

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

JOICE PEREIRA DINIZ

**Caracterização e aplicação da lignina da palha de milho como coagulante e auxiliar
de coagulação orgânico na remoção da turbidez de água**

Buri,
2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

Joice Pereira Diniz

**Caracterização e aplicação da lignina da palha de milho como coagulante e auxiliar
de coagulação orgânico na remoção da turbidez de água**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Ambiental na Universidade Federal
de São Carlos.

Orientação: Prof.^a Dr.^a Andreia Pereira Matos
Coorientação: Prof.^a Dr.^a Beatriz Cruz Gonzalez

Buri,

2026

Diniz, Joice Pereira

Caracterização e aplicação da lignina da palha de milho como coagulante e auxiliar de coagulação orgânico na remoção da turbidez de água / Joice Pereira Diniz -- 2026.
71f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri
Orientador (a): Andreia Pereira Matos
Banca Examinadora: Gabriela Laila de Oliveira, Roberta Ranielle Matos de Freitas
Bibliografia

1. Lignina. I. Diniz, Joice Pereira. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da candidata **Joice Pereira Diniz**, realizada em 16/06/2026:

Documento assinado digitalmente
 **ANDREIA PEREIRA MATOS**
Data: 16/06/2026 13:36:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Andreia Pereira Matos – Orientadora
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Documento assinado digitalmente
 **GABRIELA LAILA DE OLIVEIRA**
Data: 16/06/2026 15:40:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Gabriela Laila de Oliveira
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Documento assinado digitalmente
 **ROBERTA RANIELLE MATOS DE FREITAS**
Data: 16/06/2026 15:43:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Roberta Ranielle Matos de Freitas
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

DEDICATÓRIA

Ao meu cachorro, Bob. Ele esteve comigo em cada canto de cada casa, durante o período de vestibular, na pandemia e nos meus primeiros anos de universidade.

E por mais que você tenha partido, o som das suas patinhas ficará soando nos meus ouvidos sempre que eu chegar em casa.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de primeiramente agradecer a mim, por toda a dedicação que tive com o trabalho desde 2023, onde tudo se iniciou com uma troca de ideias e se transformou em um projeto, após muitos desafios, compromettimentos e noites em claro, finalmente foi concluído.

Em seguida, gostaria de agradecer a minha família, ao meu pai Lázaro Roberto Diniz, a minha mãe Rosângela Pereira dos Santos e a minha irmã Julia Pereira Diniz, graças ao esforço deles, pude me dedicar inteiramente aos meus estudos e essa é o maior privilégio e honra que uma filha pode ter, em poder estudar. A minha avó Nair Umbelino dos Santos que reconheceu graças aos esforços de suas filhas sobre a importância de estudar e ter uma vida própria, suas palavras se tornaram um incentivo e ao meu tio Wilson Pereira dos Santos a quem devo agradecer imensamente por ter me entregado a palha de milho, sem o seu apoio eu não teria como ter começado esse trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPQ) pela Bolsa PIBITI de iniciação científica, onde pude iniciar essa trajetória. A todos os técnicos em laboratório que me apoiaram na caracterização da lignina, em especial para a técnica de laboratório da UFSCar – Lagoa do Sino Sinara Dal Farra, os seus ensinamentos, paciência e conselhos foram luz. As minhas orientadoras Prof^ª Dr^ª Andreia Pereira Matos e Prof^ª Dr^ª Beatriz Cruz Gonzalez, por terem me aconselhado, apoiado e guiada nessa jornada. Ao Rogério Martins, pois foi graças a sua ideia inicial que esse trabalho de conclusão de curso existe.

Agradeço as minhas amigas Gabriela Gonçalves Cinto e Heloisa Satie Matunaga, por todos os cafés da tarde, playlist de manhã e ao tempo que nos dedicamos a sempre ajudarmos umas às outras, seja nos trabalhos, quanto na vida pessoal. E a minha amiga Maria Sabrina Ribeiro por ter me feito se sentir próxima de casa, mesmo que nós duas estivéssemos longe de nossas raízes. Por fim, a Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Lagoa do Sino por ter me proporcionado a minha formação.

RESUMO

As estações de tratamento de água (ETAs) são etapas importante para o abastecimento de um município, consistem nas etapas operacionais para o tratamento da qualidade e potabilidade das águas de captação superficial, uma dessas etapas essenciais é a coagulação onde comumente é utilizado o sulfato de alumínio, esse coagulante traz vantagens e desvantagens operacionais para as ETAs, com isso surge a possibilidade do uso de polímeros de origem vegetal, como a lignina da palha de milho. O objetivo do trabalho foi extrair, modificar e aplicar a lignina da palha de milho como coagulante e auxiliar de coagulação na remoção de turbidez. A extração foi realizada pelo método de polpação soda, seguida da modificação química por oxidação com peróxido de hidrogênio, para validar os efeitos da modificação caracterizou-se a lignina por Espectroscopia Ultravioleta Visível (UV-Vis), Ressonância Magnética Nuclear (RMN ^1H), Análise Termogravimétrica (TGA), Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS). Preparou-se uma água sintética e realizou bateladas de Jar Test utilizando sulfato de alumínio e lignina como coagulante primário, para determinar as dosagens ideais de remoção, em seguida aplicou o sulfato de alumínio e a lignina como auxiliar de coagulação, pela metodologia de análise de variância (ANOVA). As dosagens ideais de sulfato de alumínio foram de 80 mg. L⁻¹ no tempo de decantação de 10 minutos e 50 mg. L⁻¹ no tempo de decantação de 30 minutos, as ligninas não tiveram efeitos significativos de remoção de turbidez e a sua atuação como auxiliar de coagulação também não teve efeito, comprovado pela ANOVA com o teste de hipóteses ($p\text{-valor} > 0,05$). Portanto, concluiu-se que a lignina não foi capaz de remover a turbidez da água sintética nos tempos pré-determinados no Jar Test, recomenda-se que para trabalhos futuros utilize-se uma turbidez próxima a 100 NTU e avalie os efeitos da lignina alterando as condições operacionais do Jar Test, como o pH.

Palavras-chave: *Zea mays L.*, coagulante orgânico, Jar Test.

ABSTRACT

Water treatment plants (WTPs) are critical components of a municipality's water supply system; they consist of the operational steps involved in treating surface water to ensure its quality and potability. One of these essential steps is coagulation, in which aluminum sulfate is commonly used. This coagulant presents both operational advantages and disadvantages for WTPs, raising the possibility of using plant-based polymers, such as lignin from corn stover. The objective of this study was to extract, modify, and apply lignin from corn stover as a coagulant and coagulation aid for turbidity removal. Extraction was performed using the soda pulping method, followed by chemical modification through oxidation with hydrogen peroxide. To validate the effects of the modification, the lignin was characterized using Ultraviolet-Visible Spectroscopy (UV-Vis), Nuclear Magnetic Resonance (^1H NMR), Thermogravimetric Analysis (TGA), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). Synthetic water was prepared, and batch Jar Tests were conducted using aluminum sulfate and lignin as primary coagulants to determine the optimal dosages for removal; subsequently, aluminum sulfate and lignin were applied as coagulation aids using the analysis of variance (ANOVA) methodology. The optimal dosages of aluminum sulfate were 80 mg. L^{-1} for a settling time of 10 minutes and 50 mg. L^{-1} for a settling time of 30 minutes; the lignins had no significant effect on turbidity removal, and their role as a coagulation aid was also ineffective, as confirmed by ANOVA with hypothesis testing ($p\text{-value} > 0.05$). Therefore, it was concluded that lignin was not capable of removing turbidity from the synthetic water within the predetermined times in the Jar Test. It is recommended that future studies use a turbidity level close to 100 NTU and evaluate the effects of lignin by altering the operational conditions of the Jar Test, such as pH.

Keywords: *Zea mays* L., organic coagulant, Jar Test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo do uso da água	3
Figura 2 - Principais tecnologias de tratamento de água	5
Figura 3 - Adsorção inicial do polímero	7
Figura 4 - Formação do floco	7
Figura 5 - Adsorção secundária do polímero	7
Figura 6 - Quebra do floco	8
Figura 7 - Adsorção inicial com excesso de polímero	8
Figura 8 - Unidades de hidroxifenila (H), guaiacila (G) e siringila (S), precursoras da lignina	9
Figura 9 - Níveis de energia e transições no UV-Vis	12
Figura 10 - Fluxograma da metodologia da coleta, caracterização e aplicação da lignina	14
Figura 11 - Secagem da palha de milho em estufa	15
Figura 12 - Fluxograma da metodologia de extração da lignina por polpação soda	16
Figura 13 - Solução de hidróxido de sódio e palha de milho (a) antes da autoclave (b) e após autoclave a 121°C (c)	17
Figura 14 - Filtração à vácuo com funil de Büchner da solução após autoclave	17
Figura 15 - Alteração da coloração antes da alteração do pH (A) e após a alteração do pH (B)	18
Figura 16 - Precipitação da hemicelulose	18
Figura 17 - Formação dos sólidos de lignina	19
Figura 18 - Fluxograma da metodologia de modificação química da lignina	20
Figura 19 - Solução de oxidação e lignina em aquecimento	20
Figura 20 - Secagem das ligninas em capela	21
Figura 21 - Jar Test	23
Figura 22 - Cadinho após mufla	26
Figura 23 - Processo de extração do teor de extrativos da palha de milho	27
Figura 24 - Solução extraída após o ciclo 1 (A) e o ciclo 14 (B)	27
Figura 25 - Perda de amostra de lignina após secagem em estufa	29
Figura 26 - Ligninas obtidas pelo método de polpação soda e solução de NaOH 2,0 mol.L ⁻¹	29
Figura 27 - Lignina após modificação química por oxidação	30
Figura 28 - Resultados da análise termogravimétrica (TGA) para a lignina sem modificação química (SMQ) e modificadas quimicamente (MQ)	31

Figura 29 - Resultados da curva DTG para a lignina sem modificação química (SMQ) e modificadas quimicamente (MQ)	32
Figura 30 - Espectro UV-Vis das ligninas sem modificação química (SMQ).....	33
Figura 31 - Espectro UV-Vis das ligninas com modificação química (MQ)	33
Figura 32 - Espectros de RMN ^1H da lignina sem modificação química (SMQ).....	34
Figura 33 - Espectros de RMN ^1H da lignina com modificação química (MQ).....	35
Figura 34 - Atribuição das bandas no espectro do infravermelho (cm^{-1} .) de lignina modificada quimicamente (MQ) e sem modificação química (SMQ).....	38
Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura da lignina modificada quimicamente (MQ)	39
Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura da lignina sem modificação química (SMQ)	40
Figura 37 - Turbidez da água antes da adição do sulfato de alumínio (A) e após adição (B)	41
Figura 38 - Gráfico da remoção de turbidez (%) após aplicação de sulfato de alumínio	42
Figura 39 - Turbidez após adição de lignina (A) e tempo de decantação de 30 minutos (B).....	44
Figura 40 – Gráfico de remoção de turbidez (%) após aplicação de sulfato de alumínio e lignina	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes e tratamento dos corpos hídricos	3
Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da água.....	5
Tabela 3 - Teor de umidade da palha de milho.....	25
Tabela 4 - Teor de cinzas da palha de milho.....	25
Tabela 5 - Teor de extrativos	26
Tabela 6 - Teor de lignina extraída da palha de milho pelo método da polpação soda	28
Tabela 7 - Atribuições e porcentagem dos sinais de RMN ^1H das ligninas SMQ e MQ.....	35
Tabela 8 - Atribuição das bandas no espectro do infravermelho (cm^{-1}) de lignina SMQ, MQ e comparativo com a literatura	36
Tabela 9 - Composição química da lignina sem modificação química (SMQ) em Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS).....	40
Tabela 10 - Composição química da lignina sem modificação química (SMQ) em Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS).....	41
Tabela 11 - Parâmetros de qualidade iniciais da água sintética.....	41
Tabela 12 - Valores de pH obtidos após a adição de sulfato de alumínio	43
Tabela 13 - Remoção de turbidez (%) após aplicação de lignina	43
Tabela 14 - Valores de pH obtidos após a adição de lignina	44
Tabela 15 - Análise estatística de variância (ANOVA) para a remoção de turbidez.....	45
Tabela 16 - Teste de Tukey para a remoção de turbidez	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato de alumínio
ETAs	Estações de Tratamento de Água
pH	potencial hidrogeniônico
ANOVA	Análise de Variância
C_6C_3	Fenilpropanoides
C-C	Ligações carbono-carbono
C-O-C	Ligações éteres
-COOH	Carboxila
DMSO- d_6	dimetilsulfóxido- d_6
DTG	Termogravimetria derivada
EDS	Espectroscopia de Raios-X por dispersão de energia
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformador de Fourier
g	Gramas
H_0	Princípio da nulidade
H_2O_2	Peróxido de hidrogênio
HCl	Ácido clorídrico
kV	Quilovolt
L	Litros
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
mg/L	Miligramas por litro
mg	Miligramas
mL	Mililitros
mol.L^{-1}	Concentração molar
MQ	Lignina com modificação química
NaClO	Hipoclorito de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
nm	Nanômetros
$^{\circ}\text{C}$	Celsius
OH-	Hidroxila
ppm	Partes por milhão
RMN ^1H	Ressonância Magnética Nuclear
SMQ	Lignina sem modificação química
TGA	Análise termogravimétrica

uL	Microlitro
UV-Vis	Espectroscopia no Ultravioleta Visível

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1. Tratamento e parâmetros de qualidade da água	2
2.2. Polímeros.....	6
2.3. Lignina	8
2.3.1. Modificação química da lignina	10
2.3.2. Metodologias de caracterização da lignina.....	10
3. METODOLOGIA.....	13
3.1. Coleta e caracterização da palha de milho	14
3.1.1. Teor de umidade e sólidos totais	15
3.1.2. Teor de cinzas.....	15
3.1.3. Teor de extrativos	16
3.2. Extração da lignina por polpação soda.....	16
3.3. Modificação química da lignina por oxidação	19
3.4. Caracterização da lignina	21
3.4.1. Análise termogravimétrica (TGA).....	21
3.4.2. Espectroscopia no Ultravioleta Visível (UV-Vis)	21
3.4.3. Ressonância Magnética Nuclear (^1H).....	21
3.4.5. Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	22
3.4.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS).....	22
3.4. Jar Test e parâmetros de qualidade da água	22
3.4.1. Preparo das dosagens de coagulantes	23
3.5. Análise de variância (ANOVA)	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1. Caracterização da palha de milho.....	24
4.1.1. Teor de umidade	24

4.1.2. Teor de cinzas	25
4.1.3. Teor de extrativos	26
4.2. Extração da lignina por polpação soda e modificação química por oxidação	27
4.3. Caracterização da lignina após modificação química	30
4.3.1. Análise termogravimétrica (TGA).....	30
4.3.2. Espectroscopia no Ultravioleta Visível (UV-Vis)	32
4.3.3. Ressonância Magnética Nuclear (^1H).....	34
4.3.4. Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	36
4.3.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS).....	39
4.4. Jar Test	41
4.4.1. Sulfato de alumínio como coagulante	41
4.4.2. Lignina como coagulante.....	43
4.4.3. Sulfato de alumínio como coagulante e lignina como auxiliar de coagulação.....	44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico é um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais responsáveis pela saúde pública, através do desenvolvimento de medidas socioeconômicas visando a proteção ambiental. O abastecimento de água potável é um dos pilares do saneamento, constituído pelas instalações operacionais necessárias para o abastecimento e disponibilização desde a captação até as ligações prediais (Brasil, 2007).

Os mananciais superficiais estão sujeitos a contaminação por matérias orgânicas, substâncias químicas e despejo de efluentes devido a sua exposição ao ambiente, essas contaminações são agravadas pelo aumento populacional, assim afetando a qualidade da água devido a poluição. Por isso, a água de manancial superficial tem que passar por uma etapa de tratamento para que possa ser consumida, devendo atender os parâmetros de potabilidade (Brasil, 2020).

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) são as unidades responsáveis pela adequação da qualidade da água, a partir das etapas de mistura rápida, floculação, decantação, filtração e desinfecção (Valverde; Santos, 2022). A mistura rápida é a etapa inicial e o seu bom funcionamento definirá a eficiência das etapas posteriores, sendo a fase de aplicação de produtos químicos denominados de coagulantes, que desestabilizam os coloides e sólidos em suspensão presentes na água, para que a sua remoção nas etapas de floculação e decantação seja facilitada. Os coagulantes e os auxiliares de coagulação, também tem como função auxiliar na desidratação do lodo gerado do tratamento, sendo um resíduo composto de matéria orgânica, evitando o comprometimento da vida útil dos equipamentos e auxiliando no tratamento da água (Zara; Tomazini; Lenz, 2012).

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) é o coagulante sintético mais utilizado nas ETAs, devido a sua eficácia na desestabilização dos coloides, no entanto tem como desvantagens o seu alto custo de aquisição, alterações do potencial hidrogeniônico (pH) da água tratada sendo necessário a aplicação de alcalinizantes para correção, redução da sua efetividade em baixas temperaturas e pode apresentar riscos à saúde humana quando existe uma alta concentração de resíduos do alumínio no tratamento (Krupinska, 2020). Devido as desvantagens associadas ao coagulante sintético, os polímeros se tornam um dos principais substitutos para atuação como o coagulante principal ou auxiliares de coagulação, devido a sua capacidade de aumentar a resistência de cisalhamento dos coloides e diminuição do volume de lodo formado (Zara; Tomazini; Lenz, 2012).

Também é utilizado polímeros de origem sintética na aplicação do tratamento de água, porém existe a possibilidade da extração e aplicação de polímeros de fontes naturais, assim

permitindo a utilização de um produto biodegradável. Como polímeros extraídos de plantas e vegetais para atuação como coagulante nos tratamentos de águas e efluentes sanitários, por exemplo a moringa, quiabo e a lignina (Lima; Almeida; Vicentini, 2020). A lignina é o segundo polímero vegetal mais abundante no mundo, ao longo de sua cadeia possui múltiplos grupos funcionais e está presente na palha de milho (Silva, E., 2025). O Brasil é um dos maiores produtores de milho do mundo, mas apenas os grãos são comercializados, logo a palha de milho é um resíduo agrícola e a sua destinação final é incerta, sendo possível reutilizar para forragem do solo para a próxima colheita ou a queima do material (Silva *et al.*, 2009).

