

CARACTERIZAÇÃO DOS EXTRATIVOS DA MADEIRA E SEUS IMPACTOS NA QUALIDADE DA POLPA KRAFT

Letícia Gabriele Crespilho Abel¹, Danyella Perissotto¹, Larisse Aparecida Ribas Batalha², Roberto Carlos Costa Lelis², Rosane Nora Castro², Douglas Chaves de Alcântara Pinto²

¹ Solenis Especialidades Químicas¹, Paulínia-SP, Brasil

² Universidade Federal Rural de Rio de Janeiro (UFRRJ), Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

A presença de extrativos da madeira no processo de produção de celulose kraft constitui um dos principais desafios operacionais da indústria de celulose devido à sua participação na formação de depósitos conhecidos como pitch. Esses depósitos podem provocar incrustações em equipamentos, perdas de eficiência operacional e defeitos na folha de celulose comercial. O presente estudo avaliou o comportamento dos extrativos ao longo do processo kraft de eucalipto e investigou sua relação com a formação de sujidades em duas fábricas brasileiras de celulose. Foram analisadas amostras de cavacos, polpa marrom, polpa branqueada, celulose final e depósitos coletados nas folhas produzidas. Os extrativos foram quantificados por extração em diclorometano e caracterizados por FTIR e Pi-CG/MS. As sujidades foram avaliadas por FTIR e EDS. Os resultados mostram redução dos extrativos durante o cozimento e branqueamento; porém, evidenciaram a persistência de compostos lipofílicos hidrofóbicos, principalmente hidrocarbonetos alifáticos de cadeia longa, ácidos graxos e derivados esteroidais. A caracterização dos depósitos revelou composição orgânica associada a extrativos da madeira e participação de componentes minerais, especialmente magnésio e cálcio na Fábrica A e silício na Fábrica B. Os resultados indicam que a formação de pitch está diretamente relacionada à interação entre extrativos residuais e espécies inorgânicas presentes no processo.

Palavras-chave: extrativos; pitch; celulose kraft; eucalipto.

INTRODUÇÃO

A madeira de eucalipto contém diferentes classes de extrativos, incluindo ácidos graxos, esteróis, hidrocarbonetos, ceras e compostos fenólicos, que podem ser parcialmente removidos durante as etapas de cozimento e branqueamento da polpa. No entanto, uma fração desses compostos pode permanecer no processo, sendo transportada ao longo da linha de produção e favorecendo a formação de depósitos orgânicos quando associada a partículas finas, fibras e espécies inorgânicas. Dessa forma, o entendimento do comportamento dos extrativos ao longo do processo kraft é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de controle de depósitos e para a melhoria da eficiência operacional das fábricas de celulose (DEUS, 2022; VIEIRA *et al.*, 2021; GAO; CUI; MATSUMURA, 2024; SIAHA *et al.*, 2023).

A presença de extrativos da madeira no processo de produção de celulose kraft constitui um dos principais desafios operacionais da indústria de celulose devido à sua participação na formação de depósitos conhecidos como pitch. Esses depósitos podem provocar incrustações em equipamentos, perdas de eficiência operacional e defeitos na folha de celulose comercial (HUBBE; VENDITTI; HEITMANN, 2021; MANDA *et al.*, 2021; PINTO; LISBOA; COLODETTE, 2022).

O presente estudo avaliou o comportamento dos extrativos ao longo do processo kraft de eucalipto e investigou sua relação com a formação de sujidades em duas fábricas brasileiras de celulose. Foram analisadas amostras de cavacos, polpa marrom, polpa branqueada, celulose final e depósitos coletados nas folhas produzidas. Os extrativos foram quantificados por extração em diclorometano e caracterizados por FTIR e Pi-CG/MS. As sujidades foram avaliadas por FTIR e EDS.

Os resultados mostraram redução expressiva dos extrativos durante o cozimento e branqueamento; porém, evidenciaram a persistência de compostos lipofílicos hidrofóbicos, principalmente hidrocarbonetos alifáticos de cadeia longa, ácidos graxos e derivados esteroidais. A caracterização dos depósitos revelou composição orgânica associada a extrativos da madeira e participação de componentes minerais, especialmente magnésio e cálcio na Fábrica A e silício na Fábrica B. Os resultados indicam que a formação de pitch está diretamente relacionada à interação entre extrativos residuais e espécies inorgânicas presentes no processo.

METODOLOGIA

O estudo foi conduzido a partir da coleta de amostras em duas unidades industriais produtoras de celulose kraft de eucalipto. As unidades avaliadas estão localizadas nas regiões Sul e Centro-Oeste do Brasil, sendo denominadas, como Fábrica A e Fábrica B, respectivamente. A coleta das amostras na Fábrica A foi realizada em julho de 2025, enquanto na Fábrica B ocorreu em junho de 2025.

