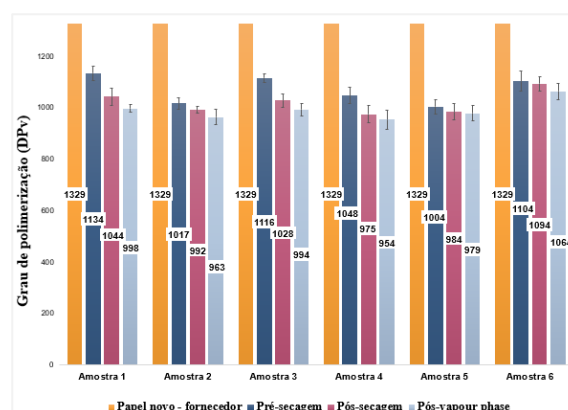


Figura 9 – Grau de polimerização por amostra e por etapa do fluxo fabril.

Um ponto fundamental que precede a análise diz respeito à divergência entre o GP nominal estipulado pelo fornecedor (1329) e os valores quantificados no estágio de pré-secagem, que se situaram entre 1004 ± 27 (amostra 5) e 1134 ± 30 (amostra 1). Essa diferença não decorre de degradação real do isolante antes de sua entrada na linha de produção: o fabricante executa o ensaio de controle de qualidade viscosimétrico diretamente na polpa de celulose virgem e purificada, em estado de pureza molecular ideal, sem as interações físicas da estrutura final do papel. Ao ser processada industrialmente, a celulose recebe aditivos nitrogenados de termoestabilização, passa por calandragem e etapas de acabamento que alteram sua densidade e compactação, interferindo na solubilização e na viscosidade da solução de etilenodiamina cúprica durante o ensaio regulamentado pela ABNT NBR IEC 60450. Por isso, para fins de avaliação da cinética de envelhecimento, a linha de base deste estudo adota estritamente os valores obtidos no estágio de pré-secagem na fábrica.

A partir desse marco inicial, as etapas subsequentes de processamento térmico exibiram taxas de degradação brandas e controladas. Entre a pré-secagem e a pós-secagem em estufa



(encolunamento), a redução do GP manteve-se sutil na maioria dos lotes, com taxas inferiores a 3% nas amostras 2 (2,46%), 5 (1,99%) e 6 (0,91%). Na transição final para o estágio pós-VP, os valores de GP consolidaram-se acima de 950 em todas as amostras, variando de 954 ± 36 (amostra 4) a 1064 ± 33 (amostra 6); a taxa de redução específica gerada unicamente pelo ciclo severo de VP foi baixa, atingindo o patamar mínimo de 0,51% na amostra 5 e não ultrapassando 4,41% na amostra 1. Essa desaceleração comprova a alta eficiência operacional do processo de secagem industrial e a eficácia da aditivação do papel termoestabilizado: embora o patamar térmico de $\sim 125^\circ\text{C}$ pudesse, em condições atmosféricas normais, acelerar drasticamente a quebra das ligações glicosídicas por termo-hidrólise, a aplicação de vácuo severo remove de forma acelerada a umidade higroscópica, agente coparticipante da hidrólise, eliminando o caminho cinético de degradação. A manutenção dos valores de GP em patamares elevados (>950) corrobora os resultados de FTIR-ATR, nos quais se constatou ausência total de picos de carbonila.

O mapeamento do GP permite analisar o comportamento micro-macroestrutural de todas as amostras. As amostras 1 e 2 apresentaram quedas moderadas de GP no pós-VP (4,41% e 2,92%, respectivamente), associadas ao relaxamento de tensões residuais (efeito *spring-back*) já evidenciado nos ensaios mecânicos e morfológicos: o ganho de mobilidade conformacional das cadeias para aliviar a energia elástica acumulada resultou em sutil quebra de ligações poliméricas. As amostras 3, 4 e 6 consolidaram o mecanismo puro de compactação por cornificação, em que a remoção profunda da água modificou as paredes das fibras de forma irreversível, mantendo as cadeias estáveis e protegidas por novas pontes de hidrogênio intramoleculares. Já a amostra 5 apresentou comportamento singular de estabilização de GP no pós-VP (979 ± 29 , variação de apenas 0,51%): apesar do escurecimento localizado na colorimetria devido ao elevado teor de umidade inicial, os dados de GP provam que esse estresse hidrolítico ficou restrito a frações superficiais amorfas, sem comprometer a massa molecular do esqueleto de celulose cristalina principal. De acordo com as diretrizes normativas e relatórios técnicos internacionais (ABNT NBR IEC 60450; CIGRE TB 730, 2018; CIGRE TB 982, 2026), o fim da vida útil mecânica e dielétrica do papel kraft em transformadores é atingido quando o GP decresce ao limite crítico de 200 a 250. A retenção de valores na faixa de 950 a 1060 ao final de todo o fluxo fabril atesta que o isolante sólido ingressará em operação em campo com excelente integridade estrutural, garantindo ampla margem de segurança contra esforços de curto-circuito e assegurando a

confiabilidade de longo prazo dos equipamentos de alta potência.