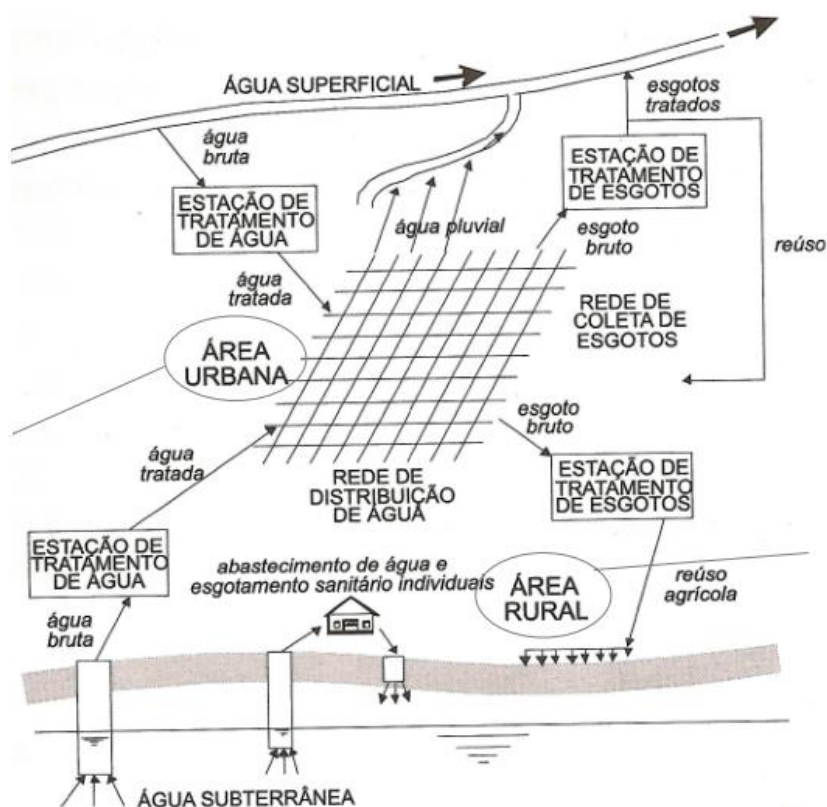
Portanto, é necessário avaliar a possibilidade da ressignificação do descarte final da palha de milho a partir do seu uso como matéria prima para extração da lignina, por conseguinte a sua utilização como coagulante primário ou auxiliar de coagulação no tratamento de água.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Tratamento e parâmetros de qualidade da água

As Estações de Tratamento de Água são responsáveis pelo tratamento da água superficial e subterrânea, a fim de alterar as suas qualidades até que atinja padrões de potabilidade para consumo humano, conforme a Portaria do Ministério da Saúde nº 888 de 2021.

Segundo Von Sperling (1996), as águas passam por um ciclo de uso em que as suas características são alteradas em virtude da sua utilização em cada etapa do ciclo. Inicialmente, a água bruta é captada dos rios, lagos e lençóis freáticos e enviada para tratamento, se transformado em água tratada e então distribuída para as residências, onde se torna em água usada. Após esse processo, a água se transforma em esgoto, que é lançado em rios ou lagos, assim iniciando o ciclo novamente (**Figura 1**).

Figura 1 - Ciclo do uso da água

Fonte: Von Sperling, 1996

Portanto, a qualidade da água bruta é afetada tanto por condições naturais quanto por atividades humanas, com base nisso a CONAMA 357/2005 define as normas e diretrizes responsáveis pelo enquadramento dos corpos hídricos através do estabelecimento de metas a serem alcançados ou mantidos de acordo com os usos pretendidos ao longo do tempo. As classes afetam diretamente na escolha da captação e no tipo de tratamento a ser realizado nas ETAs, como apresentado pela **Tabela 1**, em que as Classes Especiais até a Classe 3 são definidas como água destinada para consumo humano mediante a tratamento adequado, podendo ser ingerida, utilizada para preparação de produtos alimentícios e para higiene pessoal, enquanto a Classe 4 é a única que não deve ser utilizada para abastecimento público (Florençano, 2011).

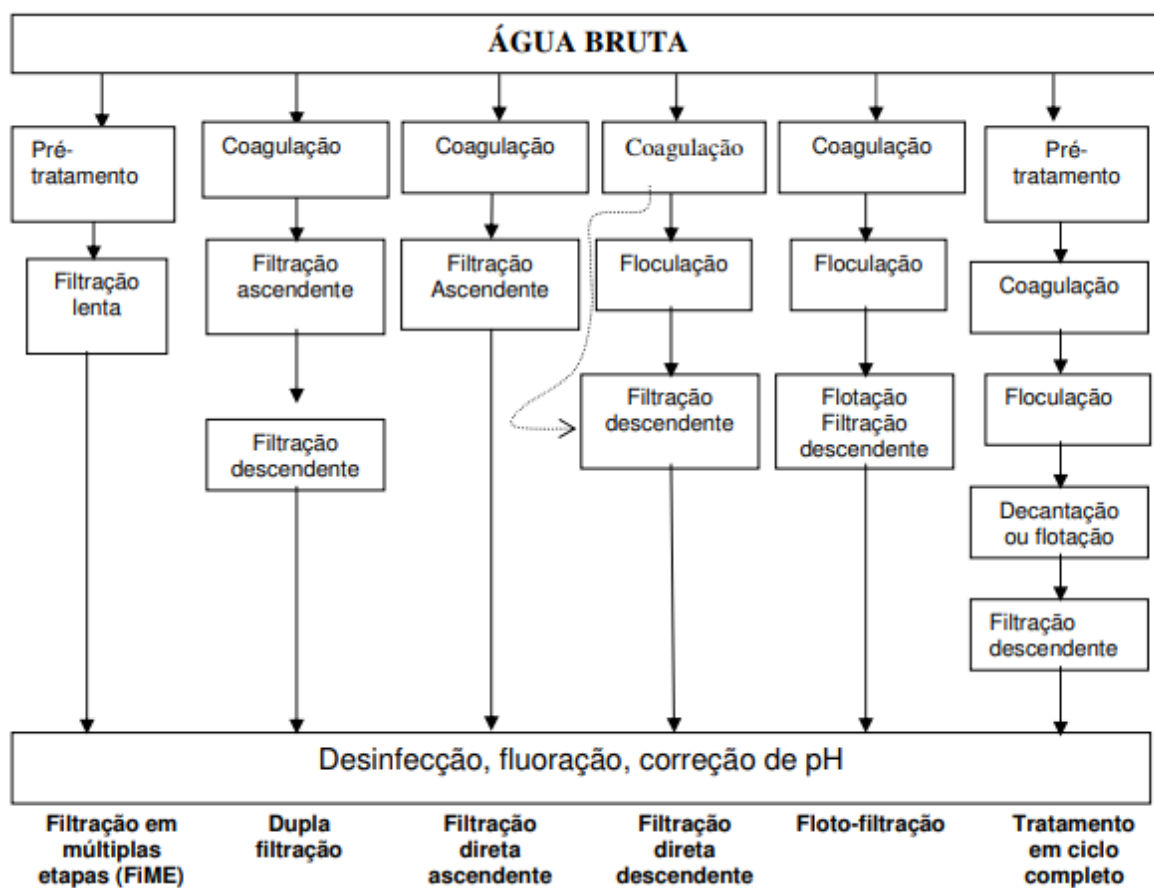
Tabela 1 - Classes e tratamento dos corpos hídricos

Classe	Uso	Tratamento	Processo
Especial	Abastecimento humano	Desinfecção	Aplicação de cloro (cloração)
1	Abastecimento humano	Tratamento simplificado	Adição de cloro e flúor (fluoretação)

2	Abastecimento humano	Tratamento convencional	Ciclo completo (floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação)
3	Abastecimento humano	Tratamento convencional ou avançado	Ciclo completo, mas os processos são mais avançados (Adição de membranas filtrantes, pré-oxidação, flotação, entre outros)
4	Não é destinado para o consumo humano	-	-

Fonte: Adaptado de Florençano (2011)

As unidades de tratamento de água (**Figura 2**) são, em sua grande maioria, de ciclo completo e podem serem compostas de etapas de coagulação, floculação e filtração em que a escolha do tratamento depende da qualidade da água, enquanto o processo de desinfecção, é a única etapa obrigatória independentemente do tipo de tratamento adotado na estação, pois é a responsável pela inativação de organismos patogênicos (Brasil, 2020). A mistura rápida é a etapa onde aplica-se o coagulante ou auxiliar de coagulação para desestabilizar as partículas suspensas, dissolvidas e coloidais. Em seguida, a floculação, em que as partículas desestabilizadas se aglutinam e formam flocos maiores que decantam para o fundo dos tanques dos decantadores devido a ação da gravidade e sedimentam. A filtração é a penúltima etapa do tratamento, sendo o processo de remoção das partículas que não foram retidas pelas etapas posteriores a partir do uso de meios filtrantes como brita e carvão antracito. A última etapa é a desinfecção, responsável por eliminar microrganismos patogênicos pelo o uso de hipoclorito de sódio (Souza, 2007).

Figura 2 - Principais tecnologias de tratamento de água

Fonte: Di Bernardo; Dantas, 2005.

Durante o processo, é necessário monitorar os parâmetros físicos, químicos e biológicos associados a qualidade da água antes e após o tratamento, a fim de compreender se as características da água estão de acordo com os valores de potabilidade. Os principais parâmetros monitorados estão apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da água

PARÂMETROS	DEFINIÇÃO	UNIDADE DE MEDIDA
TURBIDEZ	Absorção da luz devido a presença de materiais em suspensão de diversos tamanho	NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez)
COR APARENTE E VERDADEIRA	Associada ao grau de redução e intensidade que a luz sofre ao atravessar o corpo hídrico, devido a presença de coloides orgânicos (ácido húmico e fúlvico) e inorgânico dissolvidos	uH (Unidade Hazen)
pH	Expressa a concentração de íons de hidrogênio, de ácido a básico, afetando o sabor da água e contribuindo com a corrosão do sistema	-

Temperatura	É afetado pela latitude, estação do ano e profundidade, esse parâmetro influencia na aplicação dos produtos químicos em tratamento	°C
Alcalinidade	Representa a presença de íons hidróxido, carbonato e bicabornato, associado com as dosagens de floculante e atua como efeito tampão do pH	mg/L
Odor e sabor	Ocasionado pela adição de produtos químicos que afetam a estética da água, como cloro e matéria orgânica	-

Fonte: Adaptado de Souza (2007) e Silva (2012).

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) é um dos coagulantes mais utilizados em estações de tratamento de água, devido ao seu ótimo desempenho na remoção de turbidez e de microrganismos da água. Ao entrar em contato com a água, inicia as reações de hidrólise que liberam prótons (H^+) e consomem a alcalinidade natural da água, se o pH da água estiver entre 6 e 8 tem-se a formação de precipitado ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e se estiver inferior a cerca de 5,7 ocorre a formação e predominância de espécies poliméricas de alumínio na forma poliatômica complexa ($\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{27}^{4+}$), a formação dessas substâncias afeta no processo do tratamento de água e são resíduos complexos de serem retirados, podendo afetar na saúde humana.

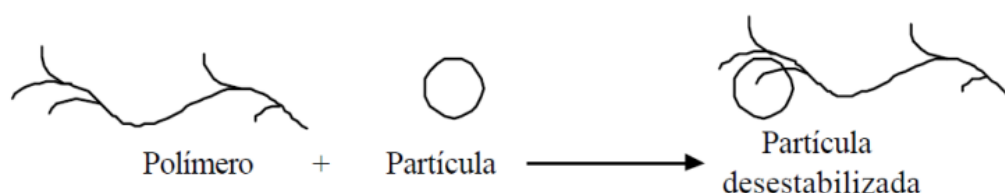
2.2. Polímeros

Os polímeros são macromoléculas de alta massa molecular constituídas por unidades repetidas de monômeros e formadas a partir das ligações covalentes e de reações de polimerização, em que o grau de polimerização refere-se ao número de unidades que se repetem em um polímero. A composição dos polímeros varia de acordo com o material de origem e afetando diretamente as suas propriedades, mas, em sua grande maioria possuem átomos de carbono, hidrogênio e elementos não metálicos (Wimmer, 2007).

No tratamento de água, os polímeros são altamente utilizados devido a sua capacidade de aglomerar as partículas de sólidos e coloides em suspensão na água, sendo aplicados nas etapas de mistura rápida e floculação, de acordo com as características da água a ser tratada (Moura *et al.*, 2024), ao entrarem em contato com a matéria orgânica presente na água o polímero inicia o seu mecanismo de floculação. O polímero adsorve os sólidos e coloides em suspensão a partir da atração das cargas opostas entre eles (**Figura 3**) o choque entre as partículas que foram desestabilizadas e adsorvidas formando os flocos (**Figura 4**). Nessa etapa se houver adição de polímero ou agitação em excesso os flocos poderão se aderir em excesso a uma mesma superfície com um sítio ativo (**Figura 5**), também podem se quebrar (**Figura 6**)

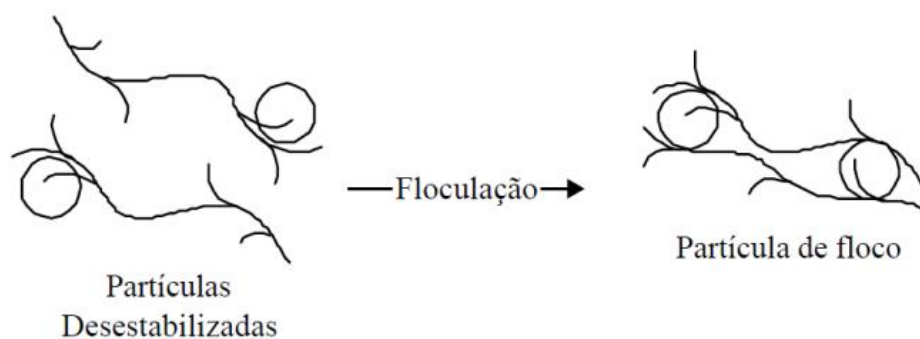
e o processo irá reiniciar (**Figura 7**). Isto traz desvantagens operacionais para as ETAs pela perda do produto e a água tratada não atingirá os parâmetros de qualidade esperados, mas se o processo se suceder os flocos irão para as etapas seguintes de decantação e filtração, onde parte dessa matéria irá se decantar ao fundo dos reatores e o que se mantiver será retido nos filtros (Mortara, 2011).

Figura 3 - Adsorção inicial do polímero



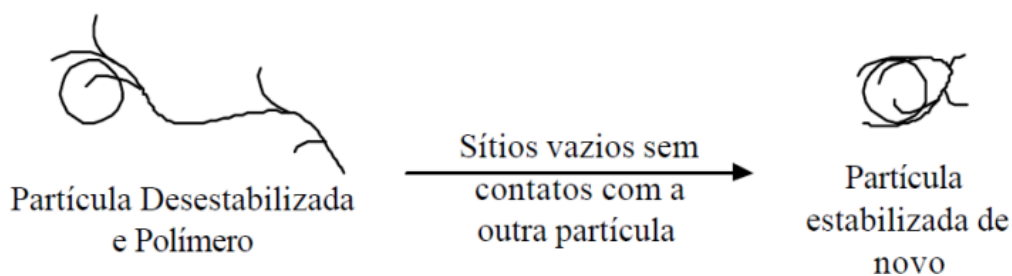
Fonte: Mortara (2011) *apud* Miki (1998).

Figura 4 - Formação do floco

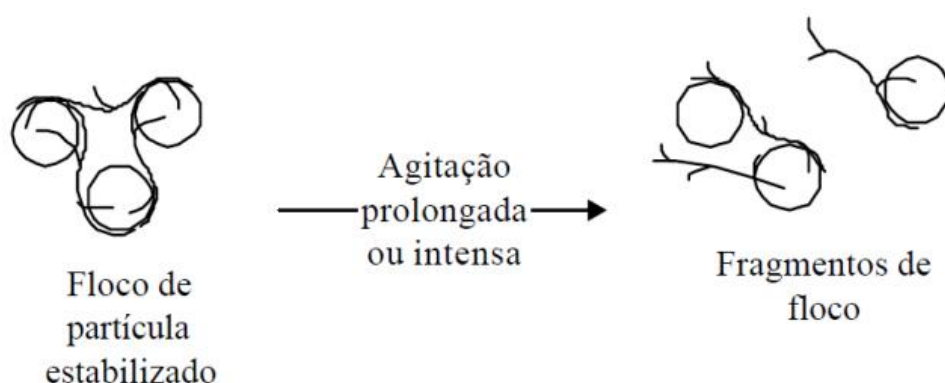


Fonte: Mortara (2011) *apud* Miki (1998).

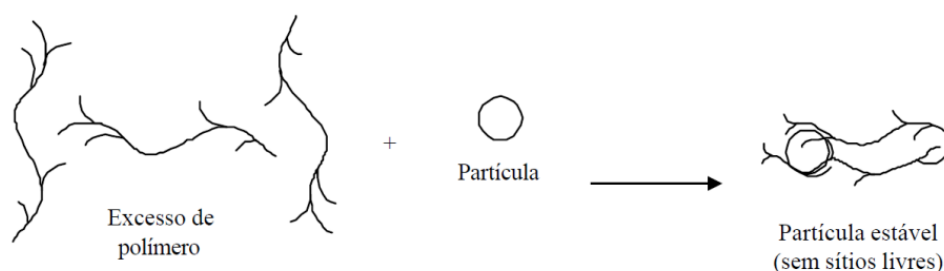
Figura 5 - Adsorção secundária do polímero



Fonte: Mortara (2011) *apud* Miki (1998).

Figura 6 - Quebra do floco

Fonte: Mortara (2011) *apud* Miki (1998).

Figura 7 - Adsorção inicial com excesso de polímero

Fonte: Mortara (2011) *apud* Miki (1998).

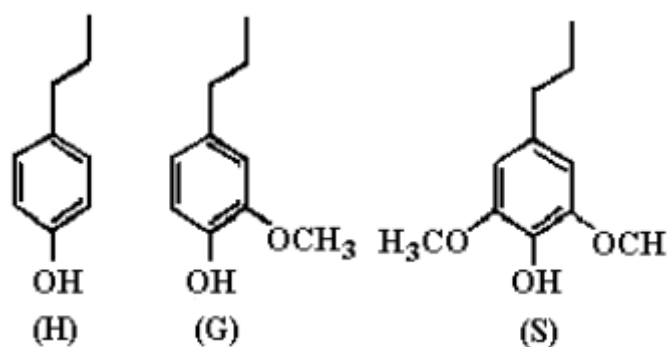
Existem três tipos de polieletrólitos que são comumente aplicados no tratamento de água, os catiônicos que absorvem os coloides negativos, em seguida os aniônicos que substituem os grupos aniônicos em uma partícula coloidal assim permitindo a ligação de hidrogênio entre o coloide e o polímero e, por fim, um não aniônico que absorve e forma flocos por ligações de hidrogênio entre as superfícies sólidas e os grupos polares do polímero (Wimmer, 2007).