Foram coletadas amostras de cavacos de madeira, polpa marrom, polpa branqueada e celulose final, além de sujidades presentes na folha de celulose final. A **Tabela 1** apresenta os pontos de coleta das amostras ao longo do processo produtivo.

As amostras foram avaliadas quanto aos teores de extrativos em diclorometano, cinzas, número kappa, viscosidade, pentosanas e metais por ICP-OES. Para caracterização química dos

Tabela 1. Ponto de coleta das fábricas

Amostra	Ponto de coleta
Cavaco	Pátio de madeira e após classificação
Polpa marrom	Entrada da Deslignificação
Polpa branqueada	Saída EOP
Celulose final	Saída do enfardamento
Sujidade na celulose final	Saída do enfardamento

Fonte: elaborado pelos autores

extrativos foram empregadas espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Pi-CG/MS). As sujidades foram avaliadas por FTIR e por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Resultado Fábrica A

A Fábrica A, localizada na região Sul do Brasil, possui capacidade produtiva de 1.000 adt/dia e utiliza um processo kraft baseado em digestor contínuo Kamyr de baixo teor de sólidos, seguido de depuração, deslignificação com oxigênio, lavagem, branqueamento DHot-EP-D₁ e secagem. O estudo avaliou a evolução dos componentes orgânicos e inorgânicos ao longo do processo produtivo, desde o cavaco até a celulose final, buscando identificar possíveis precursores da formação de depósitos de pitch. A **Tabela 2** mostra a caracterização físico-química das amostras.

Os resultados físico-químicos demonstraram redução significativa dos extrativos em diclorometano (DCM), passando de 0,335% no cavaco para 0,082% na polpa marrom, evidenciando a eficiência do cozimento kraft na remoção de compostos lipofílicos. Após o branqueamento, o teor foi reduzido para 0,056%, apresentando pequeno aumento na polpa final (0,067%), possivelmente relacionado às diferenças de amostragem e ao tempo de retenção da polpa no processo.

Tabela 2. Caracterização físico-química das amostras da Fábrica A

Parâmetro	Cavaco	Polpa Marrom	Polpa Branqueada	Celulose Final
Extrativos em DCM (%)	0,335	0,082	0,056	0,067
Cinzas 575 °C (%)	0,390	1,230	1,590	0,520
Cinzas 900 °C (%)	0,370	0,690	1,040	0,480
Número Kappa	—	11,95	1,01	0,62
Viscosidade(cm ³ /g)	—	1050	738	710
Pentosanas (%)	17,03	15,77	16,07	16,65

Fonte: elaborado pelos autores

O número kappa apresentou queda acentuada de 11,95 na polpa marrom para 1,01 na polpa branqueada e 0,62 na celulose final, demonstrando elevada eficiência na remoção da lignina residual ao longo das etapas de deslignificação e branqueamento. Da mesma forma, a viscosidade reduziu de 1050 cm³/g para 738 cm³/g após o branqueamento e 710 cm³/g na polpa final, comportamento esperado em decorrência da degradação parcial das cadeias celulósicas durante as etapas oxidativas. Apesar dessa redução, os valores permaneceram dentro da faixa normalmente observada para polpas kraft branqueadas de eucalipto.

O teor de pentosanas diminuiu do cavaco (17,03%) para a polpa marrom (15,77%), refletindo a dissolução parcial das hemiceluloses durante o cozimento alcalino. Posteriormente, observou-se leve aumento nas amostras branqueada (16,07%) e final (16,65%), indicando preservação relativa dessas estruturas após o branqueamento.

As análises de metais evidenciaram aumento da fração inorgânica da polpa após o cozimento kraft. Os maiores destaques foram os elevados teores de sódio, que aumentaram de 268,8 ppm no cavaco para 4.195,9 ppm na polpa marrom e 4.757,7 ppm na polpa branqueada. Paralelamente, observou-se aumento dos teores de cinzas, indicando incorporação de sais inorgânicos provenientes dos reagentes do cozimento e do branqueamento. Na polpa final ocorreu redução significativa desses elementos, evidenciando a eficiência das etapas de lavagem. A **Tabela 3** mostra esses dados.