CONCLUSÃO

O trabalho avaliou com sucesso o impacto do fluxo produtivo industrial (pré-secagem, estufa e fase de vapor) sobre o papel isolante kraft termoestabilizado de transformadores e reatores de alta potência, combinando análises físicas, morfológicas (MEV), espectroscópicas (FTIR) e moleculares (GP). Os métodos de secagem da fábrica removem eficientemente a umidade residual, fator de degradação na estrutura core da celulose; a ausência de picos de carbonila no FTIR-ATR confirmou a total segurança térmica dos ciclos. Identificaram-se dois fenômenos microestruturais concorrentes entre as amostras: o efeito *spring-back* e a cornificação.

O efeito *spring-back* (alívio de tensões) foi observado nos lotes 1 e 2, nos quais o calor provocou o relaxamento das tensões elásticas acumuladas nos condutores, expandindo ligeiramente a espessura e causando perda de GP de até 4,41%. A cornificação, por sua vez, predominou nos lotes 3, 4 e 6, nos quais a remoção profunda de água modificou as paredes das fibras de forma irreversível, gerando estrutura compacta, com ganho de luminosidade na colorimetria e alta estabilidade de GP devido à formação de novas pontes de hidrogênio. Mesmo com alto teor de umidade inicial (10,9%) e escurecimento superficial localizado, a amostra 5 manteve sua estrutura cristalina principal intacta, variando apenas 0,51% no pós-VP.

Conclui-se que o processo industrial de secagem por fase de vapor desidrata o isolante com eficácia, mitiga a reabsorção de umidade e assegura a confiabilidade mecânica e elétrica do sistema, preservando valores de grau de polimerização superiores a 950, muito acima do limite crítico de 200 a 250 que caracteriza o fim da vida útil técnica do papel kraft. Os resultados reforçam a importância do monitoramento integrado de propriedades físicas, morfológicas, ópticas e moleculares para a gestão da qualidade industrial e para a previsão da suportabilidade dielétrica de transformadores e reatores de potência ao longo de sua vida operacional.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece aos laboratórios LaCer e LaPol da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela estrutura e pelo auxílio na execução dos ensaios deste trabalho, e à equipe técnica que acompanhou a coleta das amostras industriais.



REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60450:2012: Papel isolante celulósico novo para fins elétricos – Medição do grau de polimerização viscosimétrico médio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 28 p.

CIGRE. Technical Brochure 982: Changes of new unused insulating kraft paper properties during drying: impact on DP measurements. Paris: Reference Papers Working Group, 2026.

DE PABLO, A. Degree of polymerization as a tool for transformer insulation condition assessment. In: CIGRE SC A2 COLLOQUIUM, 2017, Cracóvia. Proceedings. Cracóvia: CIGRE, 2017. p. 1-12.

HILL, Callum A. S. Chemical Modification of Lignocellulosic Materials. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 2010. 360 p.

LUKIC, M. et al. Impact of Vapour Phase Drying on the Degree of Polymerization of Transformer Insulation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 28, n. 4, p. 1245-1252, ago. 2021.

MALAQUIAS, Paulo Eduardo. Estudo da degradação do papel isolante através de ensaios de envelhecimento. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

MARTINS, Maria Augusta G. Estudo da migração de umidade em transformadores de potência. 2010. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MCNEIL, A. J. et al. Morphology of insulating paper fibers: A SEM study. Journal of Materials Science, v. 54, n. 12, p. 8911-8923, 2019.

TAMURA, Leandro Fumio. Análise de falhas e vida útil de transformadores de potência. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

TAZHIBAYEV, B. et al. Comparative analysis of insulation drying methods in power transformers manufacturing. Journal of Electrical Engineering & Technology, v. 19, n. 1, p. 88-97, jan. 2024.

WOLMARANS, H. P. et al. The influence of water content and ageing degree of paper insulation on its mechanical strength. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 28, n. 4, p. 1350-1358, 2021.