2.3. Lignina

A lignina é uma substância amorfa e faz parte da composição estrutural de tecidos lenhosos e não lenhosos, sendo responsável pelo fortalecimento da rigidez das paredes celulares, além de proteger contra o ataque de microrganismos pela resistência mecânica e transportar água e nutrientes dos vegetais. A sua estrutura é tridimensional composta de monômeros conectados com ligações éteres (C–O–C) e ligações covalente carbono-carbono (C–C), distribuídas de forma aleatória (Marabezi, 2009).

As ligninas provenientes de gramíneas são divididas em três monômeros precursores derivados de unidades fenilpropanoides (C_6C_3) e compostos de três álcoois *p*-hidroxifenila (H), guaiacila (G) e siringila (S) (**Figura 8**) as proporções de cada unidade é de acordo com a origem do material, enquanto em madeiras moles têm uma maior incidência dos grupos guaiacil (G) e madeiras duras os grupos siringil (S) e guaiacil (G), as gramíneas têm a presença dos três grupos (H-S-G) (Saliba *et al.*, 2008.).

Figura 8 - Unidades de hidroxifenila (H), guaiacila (G) e siringila (S), precursoras da lignina



Fonte: Saliba *et al.*, 2008.

As características da lignina são de acordo com os diferentes grupos funcionais presentes, de acordo com as condições químicas e ligações, pois enquanto as ligninas de madeira são um subproduto da indústria do papel, as de gramíneas ainda não são bem definidas, além disso as regiões do cultivo e a idade do vegetal também podem alterar as suas propriedades (Oliveira, P., 2023). Além disso, as metodologias de extração desse material ainda podem causar alterações na sua estrutura, ao passar pelo processo de isolamento e recuperação ocorre uma clivagem das ligações β -O-4, o que ocasiona uma repolimerização da lignina em reações de condensação carbono-carbono (C-C), mesmo que isso altere parte de suas propriedades originais, essa lignina ainda pode manter parcialmente ou majoritariamente a sua estrutura original (Silva, F., 2019).

Existem diversas metodologias de extração de lignina e a escolha deve se basear na utilização prevista da lignina seja como resíduo, para determinação do teor da lignina em uma espécie, derivado ou extrativo, ou seja, para cada escolha baseia-se na eliminação ou recuperação da lignina no vegetal, a partir do processo de fracionamento dos constituintes de lignina, celulose e hemicelulose (Silva, F., 2019). A eficiência e a qualidade da metodologia empregada também são influenciadas pelo tipo de vegetal, pois está atrelada a capacidade do solvente de diluir a lignina e o pH da solução (Mousavioun; Doherty; George, 2010).

O processo de polpação soda é a metodologia mais indicada para gramíneas a partir do uso de hidróxido de sódio, pois tem como vantagem ser um processo de fácil tratamento e um método de baixo custo de recuperação dos reagentes, além de apresentar uma reduzida degradação da cadeia alifática e um baixo teor de impurezas (Silva, F., 2019).

2.3.1. Modificação química da lignina

Após a extração da lignina, o material pode passar por outros processos de tratamento a fim de se alcançar o objetivo do estudo, assim como as metodologias de extração, o pós tratamento também se baseia nos princípios de tratamento sendo divididas principalmente em hidrólise, redução e oxidação, onde a hidrólise e a redução tende a romper a estrutura da lignina e remover suas funcionalidades químicas, enquanto a oxidação tende a formar compostos aromáticos mais complexos e auxiliar nas suas funcionalidades (Oliveira, F., 2015). A oxidação da lignina é objetivo de estudo graças a indústria do papel, que utiliza esse processo para branqueamento da celulose pela despolimerização da lignina, pois graças às suas ligações químicas desenvolvem um impedimento estérico ou ocupam sítios reativos disponíveis, assim diminuindo a sua reatividade. Para esse procedimento, o uso de peróxido de hidrogênio vem sendo bastante explorada, graças às pressões ambientais, assim atuando como um substituto nos processos de branqueamento nas indústrias (Miléo, 2015).

A reação do peróxido de hidrogênio com a lignina é afetada pela temperatura e o pH do meio, para a realização do processo é recomendado meios alcalinos, pois assim evita a formação do radical hidroxila (OH^-) (Moriya, 2007). Ao reagir, o peróxido de hidrogênio é decomposto em radicais hidroxilas e radicais ânions superóxido (O_2^-) que causam a oxidação da lignina e conduz a introdução de grupos hidrofílicos ($-\text{COOH}$), a clivagem de algumas ligações entre as unidades e a dissolução da lignina (Oliveira, F., 2015).

2.3.2. Metodologias de caracterização da lignina

2.3.2.1. Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica termo analítica que avalia as propriedades do material a partir das suas alterações físicas ou químicas em função da temperatura (Batista, 2020), fornecendo informações da sua composição, estabilidade térmica e a capacidade de manter as suas características o mais próximo de suas iniciais (Miranda, 2013). A análise TGA consiste no acompanhamento da variação da temperatura a partir de um termo balança que permite a sua pesagem contínua e a curva derivada (DTG), que representa a variação da massa em relação ao tempo, fornecendo a visualização das temperaturas em que

a velocidade da reação é máxima e as reações sucessivas das temperaturas ocasionadas pela liberação das cadeias (Denari; Cavalheiro, 2012).

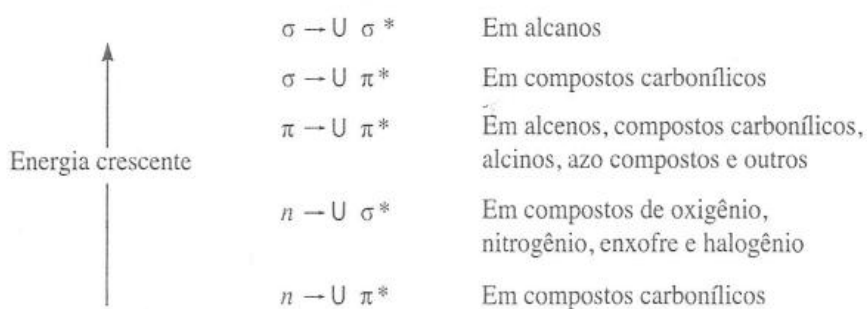
Para a lignina, a avaliação da sua temperatura de degradação e o poder calorífico são resultados importantes a serem considerados, por ser um polímero a lignina tende a liberar ligações afetando diretamente na temperatura e na quantidade de material degradado (Denari; Cavalheiro, 2012). Estudos defendem que a temperatura de degradação da lignina passa por três estágios, sendo este a perda da umidade, a degradação máxima da lignina e a pirólise (SILVA, F., 2019).

2.3.2.2. Espectroscopia no Ultravioleta Visível (UV-Vis)

A Espectroscopia no Ultravioleta Visível (UV-Vis) se baseia na interação entre a radiação eletromagnética e o material a partir da absorção do comprimento de onda na faixa entre 180 a 400 nm, enquanto a luz visível se situa entre 400 a 780 nm (Araújo, 2022). Ao atravessar o material, a radiação faz com que os átomos passem de um estado de energia mais baixo para um estado de energia maior denominado de estado de excitação, em que essa diferença das energias é a radiação eletromagnética que está sendo absorvida pelo material. Na espectroscopia UV-Vis, os átomos absorvem a energia em níveis eletrônicos, ocasionando que o elétron seja promovido de um orbital ocupado para um orbital desocupado de maior energia potencial, essas transições são combinadas e registradas pelo espectrofotômetro, o equipamento responsável por registrar as diferenças de energias, delimitando uma banda larga de absorção, em que quanto maior for o número de moléculas capazes de absorver o comprimento de onda, maior será a extensão dessa absorção (UFJF, 2013).

Os orbitais de menor energia são ocupados pelas ligações *sigma* (σ), já as ligações *pi* (π) ocupam orbitais de energia um pouco mais altos e os orbitais antiligantes (*n*) são ocupados por pares isolados de π e σ de maior energia, com isso, os elétrons de um composto podem sofrer por diversos tipos de transições (**Figura 9**). Os resultados dos espectros UV-Vis são apresentados em gráficos, os valores são plotados em absorbância *versus* o comprimento de onda, permitindo a identificação da máxima absorbância do material, de acordo com os grupos funcionais e as ligações entre os átomos (Araújo, 2022).

Essa é uma técnica de caracterização da lignina que vem sendo estudada por anos devido a sua versatilidade, fornecendo informações qualitativas e quantitativas e sobre modificações químicas em sua composição, em que a inclusão ou o bloqueio de grupos funcionais podem afetar a curva de absorção (Ruwold; Tanase-Opedal; Syverud, 2022).

Figura 9 - Níveis de energia e transições no UV-Vis

Fonte: UFJF, 2013.

2.3.2.3. Ressonância Magnética Nuclear (^1H)

A Ressonância Magnética Nuclear (RMN ^1H) é uma técnica analítica que se baseia na absorção e remissão da radiação eletromagnética, assim identificando o esqueleto carbono-hidrogênio de uma substância, a partir das radiações de rádio frequência. A análise funciona a partir da emissão de um pulso de radiofrequência pelo espectrômetro, que faz com que os núcleos atômicos se comportam em movimento circular, esse movimento é denominado de *spin* e a carga desse *spin* gera um campo magnético externo que pode ser contrário aos prótons dos *spins* sendo o estado de maior energia, ou alinham a favor dos prótons sendo o estado de menor energia. Após esse processo, os *spins* sofrem relaxamento e ao retornarem ao seu estado de origem, estes emitem sinais eletromagnéticos, em que a frequência desses sinais é registrada pelo espectrômetro de RMN, sendo uma informação importante pois indicam a energia necessária para excitar um núcleo de *spin* (Silva L., 2018).

Sendo assim, a Ressonância Magnética Nuclear é uma ferramenta analítica que fornece informações das estruturas moleculares da parede celular da lignina, a partir da presença de hidrogênio e carbono (Fukushima; Hatfield, 2003). A lignina é um composto difícil de ser solubilizado e as suas moléculas têm pouca mobilidade, por isso a RMN ^1H é a técnica recomendada para a compreensão da sua estrutura, pois fornecer informações da presença do hidrogênio a partir da acetilação da lignina, resultando em espectros que permitem identificar a presença do hidrogênio, grupos aromáticos, hidroxílicos e entre outros (Saliba *et al.*, 2001).

2.3.2.4. Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é um compilado de técnicas que se adaptaram ao longo dos anos, sendo amplamente utilizada para análise da estrutura molecular e ligações químicas de compostos orgânicos e inorgânicos

a partir da absorção no infravermelho. O equipamento utilizado contém um espelho fixo, um espelho móvel e um divisor de feixe, a radiação infravermelha é emitida e direcionada em partes para cada um dos espelhos, ao ser refletida passa pelo divisor de feixe onde é recombinada e esse processo gera um interferograma, sendo o resultado da intensidade do sinal (Cunha *et al.*, 2015). A intensidade do sinal é um indício dos grupos funcionais presentes na estrutura orgânica das amostras, em que a interação da radiação eletromagnética com as moléculas produz uma vibração em amplitude ao redor das ligações covalentes que unem as moléculas. Sendo assim, a energia vibracional é o que dá origem às bandas do espectro infravermelho, as posições e os números de ondas (UFJF, 2013).

Para as ligninas, a análise do FTIR é um método analítico de grande relevância por determinar a pureza e quantificação de substâncias orgânicas e cadeias poliméricas (Quinelato, 2016).

2.3.2.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS)

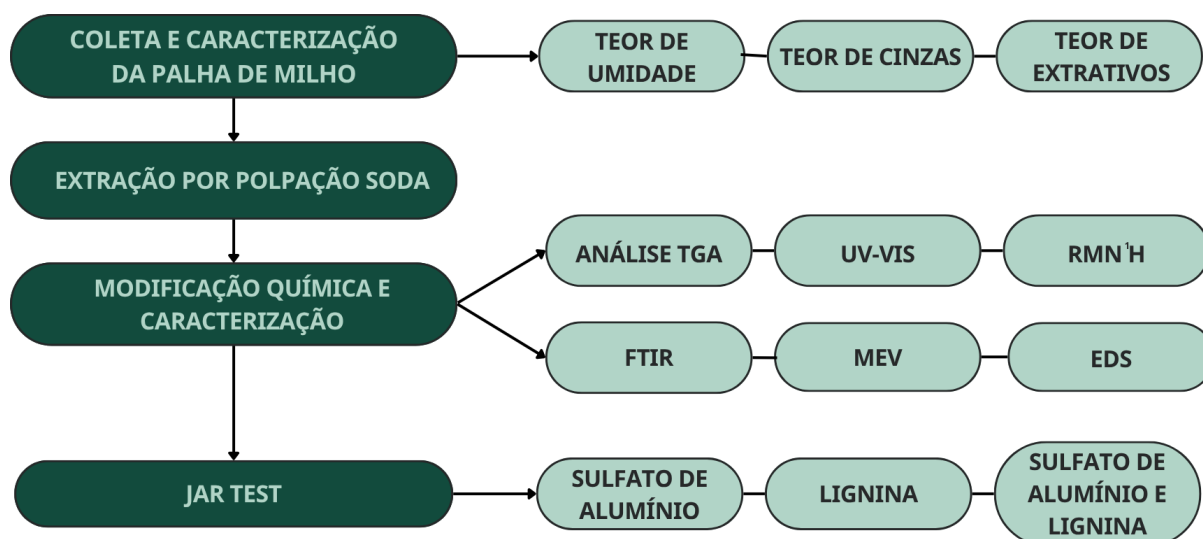
A Microscopia eletrônica de varredura (MEV) trata-se de uma análise microestrutural que fornece informações sobre as características do material como composição e topografia da superfície, a partir da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra e as radiações emitidas. Os sinais mais importantes são dos elétrons secundários, que geram imagens da topografia da superfície, e os retroespalhados que fornecem imagens da variação de sua composição. Já a Espectroscopia de Raios-X por dispersão de energia (EDS) disponibiliza a composição dos materiais, através dos espectros dos raios-X de baixa a alto número atômico que são detectados por um semicondutor, usualmente é utilizado o silício, que converte a sua energia em cargas elétricas, ao realizar essa conversão gera um sinal que corresponde aos elementos que compõem a amostra (Maliska, 2003).

Portanto, o MEV em conjunto com o EDS fornece informações aprofundadas sobre a morfologia do material, permitindo um comparativo visual das possíveis diferenças entre os processos de extração e transformações que aconteceram (Vieira *et al.*, 2021).

3. METODOLOGIA

As etapas de extração, caracterização, modificação e análises da lignina como coagulante primário e auxiliar de coagulação estão ilustradas na **Figura 10**.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia da coleta, caracterização e aplicação da lignina



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.1. Coleta e caracterização da palha de milho

A palha de milho foi coletada em uma fazenda localizada no município de Itaporanga - SP, as palhas foram separadas, pesadas com o uso de uma balança analítica (*EDUTECH*) e levadas para secagem em estufa (*New Lab NL-80-100*) durante o período de 4 dias a 40°C. Esse processo é necessário, pois a palha de milho é um material com pouca umidade, no entanto o processo de secagem e trituração garantem que o material não absorva a umidade atmosférica e elimine a presença de compostos inorgânicos que possam vir a atrapalhar o processo de extração da lignina (**Figura 11**).

Por fim, a palha foi triturada com o auxílio de um liquidificador (*Black & Decker IB900 1,5 Litros*) e armazenada em potes plásticos.

Figura 11 - Secagem da palha de milho em estufa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.1.1. Teor de umidade e sólidos totais

Ao término do processo de secagem em estufa, as palhas foram levadas para resfriamento em dessecador e pesou-se novamente, a partir dos resultados obtidos foi possível calcular o teor de umidade (Equação 1), baseado na metodologia de Sluiter, *et al.*, 2010.

$$Umidade (\%) = \left[\frac{(P_i - P_f)}{P_i} \right] \times 100 \quad 1$$

Em que P_i é o peso inicial da amostra antes da estufa e P_f é o peso da amostra após a secagem da estufa, todas as unidades são em gramas.

3.1.2. Teor de cinzas

A partir da metodologia descrita pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos da América (Sluiter, *et al.*, 2005), com o auxílio de uma balança analítica (*Shimadzu - Modelo AUY220*) pesou-se 2 g da palha de milho triturada e levou à mufla a 800°C, até a estabilização do peso da amostra, todo o processo demorou aproximadamente 4 horas. Os cadinhos utilizados foram previamente pesados e numerados, assim o teor de cinzas foi calculado pela Equação (2).

$$Teor\ de\ cinzas (\%) = \left(\frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \right) \times 100 \quad 2$$

Em que M_1 é a massa do cadinho vazio, M_2 é a massa do cadinho com a palha de milho, descontando o teor de umidade, e M_3 é a massa do cadinho após o tempo na mufla. Todas as massas são em gramas.

3.1.3. Teor de extrativos

Adaptado da metodologia de Salazar *et al.* (2018), o teor de extrativos foi realizado com o uso do aparelho *Soxhlet* e papel filtro, onde adicionou-se 4 g da palha de milho triturada e 200 mL de solução de etanol/água (1:1). A extração foi realizada até que a solução extraída da palha se tornasse incolor, ao término do processo a palha de milho foi retirada do papel filtro e levada para secagem em estufa (*New Lab NL-80-100*) a 105°C por 2 horas.