Tabela 3 – Caracterização físico-química das amostras da Fábrica A

Componente (ppm)	Cavaco	Polpa Marrom	Polpa Branqueada	Celulose Final
Alumínio	23,3	18,0	20,2	19,4
Cálcio	467,0	524,8	119,1	57,6
Ferro	14,6	13,2	9,5	10,1
Fosfato	1389,0	1187,6	1190,4	1324,7
Fósforo	449,5	384,4	377,2	428,7
Magnésio	138,9	62,3	124,3	85,3
Manganês	23,6	37,7	10,5	1,5
Potássio	408,8	85,7	44,8	12,1
Sílica	49,5	146,7	140,3	137,4
Sódio	268,8	4195,9	4757,7	854,7

Fonte: elaborado pelos autores

As análises por FTIR mostraram que o cavaco apresentou elevada concentração de hidrocarbonetos alifáticos, ácidos graxos, compostos fenólicos, ésteres e esteróis. Após o cozimento kraft houve redução significativa de ácidos graxos, fenólicos e ésteres devido à saponificação e solubilização no licor negro. Entretanto, bandas associadas a hidrocarbonetos alifáticos de cadeia longa permaneceram evidentes em todas as etapas, in-

dicando maior resistência desses compostos às condições do processo, comportamento já descrito para frações lipofílicas hidrofóbicas remanescentes em sistemas kraft (SIXTA *et al.*, 2017; HUBBE; VENDITTI; HEITMANN, 2021). Os espectros de FTIR dos extratos da Fábrica A são apresentados na **Figura 1**, e a interpretação dos principais grupos funcionais identificados em cada etapa está sumarizada na **Tabela 4**.

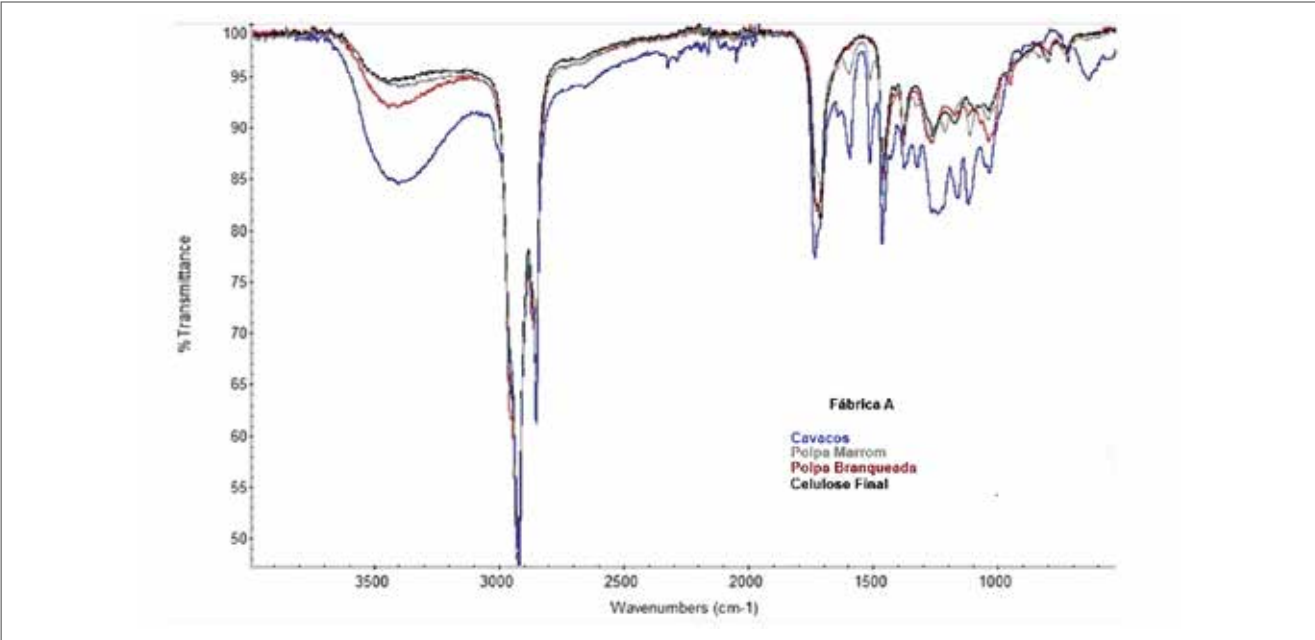


Figura 1. Espectros de FTIR dos extratos das amostras da Fábrica. Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 4. Caracterização físico-química das amostras da Fábrica A

Amostra	Componente	Banda (cm ⁻¹)	Atribuição	Concentração
Cavaco	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2923, 2850, 1465, 1377, 723	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Maior
	Ácidos Graxos	~1712	C=O	Maior
	Extrativos fenólicos/Taninos	~1595, 1514	C=C aromático, C-O fenólico	Média
	Ésteres Orgânicos	~1735, 1118, 1058	C=O (éster), C-O, C-O-C	Maior
	Esteróis	~1268, 830	C-O	Média
Polpa Marrom	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2923, 2850, 1464, 1378, 723	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Maior
	Ácidos Graxos	~1715	C=O	Menor
	Extrativos fenólicos/Taninos	~1595, 1514	C=C aromático, C-O fenólico	Média
	Ésteres Orgânicos	~1732, 1120, 1055	C=O (éster), C-O, C-O-C	Menor
	Esteróis	~1264, 792	C-O	Menor
Polpa Branqueada	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2923, 2850, 1464, 1378, 731	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Média
	Ácidos Graxos	~1711	C=O	Média
	Extrativos fenólicos/Taninos	~1595, 1514	C=C aromático, C-O fenólico	Menor
	Ésteres Orgânicos	~1731, 1100, 1020	C=O (éster), C-O, C-O-C	Média
	Esteróis	~1262, 800	C-O	Menor
Celulose Final	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2923, 2850, 1464, 1378, 730	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Média
	Ácidos Graxos	~1712	C=O	Média
	Ésteres Orgânicos	~1732, 1100, 1023	C=O (éster), C-O, C-O-C	Média
	Esteróis	~1261, 803	C-O	Menor

Fonte: elaborado pelos autores

Os resultados de GC-MS corroboraram as observações obtidas por FTIR. O cavaco apresentou elevada diversidade de compostos lipofílicos, principalmente ácidos graxos, hidrocarbonetos esteroi-dais e esteróis. Após o cozimento, observou-se redução dos ácidos graxos livres e aumento relativo de cetonas esteroisdais e hidrocar-bonetos derivados de esteróis. Durante o branqueamento ocorreu incremento desses derivados oxidativos, sugerindo que parte dos esteróis foi convertida em compostos mais estáveis. Apesar de re-duzidos na celulose final, esses compostos permaneceram detec-táveis, evidenciando potencial contribuição para a formação de pitch. Esse comportamento é consistente com a literatura, que descreve a remoção preferencial dos extrativos mais reativos durante o cozimento kraft e a persistência de hidrocarbonetos, esteróis e derivados esteroisdais mais resistentes ao longo das etapas de bran-queamento e acabamento da celulose (SIXTA *et al.*, 2017; GAO;

CUI; MATSUMURA, 2024; HUBBE; VENDITTI; HEITMANN, 2021). A **Figura 2** apresenta os cromatogramas obtidos por Pi-CG/MS para as quatro etapas do processo da Fábrica. A caracterização das sujidades da folha de celulose revelou composição mista. As análises por FTIR identificaram hidro-carbonetos alifáticos, compostos fenólicos, derivados esteroisdais, fibras celulósicas e possíveis materiais minerais. Os resultados de EDS mostraram predominância de magnésio e silício na Sujidade 1 e predominância de cálcio na Sujidade 2, indican-do participação importante dos componentes inorgânicos. As **Tabelas 5 e 6** mostram os resultados das principais atribuições dos dois defeitos da Fábrica A analisados por FTIR e por EDS. De maneira geral, os resultados da Fábrica A demonstram que o processo kraft remove grande parte dos extrativos da madeira; porém, compostos hidrofóbicos mais resistentes, es-

Tabela 5. FTIR dos defeitos da Fábrica A

Amostra	Componente	Banda (cm ⁻¹)	Atribuição	Concentração
Sujidade 1	Hidroxilas estruturais	~3640	O–H estrutural (Mg–OH)	Média
	Hidrocarbonetos alifáticos	~2896, 1422, 1354	C–H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Maior
	Compostos aromáticos / fenólicos	~1618	C=C aromático	Média
	Estruturas aromáticas / minerais	~598	vibração fora do plano ou Si–O	Menor
Sujidade 2	Hidrocarbonetos alifáticos	~1452, 1353	deformação C–H (CH ₂ , CH ₃)	Média
	Compostos esteroisdais	~1298	C–O, C–H	Média
	Éteres e álcoois	~1204, 1181	C–O–C / C–O	Média
	Polissacarídeos (celulose)	~1006	estiramento C–O / C–O–C	Maior