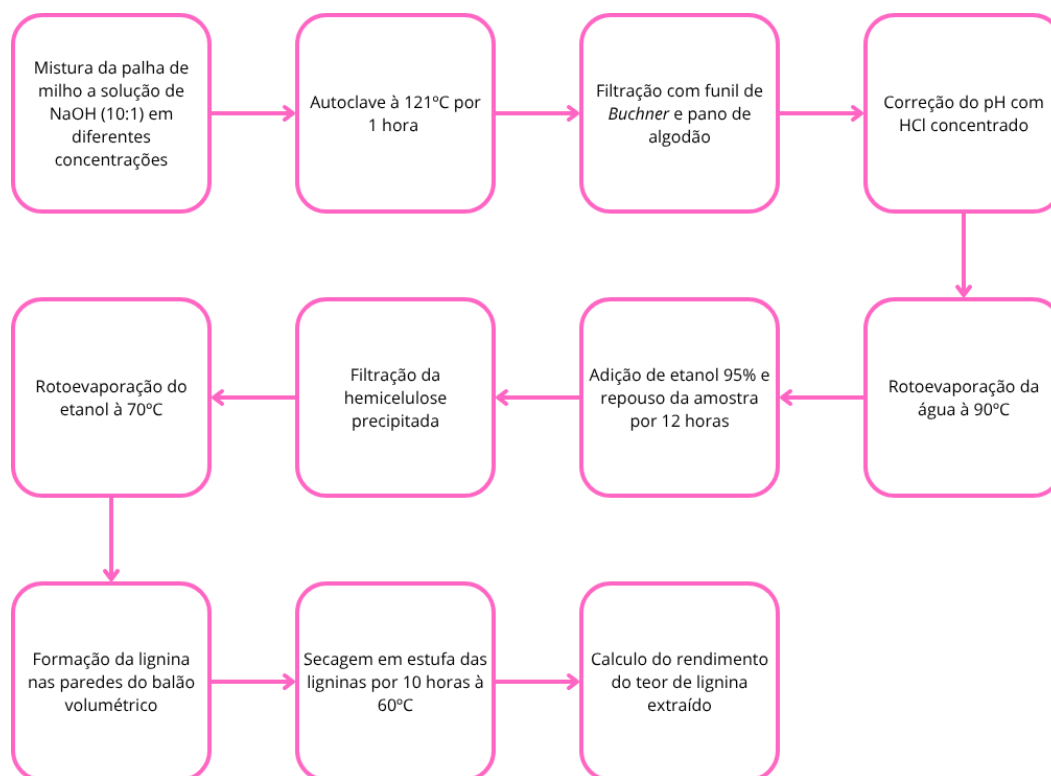
O teor de extrativos foi calculado pela Equação (3). Em que M_1 é a massa de palha de milho antes da extração e M_2 é a massa livre de extrativos, em gramas.

$$\text{Teor de extrativos (\%)}: \left(\frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \right) \times 100 \quad 3$$

3.2. Extração da lignina por polpação soda

A extração da lignina da palha de milho foi adaptada da metodologia de Maziero *et al.* (2012), os procedimentos realizados estão resumidos pela **Figura 12**.

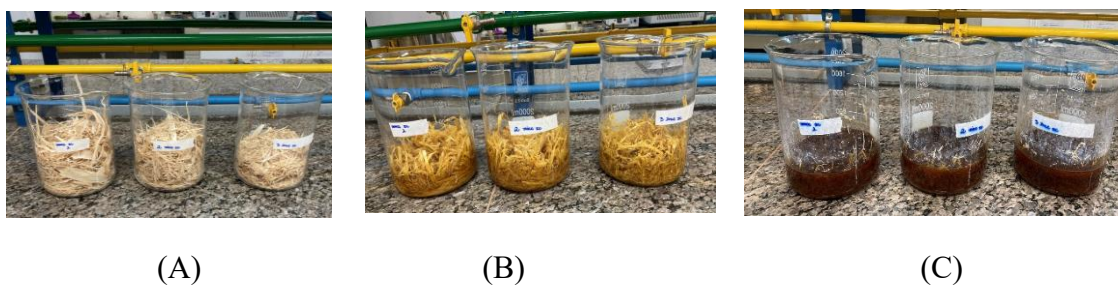
Figura 12 - Fluxograma da metodologia de extração da lignina por polpação soda



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

A solução de extração foi preparada com diferentes concentrações de hidróxido de sódio (NaOH) e água, em proporção de solução: amostra equivalente a 10:1 (v/m), com o objetivo de se extrair uma maior fração de lignina da palha de milho, as concentrações utilizadas foram de 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0 mol. L⁻¹. Adicionou-se 200 ml da solução de hidróxido de sódio a 40 g de palha de milho em um béquer de 1L e levou para autoclave (*Digitale AV30*) a 121°C por 1 hora (**Figura 13**).

Figura 13 - Solução de hidróxido de sódio e palha de milho (a) antes da autoclave (b) e após autoclave a 121°C (c)



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Em seguida o licor obtido da mistura entre a solução e a palha foi filtrada à vácuo com funil de Büchner e o uso de um pano de algodão como filtro (**Figura 14**). O pH das soluções foram ajustados para $\pm 5,5$ com o uso de ácido clorídrico (HCl) concentrado 37%, pHmetro (*PHS-3E*) e bastão de vidro para homogeneização das misturas, notou-se que ao atingir o pH desejado a coloração da mistura é alterada de marrom escuro para marrom claro (**Figura 15**).

Figura 14 - Filtração à vácuo com funil de Büchner da solução após autoclave



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

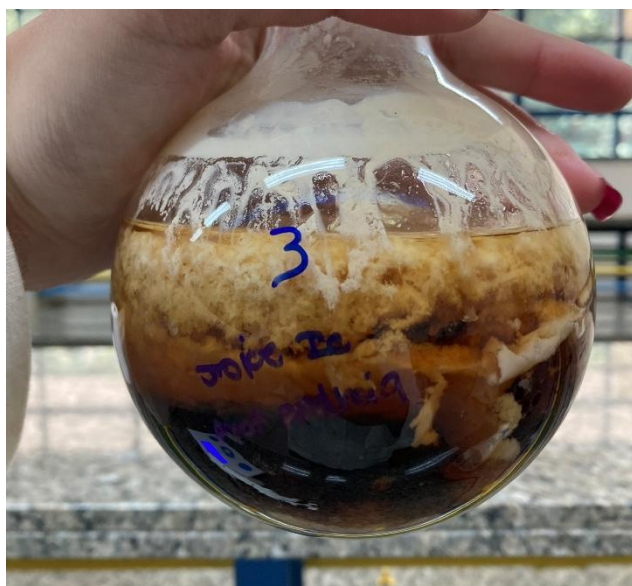
Figura 15 - Alteração da coloração antes da alteração do pH (A) e após a alteração do pH (B)



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Em seguida, os licores foram transferidos dos béqueres de mistura para o evaporador rotativo (*Fisatom*) à 90°C para a evaporação da água, o que era observado a partir da alteração de seu comportamento líquido para viscoso, com base no volume de licor presente no balão volumétrico adicionou-se o dobro de seu volume em etanol (C_2H_6O) concentrado 95%. A mistura da solução e o líquido repousou por 12 horas para a precipitação da hemicelulose (**Figura 16**) novamente, o licor foi submetido à filtração à vácuo com funil de *Büchner* seguida de evaporação rotativa à 70°C, para a evaporação do etanol residual na amostra.

Figura 16 - Precipitação da hemicelulose

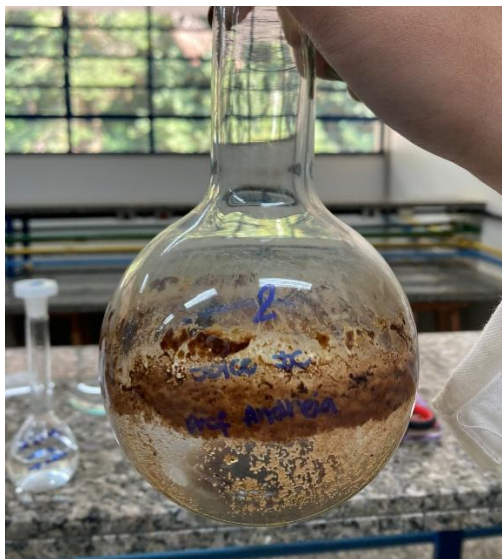


Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Conforme o etanol é evaporado, tem-se o surgimento de sólidos na parede do balão volumétrico, sendo a lignina (**Figura 17**). Para a sua remoção utilizou-se solução de HCl 1,0

mol. L⁻¹, filtração a vácuo e pedras de porcelana, então as ligninas foram encaminhadas para secagem em estufa (SL-100) à 60°C por 10 horas.

Figura 17 - Formação dos sólidos de lignina



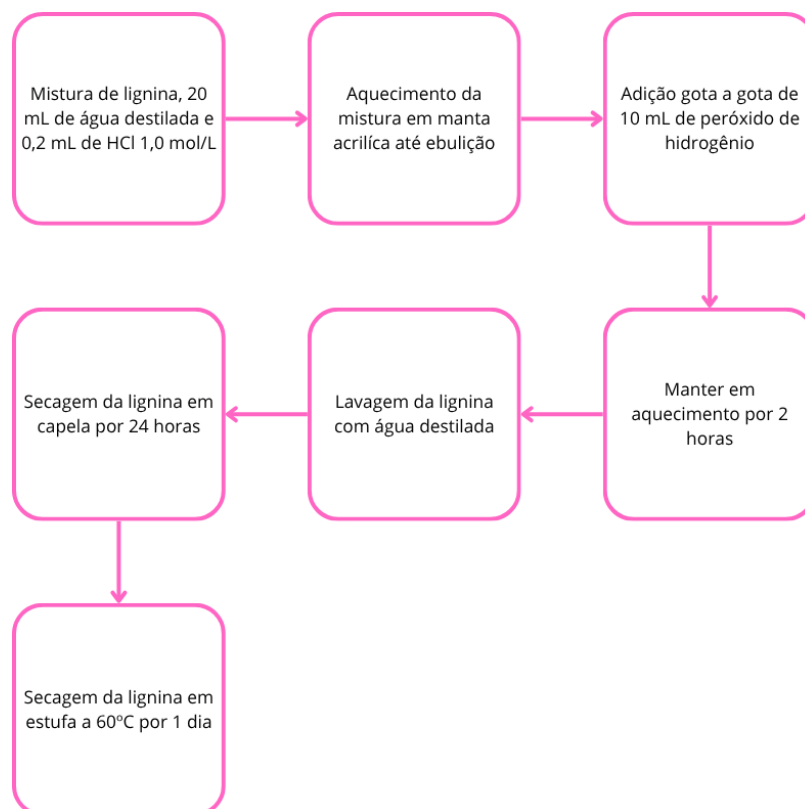
Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Calculou-se pela Equação (4) o rendimento do teor de lignina extraída.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{massa de lignina}}{\text{massa de palha}} \times 100 \quad 4$$

3.3. Modificação química da lignina por oxidação

A modificação química da lignina escolhida é a da oxidação, baseada e adaptada pelo método descrito por Nakanishi *et al.* (2011), os procedimentos realizados foram resumidos na **Figura 18**.

Figura 18 - Fluxograma da metodologia de modificação química da lignina

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

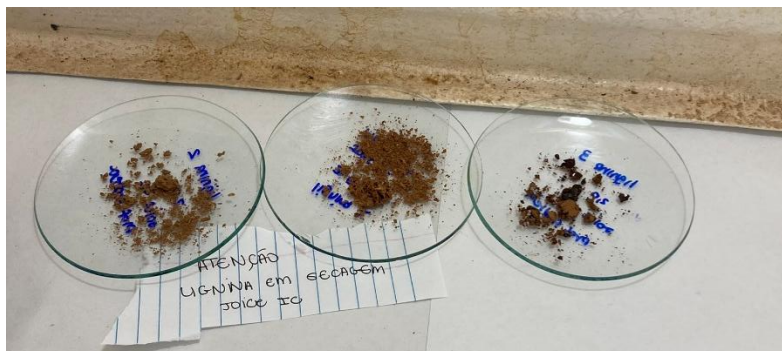
Adicionou-se aproximadamente 2 g da lignina extraída em um balão de destilação com 20 mL de água destilada e 0,2 mL de HCl 1,0 mol. L⁻¹, a mistura ficou em aquecimento em uma manta acrílica (*Thelga*) até a sua ebulição (**Figura 19**), em seguida com o auxílio de uma pipeta de Pasteur, adicionou-se 10 mL de solução de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) 30% (v/v) à mistura.

Figura 19 - Solução de oxidação e lignina em aquecimento

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Após 2 horas da mistura de soluções e a lignina em aquecimento, o balão foi retirado e as soluções filtradas à vácuo, então os sólidos de lignina foram lavados com água destilada para a completa remoção da solução de peróxido de hidrogênio. A lignina oxidada foi transferida para a capela por 24 horas, seguida de estufa (*SL-100*) a 60°C por 1 dia (**Figura 20**).

Figura 20 - Secagem das ligninas em capela



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

3.4. Caracterização da lignina

3.4.1. Análise termogravimétrica (TGA)

As análises foram conduzidas pela técnica de laboratório Dr^a. Ana Paula Garcia Ferreira, no Instituto de Química de São Carlos (LATEQS) da Universidade de São Paulo. As ligninas foram submetidas em atmosfera dinâmica de nitrogênio no módulo TGA Q50 TA *Instruments*, com uma rampa de aquecimento de 20°C.min⁻¹ e o intervalo de varredura entre 25°C a 800°C, em ar seco 45mL.min⁻¹, utilizou-se aproximadamente 6 mg de lignina.

3.4.2. Espectroscopia no Ultravioleta Visível (UV-Vis)

A caracterização das ligninas pela metodologia de Espectroscopia Eletrônica de Varredura (UV-Vis) foi realizada pela técnica de laboratório Dorai Periotto Zandonai no Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos - *Campus* São Carlos. As amostras foram dissolvidas em 3 mL de metanol e transferida para uma cubeta de quartzo de 1 cm de caminho óptico no espectrofotômetro (*Agilent - Cari 60*), as medidas de absorbância foram realizadas no intervalo de 190 a 1100 nm.

3.4.3. Ressonância Magnética Nuclear (¹H)

A análise foi conduzida no Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos pelo Prof^o Dr. Tiago Venâncio. Para essa caracterização, foi utilizado 20 mg de ligninas

dissolvidas em 500 uL de dimetilsulfóxido- d_6 (DMSO- d_6), a mistura foi transferida para um tubo de 5 mm e levada para análise no equipamento Bruker Avance III 400 MHz (Campo Magnético 9,4 T), com sonda BBO-10 mm e em janela espectral de 25 ppm para a lignina sem modificação química (SMQ) e 20 ppm para a lignina com modificação química (MQ).

3.4.5. Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada no Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos - *Campus* São Carlos pela técnica de laboratório Luciana Vizotto. As amostras foram submetidas em espectrômetro *FTIR Cary 630* da *Agilent* em contato com cristal *ATR* de diamante, os espectros foram registrados no intervalo de 4000 a 600 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} , obtendo-se ao final 32 *scans*.

3.4.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS)

O experimento foi realizado no Departamento de Física, Química e Matemática da Universidade Federal de São Carlos - *Campus* Sorocaba pela aluna Anna Julia Brunherota Correia, orientada do Prof.º Dr. Fábio Minoru Yamaji. As amostras de lignina foram colocadas em Microscópio modelo *Hitachi TM3000*, operando em voltagens de 15 kV para obter-se a sua morfologia e a composição mineralógica.

3.4. Jar Test e parâmetros de qualidade da água

O *Jar Test* (Teste de Jarros) é um ensaio realizado em laboratório para simular as condições operacionais de uma ETA, com o objetivo de se determinar as dosagens ideais dos produtos químicos a serem utilizados para a remoção de cor e turbidez da água aplicando-se a menor quantidade de produtos químicos (Wimmer, 2007). O Jar Test utilizado foi o equipamento da marca *PoliControl* no modelo *Flotcontrol D* (**Figura 21**), em que as amostras foram agitadas em mistura rápida por 2 minutos e em floculação por 15 minutos.

Figura 21 - Jar Test

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Previamente, preparou-se aproximadamente 90 L de água sintética, utilizando aproximadamente 500 g de solo argiloso encontrado no *campus* da Universidade Federal de São Carlos - Lagoa do Sino, a fim de chegar em uma turbidez alta. Para avaliação dos efeitos do coagulante, monitorou-se os parâmetros de turbidez inicial e após a etapa de decantação nos tempos 10 e 30 minutos, com o auxílio de um turbidímetro (*Modelo TB-1000P*) e da Equação (5).

$$Turbidez (\%) = \left(1 - \frac{Turbidez\ final}{Turbidez\ inicial} \right) \times 100 \quad 5$$

Também, monitorou o pH inicial e durante a floculação, para verificar se a adição do sulfato de alumínio e lignina teve efeito sobre o pH da água, com o uso de um pHmêtro (*MS Tecnopon– mPA-210*).

3.4.1. Preparo das dosagens de coagulantes

Para a determinação das dosagens ideais do sulfato de alumínio, preparou-se uma solução em concentração de 24 mg.L⁻¹ e em cada jarro foi aplicada uma dosagem de 20; 30; 40; 50; 60 e 80 mg.L⁻¹ (FUNASA, 2013). Enquanto para a lignina, preparou-se uma solução base em uma concentração de 2.000 mg.L⁻¹ da lignina modificada quimicamente, sendo aplicado em cada jarro uma dosagem de 30,60 e 90 mg.L⁻¹ (Zaidi *et al.*, 2019). Com base nas

dosagens ideais do sulfato de alumínio, repetiu-se o procedimento com a lignina atuando como auxiliar de coagulação, aplicando em cada jarro as mesmas dosagens utilizadas previamente.

O processo foi repetido três vezes, com o intuito de garantir a homogeneidade dos resultados.

3.5. Análise de variância (ANOVA)

Para avaliar os efeitos das dosagens dos coagulantes sobre a remoção da turbidez da água, foi aplicado a metodologia de Análise de Variância (ANOVA). Trata-se de uma análise estatística para determinar possíveis diferenças entre três ou mais tratamentos e identificar a relação entre variáveis independentes, a partir da função de probabilidade e desejabilidade (Anjos, 2005).

Para avaliar a significância dos resultados, baseou-se no princípio da nulidade (H_0) pelo *P-valor*, se o valor obtido for maior que 0,05 rejeitamos a nulidade de H_0 , portanto não há evidências de diferenças significativas entre os tratamentos, logo os tratamentos não tiveram influência pelos resultados obtidos e sua distribuição é normal, enquanto ao contrário (*P-valor* < 0,05) existe diferença em pelo menos dois grupos e teve influência nos resultados (Valgas *et al.*, 2021).