Fonte: elaborado pelos autores

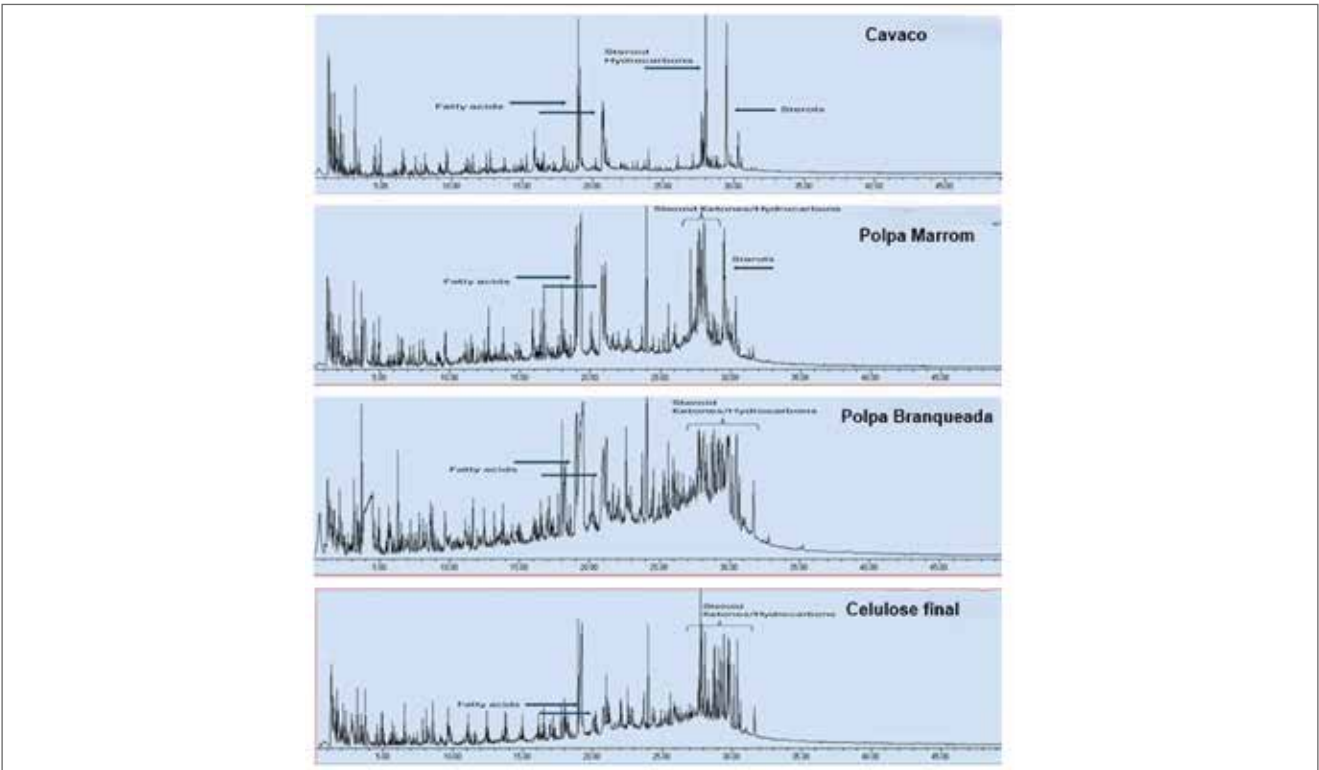


Figura 2. Cromatogramas de Pi-CG/MS das amostras da Fábrica A
Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 6. EDS dos defeitos da Fábrica A

Amostra	Elemento	Composição
Sujidade 1	Magnésio	Majoritário
	Silício	Minoritário
	Alumínio	Traço
	Cálcio	Traço
	Ferro	Traço
	Fósforo	Traço
Sujidade 2	Enxofre	Traço
	Cálcio	Predominante
	Fósforo	Minoritário
	Magnésio	Traço
	Sódio	Traço

Fonte: elaborado pelos autores

pecialmente hidrocarbonetos alifáticos e derivados esteroidais, permanecem associados às fibras até as etapas finais do processo. A interação desses compostos com metais presentes no sistema favorece a formação de agregados e depósitos de pitch, manifestados como sujidades na folha de celulose.

2. Resultados da Fábrica B

A Fábrica B, localizada na região Centro-Oeste Sul do Brasil, apresenta capacidade produtiva de 6.200 adt/dia. O processo utiliza vaporização contínua Diamondback, digestor Lo-Solids, deslignificação com oxigênio em dois reatores, múltiplos estágios de lavagem e branqueamento D₀-EOP-D₁-P, seguido de secagem. A **Tabela 7** mostra a caracterização físico-química das amostras.

Tabela 7. Caracterização físico-química das amostras da Fábrica B

Parâmetro	Cavaco	Polpa Marrom	Polpa Branqueada	Celulose Final
Extrativos em DCM (%)	0,473	0,230	0,050	0,055
Cinzas 575 °C (%)	0,320	6,766	0,763	0,357
Cinzas 900 °C (%)	0,284	5,080	0,530	0,291
Número Kappa	—	13,65	1,90	0,60
Viscosidade (cm ³ /g)	—	1261	717	740
Pentosanas (%)	16,34	16,93	17,04	16,75

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 8. Caracterização físico-química das amostras da Fábrica B

Componente (ppm)	Cavaco	Polpa Marrom	Polpa Branqueada	Celulose Final
Alumínio	23,6	30	11,8	11,9
Cálcio	372,1	616,2	87,8	88,7
Ferro	21,1	16	9,9	10,3
Fosfato	1507,3	1623,8	1273,4	1630
Fósforo	487,8	525,5	412,1	527,5
Magnésio	129,2	100,5	95,6	48
Manganês	28,3	20,9	1,7	1,0
Potássio	667,8	1554,9	33,5	16,6
Silica	214,5	251,5	171,2	180,8
Sódio	232,2	25095,3	2912,1	1408,7

Fonte: elaborado pelos autores

Os resultados físico-químicos indicaram redução progressiva dos extrativos em DCM, passando de 0,473% no cavaco para 0,230% na polpa marrom, 0,050% após o branqueamento e 0,055% na polpa final. Esse comportamento confirma a elevada eficiência das etapas de cozimento, lavagem e branqueamento na remoção de compostos lipofílicos.

Os teores de cinzas apresentaram comportamento distinto. Enquanto cavaco, polpa branqueada e polpa final mostraram valores típicos para celulose kraft, a polpa marrom apresentou teores extremamente elevados (6,766% a 575 °C e 5,080% a 900 °C), indicando forte retenção de licor negro e sais inorgânicos oriundos do cozimento. Esse resultado foi reforçado pela elevada quantidade de resíduos observada após a análise de cinzas.

O número kappa reduziu de 13,65 na polpa marrom para 1,90 após o branqueamento e 0,60 na polpa final, evidenciando elevada eficiência da sequência de branqueamento. A viscosidade apresentou redução de 1261 cm³/g para 717 cm³/g após o branqueamento, permanecendo em níveis adequados para polpas branqueadas de eucalipto. Em relação às pentosanas, os valores permaneceram estáveis durante todo o processo, indicando boa preservação das hemiceluloses.

As análises de metais mostraram comportamento semelhante ao observado para as cinzas. O sódio alcançou valores extremamente elevados na polpa marrom (25.095,3 ppm), reduzindo posteriormente para 2.912,1 ppm na polpa branqueada e 1.408,7 ppm na polpa final. Também foram observadas concentrações significativas de potássio, cálcio e sílica, principalmente na polpa marrom, refletindo a influência dos reagentes químicos do processo kraft. A **Tabela 8** apresenta esses dados.

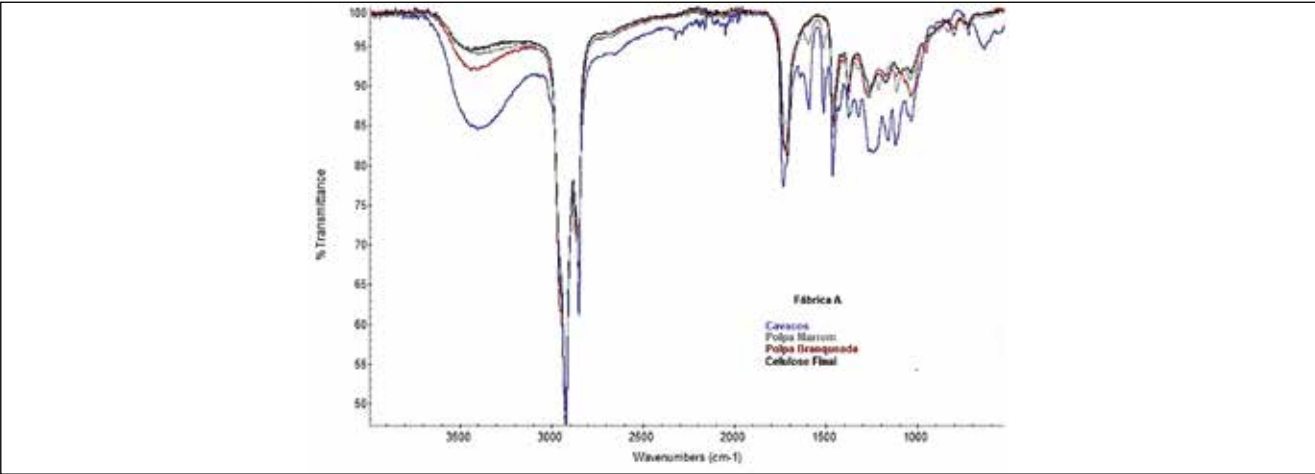


Figura 3. Espectros de FTIR dos extratos das amostras da Fábrica B.
Fonte: elaborado pelos autores