Em conjunto a ANOVA, também se realizou o teste de Shapiro-Wilk, para avaliar a normalidade dos resíduos, e o Teste de Levene, para a homogeneidade de variâncias que avalia a variação do componente aleatório, ou seja, se um tratamento possui uma variação muito superior aos demais, ele não é estável o suficiente para ser comparado (Anjos, 2005).). Por fim, o teste de Tukey, que permitiu comparar duas médias de tratamento, separando os efeitos da dosagem dos coagulantes, tempo e turbidez em grupos de letras onde médias que estejam em grupos de letras iguais não se diferem significativamente entre si, assim permitindo fazer uma comparação e escolha de qual dosagem foi a ideal no Jar Test (Valgas *et al.*, 2021).

A realização do teste ANOVA, Shapiro-Wilk, Levene e Tukey foram com o apoio do programa *R Studio*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da palha de milho

4.1.1. Teor de umidade

A umidade da palha de milho obtida encontra-se em uma faixa de 7 a 14%, com uma média de 10%, apresentado pela **Tabela 3**, nota-se que para cada bandeja levada para secagem em estufa os valores variaram entre si, essa diferença era esperada ao comparar com os valores

adquiridos por Mendes (2014) e Salazar *et al.*, (2018) que obtiveram 8,12 e 13,0%, respectivamente.

Tabela 3 - Teor de umidade da palha de milho

Amostra	Peso da palha de milho (g)				Umidade (%)
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	
1	20,70	27,10	19,72	17,71	14,44
2	21,32	28,89	18,04	19,66	7,79
3	24,60	31,63	22,48	22,02	10,49
4	21,18	28,46	19,41	19,35	8,64
5	21,77	29,03	20,04	19,33	11,21

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

4.1.2. Teor de cinzas

O teor de cinzas obtido das amostras de palha de milho estão entre 1 a 4%, com uma média de 3,04% (**Tabela 4 e Figura 22**), o valor está dentro da literatura ao comparar com os resultados de Mendes (2014) e Bohn (2017) que obtiveram teores de 5,04 e 4,01, respectivamente. **Tabela 4**

Tabela 4 - Teor de cinzas da palha de milho

Amostra	Massa do cadinho vazio (g)	Massa do cadinho + Palha de milho (g)	Massa do cadinho após a mufla (g)	Extrativo (%)
1	68,63	69,677	68,68	4,78
2	65,37	66,58	65,40	2,48
3	61,89	62,97	61,91	1,85

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Figura 22 - Cadinho após mufla

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

4.1.3. Teor de extrativos

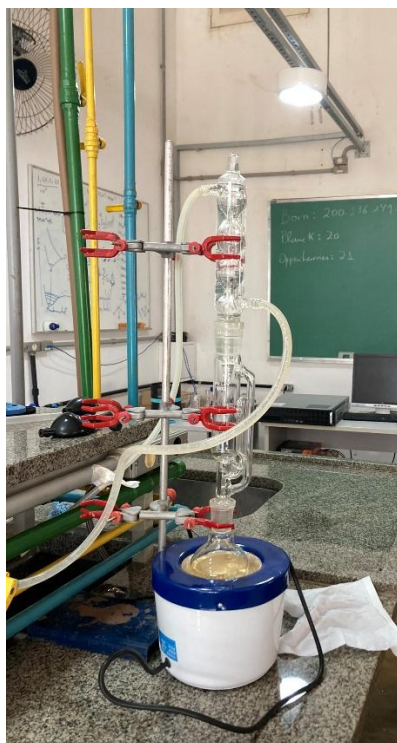
Em relação ao teor de extrativos, levou-se 14 ciclos até que a solução de extração atingisse uma coloração transparente por amostra (**Figura 23 e Figura 24**), os teores calculados estão apresentados na **Tabela 5**. Os extrativos de gramíneas podem variar entre 2 a 5%, assim para a palha de milho obteve-se uma faixa de extração entre 7 a 14% e com uma média dos resultados de 12%, esse valor está dentro da faixa esperada na literatura, em que Mendes (2014) encontrou uma faixa de extração entre 10 a 18% e Paez (2022) obteve uma faixa entre 5 a 9%.

Tabela 5 - Teor de extrativos

Amostra	Massa de palha de milho inicial (g)	Massa de palha de milho final (g)	Extrativo (%)
1	4,09	3,52	13,94
2	3,86	3,28	15,03
3	4,05	3,76	7,16

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Figura 23 - Processo de extração do teor de extrativos da palha de milho



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Figura 24 - Solução extraída após o ciclo 1 (A) e o ciclo 14 (B)



(A)



(B)

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

4.2. Extração da lignina por polpação soda e modificação química por oxidação

A extração da lignina da palha de milho foi realizada utilizando-se diferentes valores de concentração da solução de NaOH (0,25; 0,50; 1,0 e 20 mol.L⁻¹), pois durante a realização da metodologia percebeu-se que a relação entre a concentração da solução de extração e o rendimento estão interligadas, de modo que ao final do processo o rendimento obtido era proporcional a concentração utilizada. No entanto, a massa de palha de milho e a concentração

da solução não tiveram relação, pois a massa de lignina obtida ao final não aumentava, como pode ser observado pela **Tabela 6** em que para a concentração de 1,0 mol.L⁻¹ extraído a partir de 20 g e 60 g de palha de milho obteve-se ao final aproximadamente 2 g de lignina.

Tabela 6 - Teor de lignina extraída da palha de milho pelo método da polpação soda

Concentração de NaOH (mol/L)	Amostra	Massa de palha de milho (g)	Lignina (g)	Rendimento (%)
0,25	1	20,16	1,08	5,36
	2	20,59	0,84	4,08
	3	20,35	0,76	3,73
0,5	1	20,62	0,92	4,46
	2	20,1	1,14	5,67
	3	20,08	0,78	3,88
1,0	1	20,04	2,04	10,18
	2	20,23	0,80	3,95
	3	20,09	2,18	10,85
1,0	1	63,0	-	-
	2	60,05	2,19	3,65
	3	60,07	1,32	2,20
2,0	1	40,0	5,8	14,50
	2	40,02	0,71	1,77
	3	40,03	5,86	14,64

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

No entanto, ao término do processo de extração as ligninas foram levadas para secagem em estufa no papel filtro, assim acabaram aderindo-se ao papel o que ocasionou em uma perda de amostra ao tentar retirar a lignina do papel (**Figura 25**).

Figura 25 - Perda de amostra de lignina após secagem em estufa



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

A aparência física das ligninas difere entre si (**Figura 26**), em que a coloração apresentou diferentes tons de marrom, acredita-se que isso aconteceu devido ao tempo de precipitação da hemicelulose em que a micro agregação das partículas pode ter sido afetado pela alteração do pH (Zhang, Fu e Chen, 2020).

Figura 26 - Ligninas obtidas pelo método de polpação soda e solução de NaOH 2,0 mol.L⁻¹



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Portanto, obteve-se êxito no processo de extração das ligninas, sendo que a concentração de 2,0 mol. L⁻¹ de NaOH foi a que obteve um maior rendimento, logo, essas ligninas foram as escolhidas para o processo de modificação química e aplicação na remoção de turbidez.

A etapa de modificação química é de extrema importância para a aplicação processo de remoção de turbidez da água, pois através do processo de oxidação a lignina se torna catiônica

e tende a ter um melhor desempenho ao alterar a sua capacidade hidrofóbica e sua carga elétrica aniônica, de modo que a lignina ao ser aplicada na água possa dissolver e conseguir agrupar as partículas de matéria orgânica e sólidos em suspensão na água bruta, que possuem carga aniônica. O processo de modificação química foi realizado (**Figura 27**) e as ligninas obtidas foram enviadas para caracterização, de modo a avaliar os efeitos da oxidação com o uso de peróxido de hidrogênio.

Figura 27 - Lignina após modificação química por oxidação



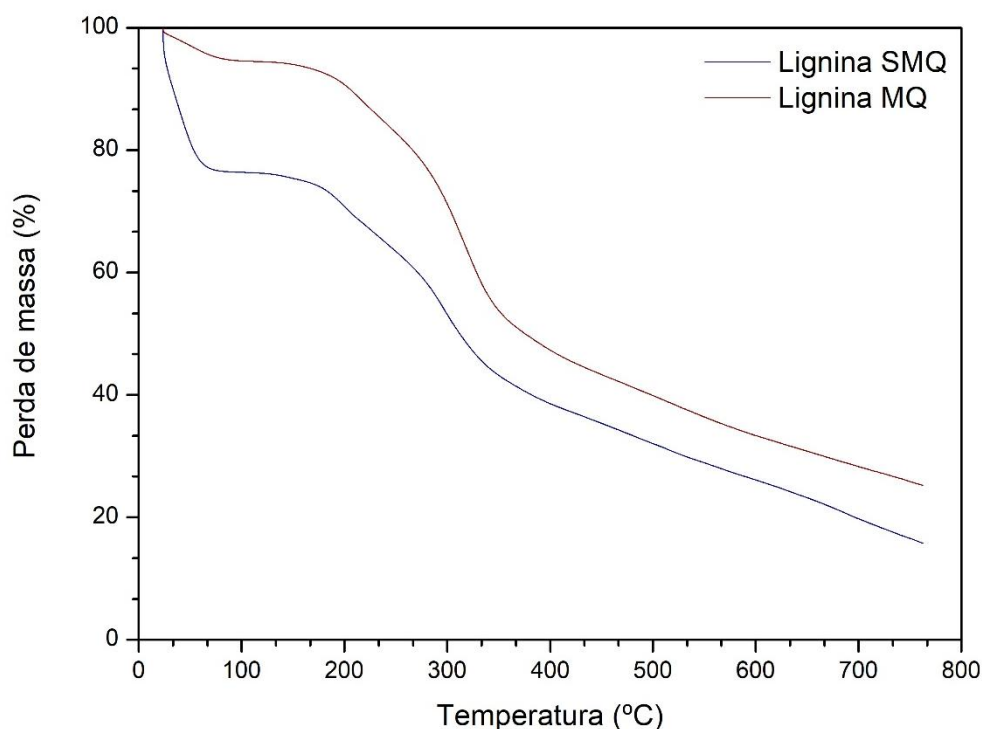
Fonte: Autora do trabalho, 2026.

4.3. Caracterização da lignina após modificação química

4.3.1. Análise termogravimétrica (TGA)

A lignina é um material que tem uma alta resistência térmica, não se degradando completamente ao atingir temperaturas próximas a 800 °C, enquanto a variação do seu comportamento e a velocidade de degradação das amostras se baseia nas suas unidades constituintes e a metodologia utilizada para sua extração. Os valores das ligninas sem modificação química (SMQ) e as ligninas modificadas quimicamente (MQ) apresentaram temperaturas e reações próximas, como mostra as **Figura 28** em que próximo de 100°C registrou a perda da umidade residual do composto, próximo de 250 °C ocorre a degradação dos carboidratos e acima de 400 °C inicia o processo de pirólise da lignina a partir da degradação dos anéis aromáticos (Silva, E., 2025).

Figura 28 - Resultados da análise termogravimétrica (TGA) para a lignina sem modificação química (SMQ) e modificadas quimicamente (MQ)

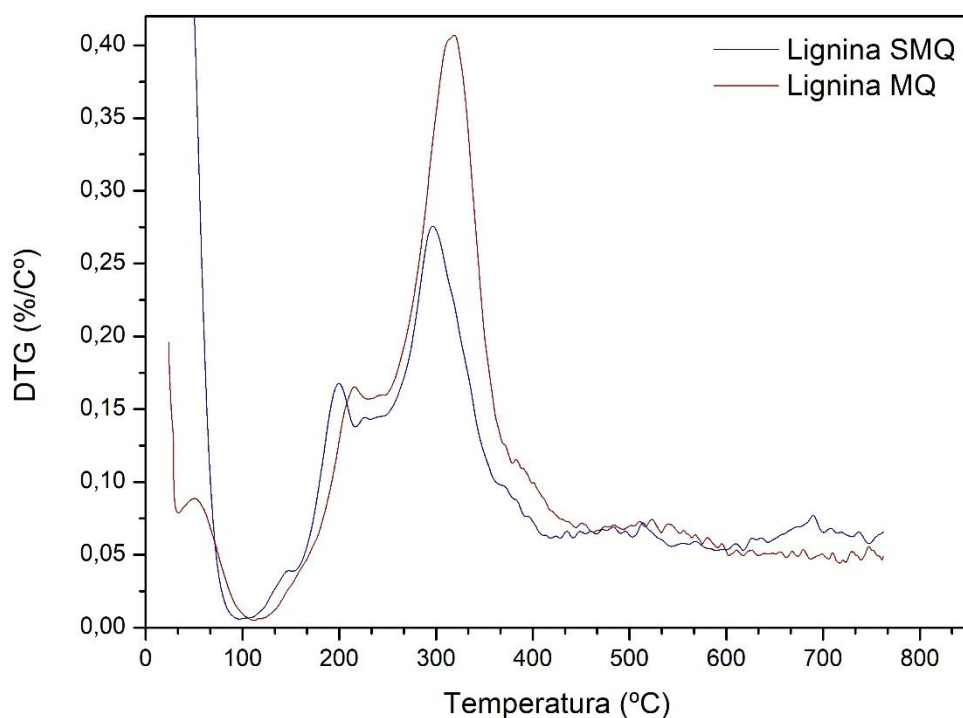


Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Em relação a curva DTG (**Figura 29**), as ligninas apresentaram uma temperatura máxima de degradação próxima, entre 300 a 350°C, em que a diferença está na taxa de degradação, onde picos mais altos indica uma decomposição mais intensa, portanto a lignina MQ atingiu um pico de degradação em uma temperatura um pouco mais acima que a lignina SMQ e com uma taxa de degradação mais acentuada. Já em relação a massa residual, a lignina SMQ obteve uma massa de 15,95%, enquanto a lignina MQ obteve 20,32%.

Portando, a lignina modificada apresentou uma maior estabilidade ao comparada com a lignina sem modificações, pois precisou de uma faixa de temperatura maior para que a degradação atingisse o seu ápice.

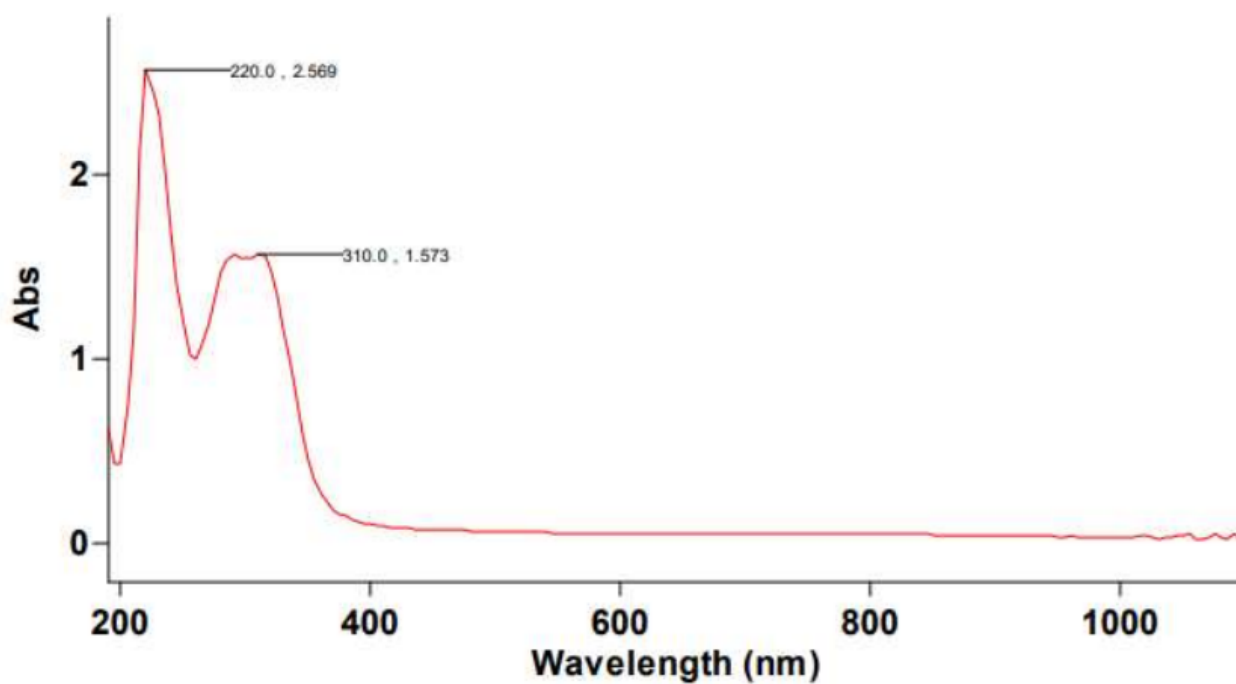
Figura 29 - Resultados da curva DTG para a lignina sem modificação química (SMQ) e modificadas quimicamente (MQ)



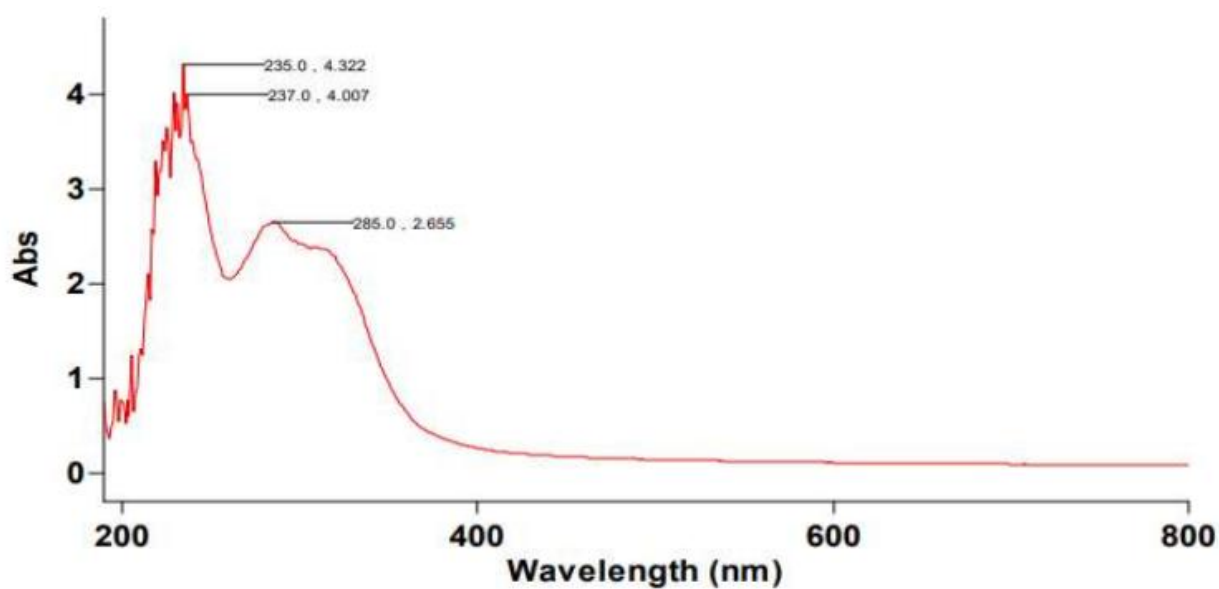
Fonte: Autora do trabalho, 2026.

4.3.2. Espectroscopia no Ultravioleta Visível (UV-Vis)

A lignina é uma molécula rica em grupos aromáticos, a absorção dos raios ultravioletas costuma apresentar um pico em 210 nm, seguido por um ombro a 230 nm e um pico máximo de absorção a 280 nm, esses espectros estão associados com os grupos funcionais dos alcanos, grupos fenólicos condensados e os grupos aromáticos (Araújo, 2022). A partir dos resultados obtidos do espectrofotômetro, nota-se que ambas as amostras de lignina (SMQ e MQ) apresentam valores divergentes dos esperados pela literatura, com picos de absorção localizados em 237 nm (**Figura 30**) e 310 nm (**Figura 31**), respectivamente.

Figura 30 - Espectro UV-Vis das ligninas sem modificação química (SMQ)

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Figura 31 - Espectro UV-Vis das ligninas com modificação química (MQ)

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Os picos de absorção são influenciados pela presença de substitutos nos grupos funcionais gerando o efeito batocrômico, em que ocorre o deslocamento para um comprimento de onda maior (Araújo, 2022), o que pode ter acontecido com as amostras de lignina. Logo, os valores de deslocamento apresentados podem terem sido influenciados pela metodologia de

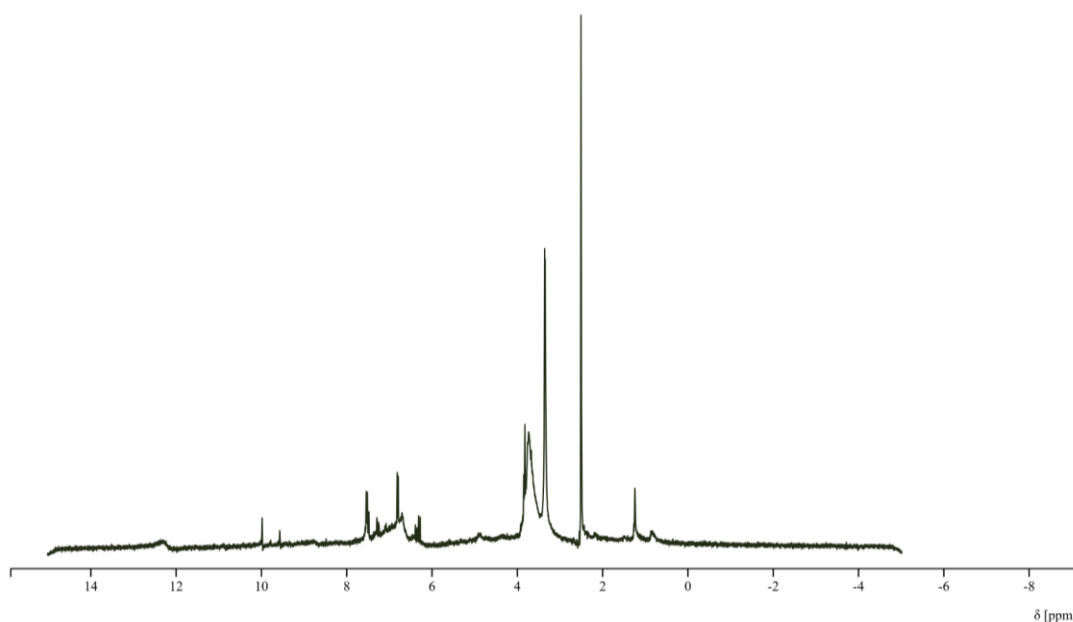
modificação por oxidação com peróxido de hidrogênio e o uso do metanol como solvente no processo de caracterização.

A modificação química a partir do processo de oxidação tende a introduzir a presença de novos grupos funcionais, como as carboxilas e hidroxilas, enfraquecendo os grupos funcionais existentes e alterando as suas propriedades de absorção dos raios ultravioleta. Enquanto a escolha do solvente é um fator importante ao realizar análises do tipo UV-Vis, sendo necessário utilizar um solvente que não absorva a radiação ultravioleta na mesma região que a amostra, o metanol tende a não absorver na faixa de 200 a 250 nm, no entanto, pode ter reagido com a lignina oxidada, causando alterações nos processos de absorção (UFJF, 2013).

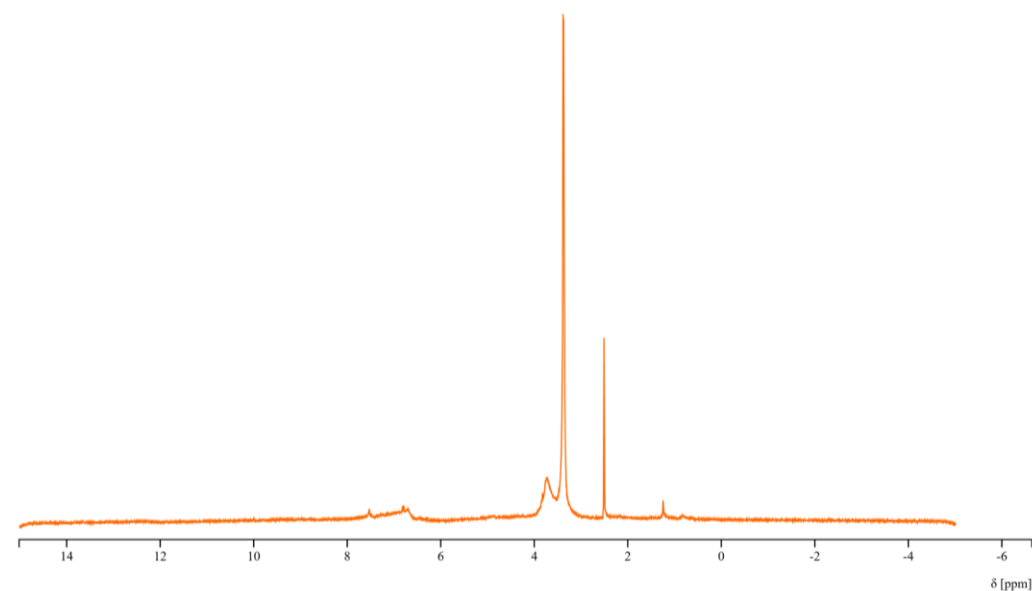
4.3.3. Ressonância Magnética Nuclear (^1H)

Os espectros de RMN apresentam informações sobre a estrutura da lignina a partir das suas ligações químicas. As **Figura 32** e **Figura 33** são os espectros de hidrogênio da lignina SMQ e a lignina MQ, respectivamente.

Figura 32 - Espectros de RMN ^1H da lignina sem modificação química (SMQ)



Fonte: Autora do trabalho, 2026

Figura 33 - Espectros de RMN ^1H da lignina com modificação química (MQ)

Fonte: Autora do trabalho, 2026

As duas ligninas apresentaram valores típicos encontrados na literatura e um sinal intenso na região de 2,0 - 3,0 ppm associado a solução de DMSO- d_6 utilizada no experimento, portanto para compreender as principais diferenças na quantidade de hidrogênios presentes em cada lignina utilizou-se o programa *NMIR*, que permitiu extrair uma porcentagem aproximada da quantidade de hidrogênios em cada amostra nas principais faixas, esse valor é um indicio da quantidade da presença de grupos funcionais nas amostras, em que quanto maior for a intensidade do sinal do espectro, maior será a sua porcentagem (**Tabela 7**).

Tabela 7 - Atribuições e porcentagem dos sinais de RMN ^1H das ligninas SMQ e MQ

Tipo de hidrogênio responsável pelo sinal	Lignina sem modificação química (SMQ)		Lignina modificada quimicamente (MQ)	
	Hidrogênio relativo (%)	Faixa δ (ppm)	Hidrogênio relativo (%)	Faixa δ (ppm)
Região dos alifáticos	24,3	0 - 2,51	20	0,14 - 2,51
Metoxilas	28,29	2,80 - 4,16	43	2,85 - 4,19
Benzílicos	9,71	4,45 - 5,71	8,83	4,56 - 5,77
Aromáticos	17,42	6,14 - 9,27	12,76	6,46 - 7,64
	26,33	7,90 - 9,27	11,35	8,17 - 10,04
Ácidos carboxílicos e aldeídos	5,56	9,55 - 10,49	4,28	9,38 - 10,12

Fonte: Elaborada pela autora do trabalho (2026) e adaptado de José, 2023.

A região de 2,80 - 4,00 ppm é referente aos grupos das metoxilas, para a lignina MQ esse sinal está mais intenso do que para a lignina SMQ, enquanto que na região de 6,00 - 10,00 ppm referente aos aromáticos, ácidos carboxílicos e aldeídos acontece o contrário, onde a lignina SMQ apresentou um pico mais acentuado. A diminuição dos grupos aromáticos, ácidos carboxílicos e aldeídos na lignina MQ pode estar associado a metodologia de extração por polpação soda seguida de oxidação com peróxido de hidrogênio, pois o uso dessas soluções tende a quebrar o anel aromático e gerar aldeídos, ácidos e dióxido de carbono, no entanto o tempo para a formação dos aldeídos pode ter sido menor do que o tempo para a degradação dos anéis aromáticos, assim durante a formação da lignina MQ ao invés de se haver um aumento da formação desses grupos funcionais, houve a degradação (Deng *et al.*, 2020). Portanto, pela diminuição da presença desses grupos funcionais, ocasionou com que as metoxilas apresentassem um pico mais intenso na lignina MQ, devido a redistribuição dos sinais de hidrogênio presentes na amostra (Saliba *et al.*, 2001).

4.3.4. Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As ligninas extraídas e modificadas apresentaram bandas características da literatura, em que as suas variações estão associadas com o material utilizado e a metodologia de extração. As atribuições de cada sinal de espectro identificado estão apresentadas na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Atribuição das bandas no espectro do infravermelho (cm^{-1}) de lignina SMQ, MQ e comparativo com a literatura

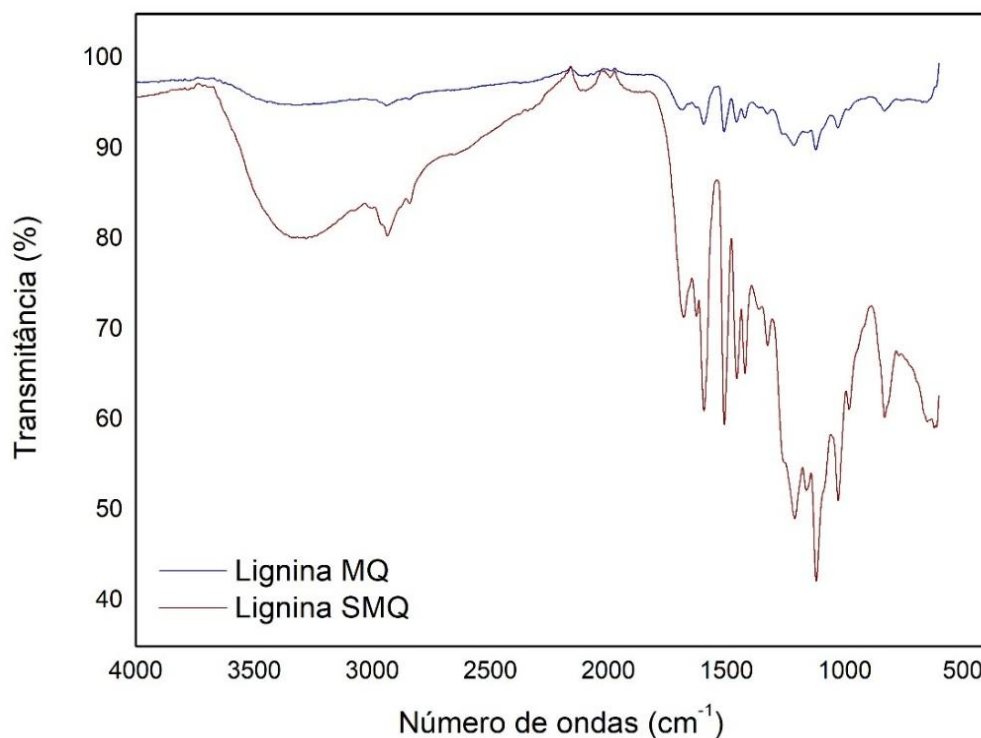
Atribuições	Número de onda (cm^{-1})	
	Lignina SMQ	Lignina MQ
Deformação de C-H fora do plano nas posições 2, 5 e 6 de unidade G	831	832
Deformação -HC=CH- fora do plano	981	984
Deformação no plano de C-H aromático, deformação C-O em álcoois primários, influenciada por estiramento C=O não conjugado	1.027	1028
Deformação no plano de C-H aromático e deformação C=O de álcoois secundários	1.161	1214
Estiramento de C-H alifático em CH_3 , mas não em OCH_3	1.362	1361
Vibrações do esqueleto aromático combinados com	1.421	1422

deformação C-H no plano		
Deformações assimétricas C-H em -C-H ₃ e -C-H ² -	1.457	1457
Vibrações do esqueleto aromático	1.509	1510
Vibrações do esqueleto aromático influenciados por estiramento C=O	1.596	1597
Estiramento C-H em grupos metílicos e metilênicos	2.935	2843
	3.279	3308
Estiramento O-H	-	3369
	-	3445

Fonte: Elaborada pela autora do trabalho (2026) e adaptado de F. Oliveira (2015)

Ao analisar as bandas identificadas, as ligninas sem modificação química (SMQ) e as ligninas modificadas quimicamente (MQ) apresentaram as mesmas faixas e atribuições aos grupos funcionais, no entanto pelas **Figura 34** nota-se a diferença entre a intensidade dessas atribuições. Para análises de FTIR, a intensidade está associado a transmitância percentual, sendo a razão da intensidade dos dois feixes em que a amostra é submetido, a transmitância é o inverso da absorbância, logo, quanto mais próximo essa porcentagem for de 100% indica que tem uma baixa presença daquele grupo funcional que absorveu o infravermelho emitido, enquanto valores baixos de transmitância indicam uma alta absorção, ou seja, existe uma maior presença dos grupos funcionais que absorveram o infravermelho (UFJF, 2013).

Figura 34 - Atribuição das bandas no espectro do infravermelho (cm^{-1}) de lignina modificada quimicamente (MQ) e sem modificação química (SMQ)



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Para as ligninas SMQ, percebe-se que a intensidade dos sinais de transmitância varia entre 40 e 80%, apresentando um comportamento esperado de que existem mais grupos funcionais que absorvem o infravermelho do que outros, como os aromáticos e álcoois primários e secundários nos picos que tiveram uma transmitância de 42,20% e 51,12% nos comprimentos de onda de 1027 e 1661 cm^{-1} , em comparativo com os grupos metílicos com intensidade de 80,41% no comprimento de onda de 2935 cm^{-1} .

No entanto, para as ligninas MQ a intensidade de transmitância apresentou-se entre 85 e 95%, ou seja, existem poucos grupos funcionais presentes na amostra, esse resultado está atrelado com o que foi apresentado pela Ressonância Magnética Nuclear ^1H (RMN ^1H), em que após a modificação houve uma diminuição da presença dos grupos funcionais na lignina modificada, por exemplo os aromáticos que apresentaram intensidade de 92,78% no comprimento de onda de 1297 cm^{-1} .

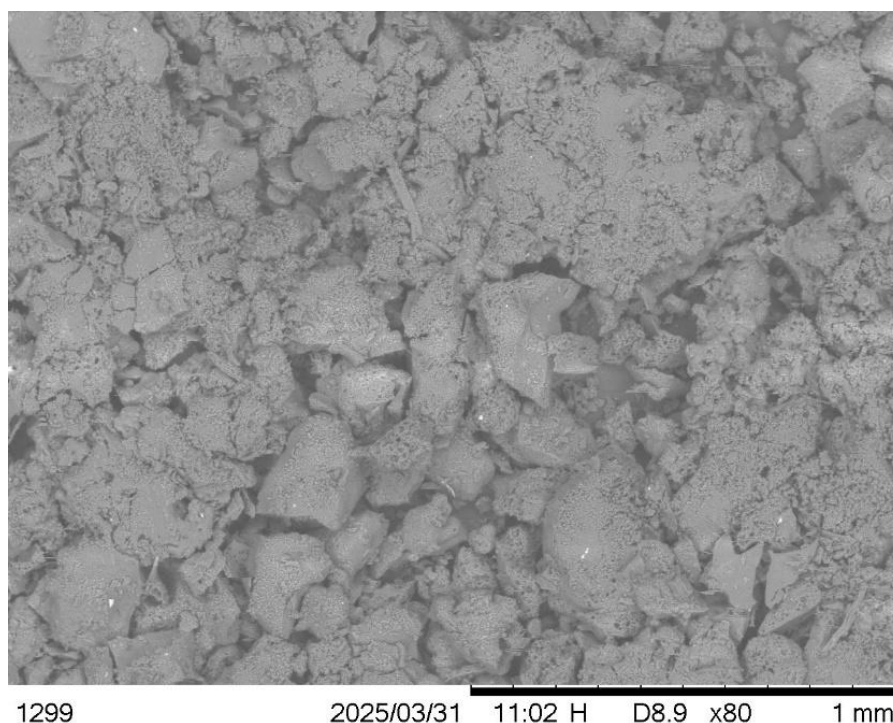
A presença do estiramento das hidroxilas nas amostras também é importante de ser avaliado, para a lignina SMQ apresentou um pico em 3279 cm^{-1} e para a lignina MQ apresentou dois picos em 3369 e 3345 cm^{-1} .

A baixa presença dos grupos funcionais nas amostras após modificação pode terem acontecido devido a um erro operacional na execução da análise ou ser um indicativo que a modificação química com o peróxido de hidrogênio causou uma degradação na estrutura da lignina, fazendo com que os grupos funcionais presentes na amostra sem modificação química agora estão em baixas quantidades na amostra modificada.