As análises por FTIR indicaram intensa presença de hidrocarbonetos alifáticos, ácidos graxos, compostos fenólicos, ésteres e esteróis no cavaco. Após o cozimento ocorreu redução significativa dos compostos mais reativos, enquanto os hidrocarbonetos alifáticos permaneceram em elevada intensidade. Durante o branqueamento observou-se aumento relativo dos sinais associados aos ácidos graxos, ésteres e derivados esteroidais, sugerindo transformações oxidativas que geram compostos mais estáveis. As análises por FTIR indicaram intensa presença de hidrocarbonetos alifáticos, ácidos graxos, compostos fenólicos, ésteres e esteróis no cavaco. Após o cozimento ocorreu redução significativa dos compostos mais reativos, enquanto os hidrocarbonetos alifáticos permaneceram em elevada intensi-

dade. Durante o branqueamento observou-se aumento relativo dos sinais associados aos ácidos graxos, ésteres e derivados esteroidais, sugerindo transformações oxidativas que geram compostos mais estáveis. Esse comportamento está de acordo com estudos que descrevem a remoção preferencial dos extrativos mais reativos durante o cozimento kraft e a persistência de frações lipofílicas hidrofóbicas, especialmente hidrocarbonetos e derivados esteroidais, ao longo das etapas subsequentes do processo (SIXTA *et al.*, 2017; GAO; CUI; MATSUMURA, 2024; HUBBE; VENDITTI; HEITMANN, 2021).

Os espectros de FTIR dos extratos da Fábrica B são apresentados na **Figura 3**, e a interpretação dos principais grupos funcionais identificados em cada etapa está sumarizada na **Tabela 9**.

Tabela 9. Caracterização físico-química das amostras da Fábrica B

Amostra	Componente	Banda (cm ⁻¹)	Atribuição	Concentração
Cavaco	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2920, 2849, 1465, 1377, 725	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Maior
	Ácidos Graxos	~1707	C=O	Maior
	Compostos aromáticos fenólicos	~1595, 1514	C=C aromático, C-O fenólico	Maior
	Ésteres Orgânicos	~1736, 1115	C=O (éster), C-O, C-O-C	Maior
	Esteróis	~1273, 800	C-O	Média
Polpa Marrom	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2920, 2849, 1464, 1378, 723	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Maior
	Ácidos Graxos	~1713	C=O	Menor
	Compostos aromáticos fenólicos	~1596, 1514	C=C aromático, C-O fenólico	Média
	Ésteres Orgânicos	~1733, 1115	C=O (éster), C-O, C-O-C	Menor
	Esteróis	~1264, 794	C-O	Menor
Polpa Branqueada	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2920, 2849, 1464, 1379, 722	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Maior
	Ácidos graxos	~1707	C=O	Média
	Ésteres Orgânicos	~1727, 1100, 1042	C=O (éster), C-O, C-O-C	Média
	Esteróis	~1261, 802	C-O	Menor
Celulose Final	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2920, 2849, 1464, 1379, 724	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Média
	Ácidos graxos	~1713	C=O	Média
	Ésteres Orgânicos	~1732, 1100, 1022	C=O (éster), C-O, C-O-C	Média
	Esteróis	~1261, 801	C-O	Média
	Hidrocarbonetos Alifáticos	~2920, 2849, 1465, 1377, 725	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Maior

Fonte: elaborado pelos autores

Os resultados de GC-MS confirmaram essas observações. O cavaco apresentou grande diversidade de extrativos lipofílicos, incluindo ácidos graxos, esteróis e hidrocarbonetos esteroideais. Após o cozimento houve redução dos compostos mais suscetíveis à solubilização alcalina, enquanto os derivados esteroideais permaneceram predominantes. No branqueamento, observou-se aumento relativo de cetonas esteroideais e outros compostos oxidativos mais estáveis. Mesmo na celulose final esses compostos continuaram detectáveis, indicando elevada resistência às condições químicas do processo. Esse comportamento é consistente com a literatura, que relata a transformação parcial dos esteróis em derivados oxidados mais estáveis durante as etapas de processamento e a permanência de compostos lipofílicos associados ao potencial de formação de pitch em sistemas kraft (VEK *et al.*, 2024; GAO; CUI; MATSUMURA, 2024; PINTO; LISBOA; COLODETTE, 2022). A Figura 2 apresenta os cromatogramas obtidos por Pi-CG/MS para as quatro etapas do processo da Fábrica.

A caracterização das sujidades também indicou importante participação de extrativos lipofílicos. A Sujidade 1 apresentou

bandas associadas à celulose e a hidrocarbonetos alifáticos, além de predominância de silício detectada por EDS. Já a Sujidade 2 mostrou forte presença de hidrocarbonetos alifáticos, grupos carbonila de ácidos graxos e compostos fenólicos, com baixa contribuição de elementos inorgânicos. As Tabelas 10 e 11 mostram os resultados das principais atribuições dos dois defeitos da Fábrica A analisados por FTIR e por EDS.