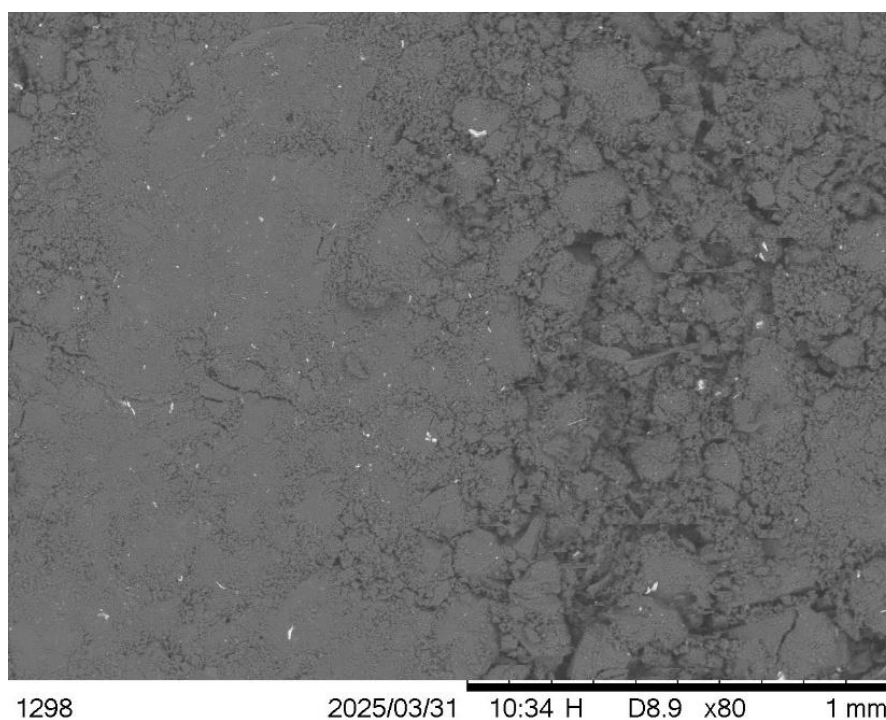
4.3.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS)

As **Figura 35** e **Figura 36** apresentam as imagens da Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as ligninas SMQ e MQ, respectivamente. Nota-se a diferença na configuração das partículas, em que as ligninas SMQ apresentam-se como grãos menos definidos, enquanto a lignina MQ tem uma maior heterogeneidade, em suas bordas apresenta degradações ocasionadas pela extração com hidróxido de sódio seguida do processo de oxidação com peróxido de hidrogênio (Maziero *et al.*, 2012).

Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura da lignina modificada quimicamente (MQ)



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura da lignina sem modificação química (SMQ)

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

As ligninas são compostas de carbono e oxigênio, logo a sua presença nas análises EDS, já eram esperadas (**Tabela 9** e **Tabela 10**). Enquanto o alumínio, sódio e cloro são resíduos inorgânicos causados pela metodologia de extração dessas amostras, já o silício é o semicondutor utilizado na realização do experimento (EMBRAPA, 2020). A ausência desses elementos na lignina após a oxidação (MQ) é um indicativo de que a aplicação do peróxido de hidrogênio eliminou os compostos inorgânicos, alterando a amostra (Novia *et al.*, 2022).

Tabela 9 - Composição química da lignina sem modificação química (SMQ) em Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS)

Elemento	Porcentagem em massa (%)
Carbono (C)	62,35
Oxigênio (O)	34,78
Alumínio (Al)	0,39
Cloro (Cl)	1,21
Sódio (Na)	0,76
Silício (Si)	0,28

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Tabela 10 - Composição química da lignina sem modificação química (SMQ) em Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS)

Elemento	Porcentagem em massa (%)
Carbono (C)	63,39
Oxigênio (O)	36,46
Alumínio (Al)	0,18

Fonte: Autor do trabalho, 2026.

4.4. Jar Test

Preparou-se a água sintética utilizando solo argiloso, essa água foi mantida em um recipiente durante o período de testes e agitada antes de cada batelada, na tentativa de homogeneizar as turbidezes iniciais em cada repetição. Os parâmetros de qualidade da água estão apresentados pela **Tabela 11**.

Tabela 11 - Parâmetros de qualidade iniciais da água sintética

Parâmetros de qualidade	
Turbidez (NTU)	631
pH	6,90
Temperatura (°C)	25

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

4.4.1. Sulfato de alumínio como coagulante

Foi realizado três bateladas de Jar Test aplicando o sulfato de alumínio como o coagulante primário (**Figura 37**) e avaliado a remoção de turbidez em dois tempos distintos de decantação, 10 e 30 minutos.

Figura 37 - Turbidez da água antes da adição do sulfato de alumínio (A) e após adição (B)



(A)

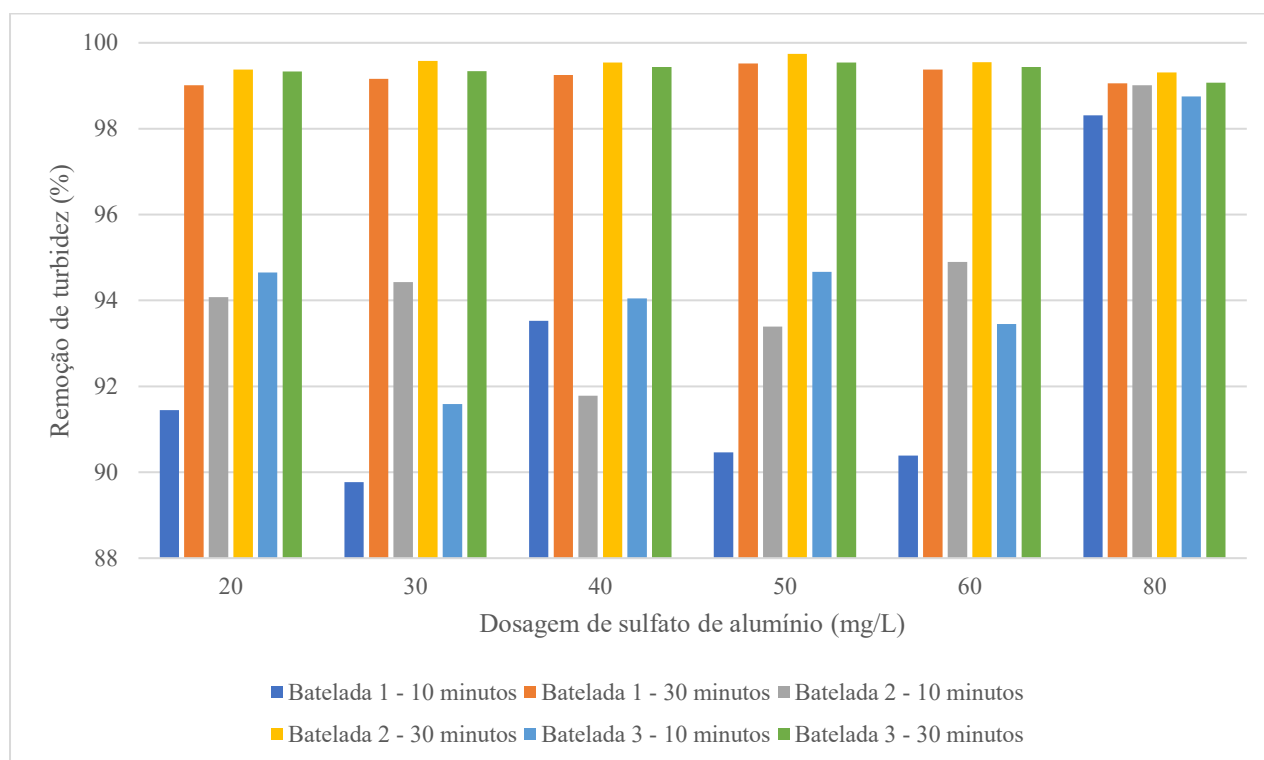
(B)

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Utilizou-se uma faixa de dosagem de 20; 30; 40; 50; 60 e 80 mg.L⁻¹ e obteve-se as seguintes taxas de remoção apresentadas pelo **Figura 38**.

Avaliou-se as duas melhores dosagens para cada tempo e batelada em que para o tempo de decantação de 10 minutos as melhores dosagens foram de 40, 50, 60 e 80 mg.L⁻¹, enquanto para o tempo de decantação de 30 minutos as melhores dosagens são de 30, 50 e 80 mg.L⁻¹, portando avaliando os dois tempos de decantação escolheu-se as dosagens de 80 mg.L⁻¹ pelo seu desempenho em conseguir remover turbidez em um menor tempo, sendo de 10 minutos, e a dosagem 50 mg.L⁻¹ pelo alto teor de turbidez removida com menor dosagem.

Figura 38 - Gráfico da remoção de turbidez (%) após aplicação de sulfato de alumínio



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

A aplicação de sulfato de alumínio na água tende a alterar o seu pH, os valores monitorados estão apresentados na **Tabela 12**, a dosagem de 80 mg.L⁻¹ alterou o pH inicial da água para ácida, portanto, seria necessário a correção com adição de alcalinizante.

Tabela 12 - Valores de pH obtidos após a adição de sulfato de alumínio

Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	Batelada 1	Batelada 2	Batelada 3
20	6,8	6,8	6,8
30	6,6	6,6	6,5
40	6,4	6,4	6,3
50	6,3	6,3	6,1
60	6	6,1	6
80	5,7	5,7	5,3

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

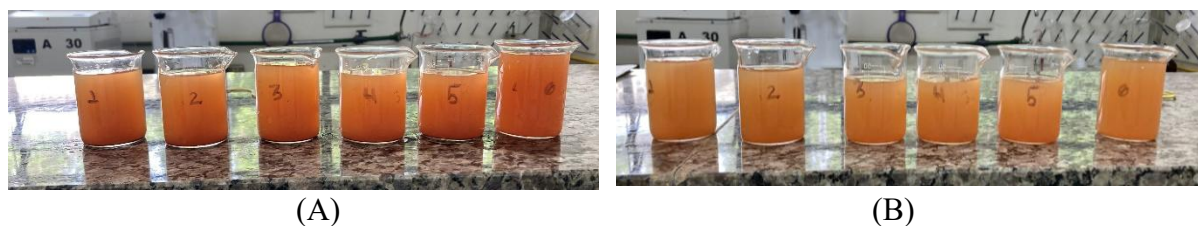
4.4.2. Lignina como coagulante

Em relação a lignina, adicionou-se dosagens de 30, 60 e 90 mg.L⁻¹ nos jarros e manteve-se as mesmas condições operacionais, três bateladas e tempo de decantação de 10 e 30 minutos (**Tabela 13**). A estabilização das partículas coloidais e remoção de turbidez não aconteceu como esperado, durante a etapa de floculação não houve a formação de flocos, as partículas se mantiveram em suspensão no jarro e em alguns jarros a turbidez aumentou, apresentado pelos valores negativos de remoção, devido a dissolução das partículas no meio, enquanto nos jarros em que houve uma alteração da turbidez está associado a decantação pela gravidade após os período de sedimentação, portanto não houve efetivamente uma remoção de turbidez, como é observado pela **Figura 39**.

Tabela 13 - Remoção de turbidez (%) após aplicação de lignina

Dosagem de lignina (mg/L)	Batelada 1		Batelada 2		Batelada 3	
	10 minutos	30 minutos	10 minutos	30 minutos	10 minutos	30 minutos
30	-30,95	-3,36	-15,61	7,98	-41,70	-28,70
60	-27,36	-0,13	-8,81	13,60	-36,12	-27,94
90	-22,70	3,07	6,61	17,15	-7,10	22,24

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Figura 39 - Turbidez após adição de lignina (A) e tempo de decantação de 30 minutos (B)

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

A ausência do efeito da lignina na remoção de turbidez pode estar relacionada ao seu caráter hidrofóbico, era esperado que devido o êxito na modificação química alterasse essa propriedade, de modo que as cargas entre a lignina e as partículas coloidais se aglomerassem, no entanto o processo de oxidação pode não ter sido o suficiente para alterar o conjunto de ligninas extraídas, pois ao preparar a solução notou-se a precipitação de sólidos. Outra possibilidade é a limitação da margem de dosagem escolhida, segundo (Zaidi et al., 2019) a dosagem ideal de remoção de turbidez para ligninas é de 90 mg.L^{-1} , no entanto devido perda da lignina extraída pela aderência ao papel filtro, foi-se necessário adotar uma margem de dosagem de coagulação mais restritiva, logo, é provável que dosagens acima de 90 mg.L^{-1} apresentassem resultados mais positivos. Em relação ao pH, a adição de lignina não alterou o pH da água (**Tabela 14**).

Tabela 14 - Valores de pH obtidos após a adição de lignina

Dosagem Lignina (mg.L^{-1})	pH		
	Batelada 1	Batelada 2	Batelada 3
30	7,17	7,14	7,4
60	7,15	7	7,11
90	7,1	7,2	7,3

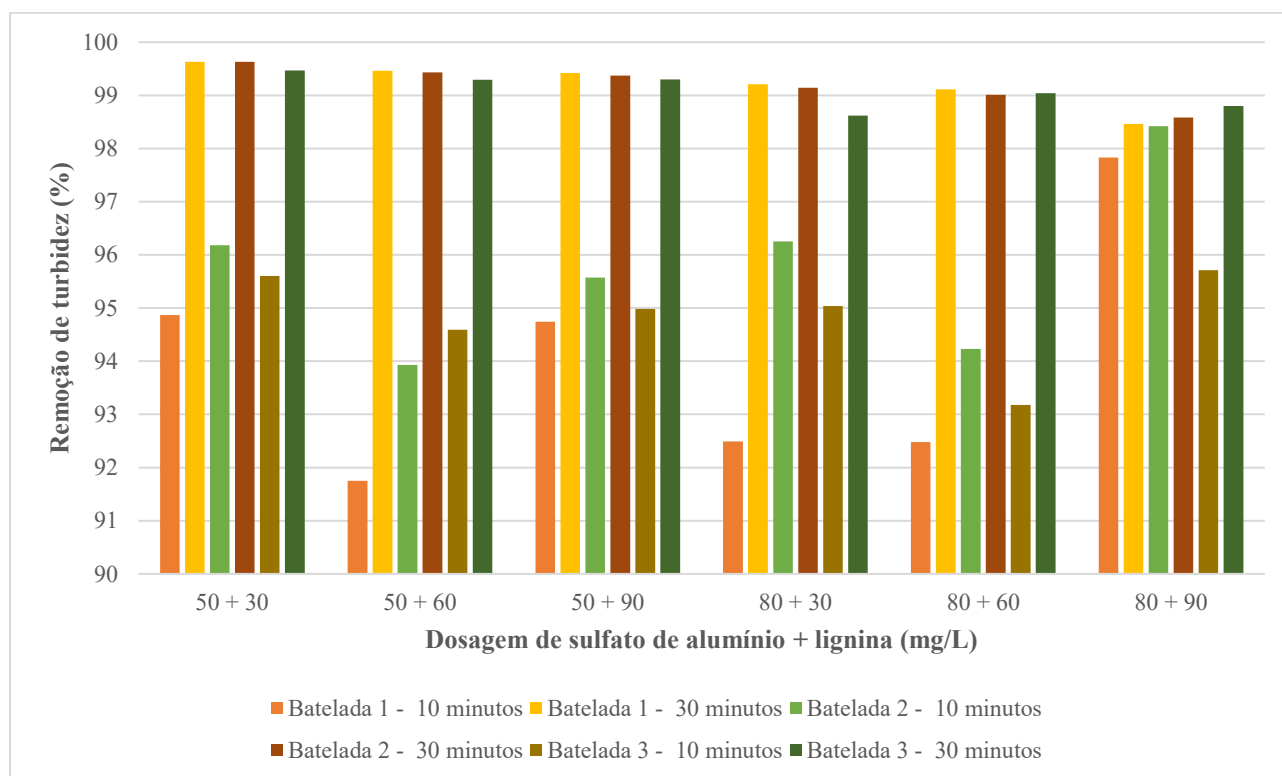
Fonte: Autora do trabalho, 2026.

4.4.3. Sulfato de alumínio como coagulante e lignina como auxiliar de coagulação

Foram aplicadas duas melhores dosagens de sulfato de alumínio como coagulante primário, 50 e 80 mg.L^{-1} e as três dosagens de lignina de 30; 60 e 90 mg.L^{-1} como auxiliar de coagulação. Com base no efeito da remoção de turbidez, apresentado pela **Figura 40**, as melhores combinações para o tempo de decantação de 10 minutos foram $50 \text{ mg.L}^{-1} + 30 \text{ mg.L}^{-1}$

¹, 80 mg.L⁻¹ + 30 mg.L⁻¹ e 80 mg.L⁻¹ + 90 mg.L⁻¹, enquanto para o tempo de 30 minutos obteve-se 50 mg.L⁻¹ + 30 mg.L⁻¹, 50 mg.L⁻¹ + 60 mg.L⁻¹, 50 mg.L⁻¹ + 90 mg.L⁻¹ e 80 mg.L⁻¹ + 90 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio e lignina, respectivamente.

Figura 40 – Gráfico de remoção de turbidez (%) após aplicação de sulfato de alumínio e lignina



Fonte: Autora do trabalho, 2026.

Para avaliar os efeitos da remoção de turbidez e os efeitos da lignina como auxiliar de coagulação, aplicou-se a metodologia ANOVA (**Tabela 15**).

Tabela 15 - Análise estatística de variância (ANOVA) para a remoção de turbidez

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor	Significância
Sulfato	1	0,631	0,631	5,295	0,030	* p < 0.05
Lignina	2	0,443	0,222	1,860	0,177	ns p > 0.05 (não significativo)
Tempo	1	30,09	30,09	252,57	3,06E-14	*** p < 0.001
Sulfato:Lignina	2	0,28	0,14	1,16	0,33	ns p > 0.05 (não significativo)
Sulfato:Tempo	1	1,68	1,68	14,07	0,001	*** p < 0.001
Lignina:Tempo	2	1,26	0,63	5,27	0,01	* p < 0.05
Sulfato:Lignina:Tempo	2	0,44	0,22	1,84	0,18	ns p > 0.05 (não significativo)

Resíduos	24	2,86	0,12	-	-	-	-
----------	----	------	------	---	---	---	---

Fonte: Autora do trabalho, 2026.

O fator do tempo de decantação foi o de maior influência nos resultados obtidos (p-valor $< 0,001$), o que era esperado considerando a remoção de turbidez apresentada anteriormente, em que para tempos de decantação de 30 minutos era obtido um teor de remoção acima de 95%. Assim como também era esperado que a interação entre os coagulantes e o tempo de decantação também fosse significativa, em que com o tempo de sedimentação dos flocos a turbidez residual da água fosse diminuída. Já a interação sulfato de alumínio, lignina e tempo não foram significativos, portanto, a hipótese levantada de que a lignina poderia atuar como auxiliar de coagulação se conclui como inválida, a lignina não aumentou a eficiência de remoção do sulfato ou auxiliou no processo.

Para garantir a validade dos resultados, executou o Teste de Shapiro-Wilk e Levene e obteve-se um p-valor de 0,45 e 0,83 respectivamente, ou seja, os resíduos do teste de ANOVA respeitam a normalidade e a homogeneidade (p-valor $< 0,05$).

Por fim, pelo Teste de Tukey (**Tabela 16**) é possível definir a dosagem ideal, em que dosagens pertencentes a grupos com a mesma letra não são diferentes estatisticamente, logo, a dosagem ideal seria de 50 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio, com 30 mg.L⁻¹ de lignina e o tempo de decantação de 30 minutos, que resultou em um teor de remoção de 99,57%.

Tabela 16 - Teste de Tukey para a remoção de turbidez

Dosagem de sulfato de alumínio (mg.L ⁻¹)	Dosagem de lignina (mg.L ⁻¹)	Tempo de decantação (min)	Grupo
80	60	10	a
50	60	10	ab
80	30	10	ab
50	90	10	ab
50	30	10	ab
80	90	10	bc
80	90	30	cd
80	60	30	cde
80	30	30	cde
50	90	30	de
50	60	30	de

50

30

30

e

 Fonte: Autora do trabalho, 2026.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sendo assim, a extração da palha de milho utilizando a metodologia de polpação soda teve-se êxito, em que a quantidade de massa de lignina removida está associada com a concentração da solução de hidróxido de sódio. Em relação a modificação química por peróxido de hidrogênio, a partir da caracterização por UV-Vis, TGA, RMN H^1 , FTIR, MEV e EDS a oxidação teve efeito em alterar a fração inorgânica, absorção e degradação térmica da lignina, no entanto não foi capaz de alterar o seu caráter hidrofóbico.

A avaliação do teor de remoção de turbidez é um dos principais parâmetros para definir a capacidade de atuação de um coagulante para Estações de Tratamento de Água, logo, a ausência de interação entre a lignina como o coagulante primário e as partículas em suspensão ocasionou em um teor de remoção nulo, também foi constatado pela análise ANOVA que a lignina não teve efeito como auxiliar de coagulação.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de água sintética com turbidez abaixo de 100 NTU e avalie-se os impactos da alteração do pH com a lignina, valores de turbidez acima não são representativos para a operação de uma estação, e uma variação na faixa de dosagem de lignina com valores de concentração acima dos valores utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, Adilson dos. Análise de Variância. In: ANJOS, Adilson dos. **Planejamento de Experimentos I**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. Cap. 8. p. 1-98. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~aanjos/CE213/apostila.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2026.

ARAÚJO, Filipe Bilio. **EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE LIGNINA DA FIBRA DA CASCA DE COCO**. 2022. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em:

<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/48034/1/TCC%20Filipe%20Bilio%20Ara%C3%BAJo.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2026.

BATISTA, Ana Claudia Gama. **Influência da sulfidez sobre a qualidade da lignina kraft recuperada**. 2020. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Produtos Florestais,

Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-05102020-133209/publico/Ana_Claudia_Gama_Batista_versao_revisada.pdf. Acesso em: 05 fev. 2026.

BOHN, L. R. *et al.* CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA PALHA DE MILHO OBTIDA DURANTE A ETAPA DE COLHEITA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2017, São Carlos. **CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA PALHA DE MILHO OBTIDA DURANTE A ETAPA DE COLHEITA**. São Carlos: Ufscar, 2017. p. 1-6. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/chemicalengineeringproceedings/cobeqic2017/236.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 111, 7 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 14 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 11445, de 5 de janeiro de 2007. Diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, DF, Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm. Acesso em: 19 jan. 2026.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. CURSO BÁSICO DE VIGILÂNCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO: módulo ii: abastecimento de água. Brasília, 2020. 43 p. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/curso_basico_vigilancia_qualidade_agua_modulo_II_aula_2.pdf. Acesso em: 23 jan. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 14 abr. 2026.

Citação no texto (autor-data):

CUNHA, Dayana Alves da Silva; CABRAL, Márcia Regina Pereira; SOARES, Eva Ramona Pereira; ANTONIO, Denise Sguarizi; CABEZA, Natália Aparecida. **APLICAÇÕES DE ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) PARA CARACTERIZAÇÃO DE COMPLEXOS**. ANAIS DO ENIC, [S. l.], n. 6, 2015. Disponível em: <https://anaisonline.uems.br/index.php/enic/article/view/2259>. Acesso em: 26 fev. 2026.

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. **Princípios e aplicações de análise térmica**. 2012. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042013-151955/publico/GabrielaBuenoDenari_Revisado_Anexo.pdf. Acesso em: 05 fev. 2026.

DENG, Haibo et al. Rules and mechanism for the oxidation of lignin-based aromatic aldehyde under alkaline wet oxygen. *Bioresources*, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/rules-and-mechanism-for-the-oxidation-of-lignin-based-aromatic-aldehyde-under-alkaline-wet-oxygen/#>. Acesso em: 15 mar. 2026.

DI BERNARDO, Luiz e DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: RiMa. 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa) (ed.). *Metodologia de Caracterização Físico-Química de Lignina Kraft*. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2020. 27 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1123698/metodologia-de-caracterizacao-fisico-quimica-de-lignina-kraft>. Acesso em: 24 fev. 2026.

FLORENÇANO, José Carlos S.. **Saneamento Básico: sistemas de tratamento e distribuição de água**. 2. ed. Taubaté: Universidade de Taubaté, 2011. 132 p. Disponível em: https://engenhariacivilfsp.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/03/apostila-agua-_nova-2011_-alunos.pdf. Acesso em: 12 maio 2026.

FUKUSHIMA, Romualdo Shigueo; HATFIELD, Ronald Donald. Espectros de duas formas de lignina obtidos por ressonância magnética nuclear. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 505-511, abr. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2003000400009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/vt8bhKs9RfSJHh3BGYNDvDq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 fev. 2026.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. Ministério da Saúde. Manual prático de análise de água. 4. ed. Brasília: Aaaaaa, 2013. 153 p. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/507/Manual%20pr%C3%A1tico%20de%20an%C3%A1lise%20de%20%C3%A1gua%20%202013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 dez. 2025.

JOSÉ, Álvaro Henrique Mello. Estudo comparativo de métodos de pré-tratamento do sabugo de milho e piaçava: caracterização e potencialização na separação das frações para aplicações sustentáveis. 2023. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia Industrial, Universidade de São Paulo, Lorena, 2023. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97140/tde-11122024-164740/publico/BIT23006_O.pdf. Acesso em: 21 fev. 2026.

KRUPINSKA, Izabela. Aluminium Drinking Water Treatment Residuals and Their Toxic Impact on Human Health. **Molecules**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 641, 2 fev. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules25030641>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7037863/>. Acesso em: 31 mar. 2026.

LIMA, Paulo Renato; ALMEIDA, Igor Vivian de; VICENTINI, Veronica Elisa Pimenta. OS DIFERENTES TIPOS DE COAGULANTES NATURAIS PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA REVISÃO. **Evidência: Biociências, saúde e inovação**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 9-12, 17 ago. 2020. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/evidencia/article/view/24704/14834>. Acesso em: 01 abr. 2026.

MALISKA, Ana Maria. **Microscopia eletrônica de varredura**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. 97 p. Disponível em: https://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf. Acesso em: 23 fev. 2026.

MARABEZI, Karen. Estudos sistemáticos das reações envolvidas na determinação dos teores de Lignina e Holocelulose em amostras de Bagaço e Palha de Cana-de-açúcar. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Físico-Química, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75131/tde07102009100309/publico/KarenMara-bezi.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

MAZIERO, P. *et al*, A. R. Structural features of lignin obtained at different alkaline oxidation conditions from sugarcane bagasse. *Industrial Crops and Products*, v. 35, p. 61– 69, 2012.

MENDES, Carlos Augusto de Carvalho. **Caracterização e utilização do resíduo de palha de milho para obtenção de nanocelulose**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/bitstream/1/15768/1/Carlos%20Augusto%20de%20Carvalho%20Mendes.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2026.

MILÉO, Patrícia Câmara. **Estudo do uso de ligninas como agente compatibilizante em compósitos de polipropileno reforçados com celulose de bagaço e palha de cana-de-açúcar**. 2015. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia Industrial, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97131/tde-05082015-152125/publico/BIT15005_C.pdf. Acesso em: 18 abr. 2026.

MIRANDA, Iara Conceição de. **ESTUDO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS DE DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS E CARACTERIZAÇÃO POR TA, FTIR E EDXRF**. 2013. 336 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://tpqb.eq.ufjf.br/download/decomposicao-termica-de-residuos-lignocelulosicos-e-caracterizacao-por-ta-ftir-e-edxrf.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2026.

MORIYA, Regina Yanako. **Uso de xilanases e lacases de microrganismos no branqueamento de polpas organosolv de palha de cana-de-açúcar e estudo dos derivados celulósicos obtidos**. 2007. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia Industrial, Universidade de São Paulo, Lorena, 2007. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/antigas/2007/BIT07002.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2026.

MOUSAVIOUN, Payam; DOHERTY, William O.s.; GEORGE, Graeme. Thermal stability and miscibility of poly(hydroxybutyrate) and soda lignin blends. *Industrial Crops And Products*, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 656-661, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.08.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669010002025?via%3Dihub>. Acesso em: 17 abr. 2026.

MORTARA, Fernando Cintra. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos aneróbios**. 2011. 242 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-12122011-135720/publico/Dissertacao_Fernando_Cintra_Mortara.pdf. Acesso em: 11 set. 2025.

MOURA, André Fogagnoli de et al. O uso de polímeros no tratamento de efluentes. 2024. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Técnico em Química, Etec Prefeito Alberto Feres, Araras, 2024. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/27763/1/quimica_2024_2_andrefogagnoli_polimerosusadosেমtratamentodeagua.pdf. Acesso em: 15 abr. 2026.

NAKANISHI, S. C.; GONÇALVES, A. R.; ROCHA, G.; BALLINAS, M. L.; GONZALES, G. Obtaining polymeric composite membranes from lignocellulosic components of sugarcane bagasse for use in wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, v. 27, p. 66-71, 2011.

NOVIA, Novia *et al.* Kinetics of Lignin Removal from Rice Husk Using Hydrogen Peroxide and Combined Hydrogen Peroxide–Aqueous Ammonia Pretreatments. **Fermentation**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 8-157, 1 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/fermentation8040157>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/359659747_Kinetics_of_Lignin_Removal_from_Rice_Husk_Using_Hydrogen_Peroxide_and_Combined_Hydrogen_Peroxide-Aqueous_Ammonia_Pretreatments. Acesso em: 24 fev. 2026.

OLIVEIRA, Fernando de Carvalho. Oxidação de lignina proveniente de resíduos lignocelulósicos agroindustriais para obtenção de compostos químicos aromáticos de maior valor agregado. 2015. 199 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia Industrial, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97131/tde-05082015-153217/publico/BIT15007_C.pdf. Acesso em: 09 mar. 2026.

OLIVEIRA, Paulo Henrique Silva de. **Obtenção e caracterização de lignina de palha de cana de açúcar pelo processo Organossolv**. 2023. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2023. Disponível em: https://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/paulo-henrique-silva-oliveira.pdf. Acesso em: 01 abr. 2026.

PAEZ, Scheila Beatriz. **EXTRAÇÃO DA FIBRA CELULÓSICA DE RESÍDUO DA COLHEITA DO MILHO UTILIZANDO LÍQUIDOS IÔNICOS**. 2022. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/29846/1/extracaoofibralliquidosionicos.pdf>. Acesso em: 08 maio 2026

QUINELATO, Cristiane. **Métodos de Extração da Lignina do Bagaço da Cana-de-Açúcar do Noroeste do Estado de São Paulo**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/00612e6f-9067-4d24-97a8-bbd7bfbbc2a2/content>. Acesso em: 01 mar. 2026.

RUWOLDT, Jost; TANASE-OPEDAL, Mihaela; SYVERUD, Kristin. Ultraviolet Spectrophotometry of Lignin Revisited: exploring solvents with low harmfulness, lignin purity, hansen solubility parameter, and determination of phenolic hydroxyl groups. *Acs Omega*, [S.L.], v. 7, n. 50, p. 46371-46383, 5 dez. 2022. American Chemical Society (ACS).

<http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.2c04982>. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsomega.2c04982?ref=article_openPDF. Acesso em: 26 jan. 2026.

SALAZAR, R. F. S. et al. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DA PALHA DE MILHO PARA POSTERIOR UTILIZAÇÃO COMO SUPORTE NA PREPARAÇÃO DE COMPÓSITOS. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 7., 2008. p. 1-6. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Rodrigo-Salazar-10/publication/235645089_Estudo_da_composicao_da_palha_de_milho_para_posterior_utilizacao_como_suporte_na_preparacao_de_compositos/links/0fcfd51242db818444000000/Estudo-da-composicao-da-palha-de-milho-para-posterior-utilizacao-como-suporte-na-preparacao-de-compositos.pdf. Acesso em: 12 set. 2025.

SALIBA, Eloísa de Oliveira Simões et al. Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. *Ciência Rural*, [S.L.], v. 31, n. 5, p. 917-928, out. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782001000500031>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/ksvwL846ZN3KPdSQfVYTrvr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 fev. 2026.

SILVA, Antonio Alberto da *et al.* Sistema de Plantio Direto na Palhada e seu impacto na agricultura brasileira. *Ceres*, Viçosa, v. 56, n. 4, p. 496-506, jul. 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3052/305226808017.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2026.

SILVA, Elano Costa. **LIGNINA EXTRAÍDA DO SABUGO DE MILHO MODIFICADA COMO ADSORVENTE DE POLUENTES EM EFLUENTES INDUSTRIAIS**. 2025. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/8aee7c10-2c62-4688-835a-95bd75da0eed/content>. Acesso em: 09 fev. 2026.

SILVA, Felipe Souto da. **ESTUDO DE APLICAÇÃO DA LIGNINA COM ENFOQUE EM FIBRA DE CARBONO**. 2019. 245 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro,

Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://epqb.eq.ufrj.br/download/estudo-de-aplicacao-da-lignina-com-enfoque-em-fibra-de-carbono.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2026.

SILVA, Juliane da Silva e. **Estudo da utilização de polímeros naturais como auxiliares de floculação no tratamento de água para fins industriais**. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/server/api/core/bitstreams/fe667598-aeed-47ef-a666-356414eb42b2/content>. Acesso em: 14 abr. 2026.

SILVA, Luiz Guilherme de Melo. **UMA BREVE REVISÃO SOBRE RMN E ALGUMAS DE SUAS APLICAÇÕES**. 2018. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Industrial, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22234/3/BreveRevis%C3%A3oRMN.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2026.

SLUITER, A.; HAMES, B.; RUIZ, R.; SCARLATA, C.; SLUITER, J.; TEMPLETON, D. Determination of ash in biomass. In: Laboratory analytical procedure. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 8p., 2005. Acesso em: 14 set. 2025.

SLUITER, J.B.; RUIZ, R.O.; SCARLATA, C.J.; SLUITER, A.D.; TEMPLETON, D.W. Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks. 1. Review and description of methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v. 16, p. 9043-9053, 2010. Acesso em: 14 set. 2025.

SOUZA, Walterler Alves de. **Tratamento de água**. Natal: Cefet-Rn, 2007. 152 p. Disponível em: <http://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/997>. Acesso em: 14 abr. 2026.

Universidade Federal de Juiz de Fora (ed.). Espectroscopia no ultravioleta. In: FORA, Universidade Federal de Juiz de. Espectroscopia. Juiz de Fora: Licenciatura em Química, 2013. p. 11-11. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/quimicaead/wp-content/uploads/sites/224/2013/05/7-Espectroscopia-no-ultravioleta.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2026.

VALGAS, Ricardo Alexandre *et al.* Análise de Dados Experimentais e Verificação dos Pressupostos da ANOVA: abordagem prática com o software r. Pelotas: Embrapa, 2021. 37 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1137716/1/DOCUMENTOS-504.pdf>. Acesso em: 03 maio 2026.

VALVERDE, Karina Cardoso; SANTOS, Michelle Silva. VIABILIDADE DO USO DE COAGULANTES NATURAIS NO TRATAMENTO DE ÁGUA. In: Livro de Memórias do IV SUSTENTARE e VII WIPIS: Workshop internacional de Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos. Anais...Piracicaba (SP) Online, 2022. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/sustentare_wipis_2022/578429-VIABILIDADE-DO-USO-DE-COAGULANTES-NATURAIS-NO-TRATAMENTO-DE-AGUA. Acesso em: 19 jan. 2026.

VIEIRA, Maria Eduarda Martins *et al.* Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 1-13, 10 ago. 2021. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18622>.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243 p. (Volume 1).

WIMMER, Ana Christina Souza. Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes de uma indústria petroquímica. 2007. 8 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Cap. 4. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11608&idi=2&rc=1>. Acesso em: 15 abr. 2026.

ZAIDI, N s *et al.* Effectiveness of Local Waste Materials as Organic-Based Coagulant in Treating Water. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [S.L.], v. 636, n. 1, 1 out. 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/636/1/012007/pdf>. Acesso em: 5 dez. 2025.

ZARA, Ricardo Fiori; THOMAZINI, Maria Helena; LENZ, Guilherme Felipe. ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE POLÍMERO NATURAL EXTRAÍDO DO CACTO MANDACARU (*Cereus jamacaru*) COMO AUXILIAR NOS PROCESSOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO NO TRATAMENTO DE ÁGUA. *Revista de Estudos Ambientais*. 14, n. 11, p. 75-83, 2012. Disponível em: <https://ojsrevista.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/2935/2078>. Acesso em: 23 jan. 2026.

ZHANG, Hui; FU, Shiyu; CHEN, Yuancai. Basic understanding of the color distinction of lignin and the proper selection of lignin in color-depended utilizations. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 147, p. 607-615, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.105>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813019399921?ref=pdf_download&fr=RR-7&rr=8c8ddfc7c96901a3. Acesso em: 25 set. 2025.