De modo geral, a Fábrica B apresentou comportamento semelhante ao observado na Fábrica A. Embora o cozimento kraft e o branqueamento promovam remoção significativa dos extrativos da madeira, compostos hidrofóbicos mais estáveis, especialmente hidrocarbonetos alifáticos e derivados esteroideais, persistem até a celulose final. A combinação desses compostos com íons metálicos e partículas minerais favorece processos de agregação e formação de depósitos de pitch, que posteriormente se manifestam como sujidades na folha de celulose.

CONCLUSÃO

O processo kraft promoveu redução significativa dos extrativos presentes na madeira, especialmente nas etapas de cozimento alcalino e branqueamento. Entretanto, compostos

Tabela 10. FTIR dos defeitos da Fábrica B

Amostra	Componente	Banda (cm ⁻¹)	Atribuição	Concentração
Sujidade 1	Hidrocarbonetos alifáticos	~1482	deformação C-H (CH ₂)	Menor
	Polissacarídeos (celulose)	~1104, 1080	estiramento C-O / C-O-C	Média
	Estrutura da celulose	~801	deformação β-glicosídica	Menor
Sujidade 2	Hidrocarbonetos alifáticos	~2896, 2852, 1452, 1353	C-H alifático (CH ₂ , CH ₃)	Maior
	Ácidos graxos / ésteres	~1708	C=O (carbonila)	Média
	Compostos aromáticos / fenólicos	~1618	C=C aromático (lignina / fenólicos)	Menor

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 11. EDS dos defeitos da Fábrica B

Amostra	Elemento	Composição
Sujidade 1	Silício	Predominante
	Alumínio	Traço
	Cromo	Traço
	Ferro	Traço
	Magnésio	Traço
	Titânio	Traço
Sujidade 2	Alumínio	Traço
	Ferro	Traço
	Silício	Traço
	Sódio	Traço
	Titânio	Traço

Fonte: elaborado pelos autores.

lipofílicos hidrofóbicos e estruturalmente resistentes permaneceram presentes até a celulose final.

As análises químicas indicaram que hidrocarbonetos alifáticos de cadeia longa, ácidos graxos e derivados esteroidais representam as principais frações persistentes dos extrativos. Tais compostos demonstraram forte associação com a formação de depósitos observados nas folhas de celulose.

A caracterização das sujidades confirmou a presença de pitch em ambas as fábricas estudadas. A Fábrica

A apresentou maior contribuição de magnésio e cálcio, sugerindo participação mais intensa de constituintes minerais, enquanto a Fábrica B apresentou depósitos predominantemente orgânicos com menor contribuição inorgânica.

Os resultados demonstram que a interação entre extrativos residuais e espécies minerais presentes no processo constitui um fator determinante para a formação de depósitos e defeitos em celulose kraft de mercado. ■

REFERÊNCIAS

- DEUS, D. A. *et al.* Lignina: uma importante tecnologia química da madeira. *E-Acadêmica, e-Acadêmica*, v. 3, n. 3, e7233391, 2022.
- GAO, C.; CUI, X.; MATSUMURA, J. *Multidimensional Exploration of Wood Extractives*. *Forests*, 15(10), 1782, 2024.
- HUBBE, M. A.; VENDITTI, R. A.; HEITMANN, J. A. *Deposit problems in papermaking: A critical review*. *BioResources*, 2021.
- MANDA, B. M. K. *et al.* *Recent advances in pitch control strategies in pulping and papermaking*. *BioResources*, 2021.
- PINTO, F.; LISBOA, M. H.; COLODETTE, J. L. Organic and inorganic deposit formation in kraft pulping and bleaching systems. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2022.
- SIAHA, W. *et al.* Influence of Sapwood/Heartwood and Drying Temperature on the Extractive Content and Chemical Composition of Pine Wood. *Journal of Wood Science*, 2023.
- SIXTA, R. *et al.* Detailed modeling of the kraft pulping chemistry: carbohydrate degradation. *AIChE Journal*, v. 63, n. 5, p. 1464-1477, 2017.
- VEK, V. *et al.* Analysis of extractives in wood samples using GC-MS techniques. *Drvna Industrija*, 75(4), p. 457-468, 2024.
- VIEIRA, T. A. S. *et al.* Determination of the Chemical Composition of Eucalyptus Wood Extractives. *Forests*, 12(12), 1649, 2021.

revista
Opapel[®]

Indispensável para sua empresa
alavancar resultados e fortalecer
sua imagem no mercado.

Para assinar ou anunciar:
relacionamento@abtcp.org.br

Siga-nos

