



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ  
ENGENHARIA DE MINAS**

**CAMILA ABADIA DE SOUZA**

**EXPLORANDO A EFICIÊNCIA DA NANO ESTRUTURA  
LIGNOCELULÓSICA DE BAMBU COMO BIORREAGENTE NO  
ESPESSAMENTO DE REJEITO FOSFÁTICO.**

**ARAXÁ - MG**

**2025**

**CAMILA ABADIA DE SOUZA**

**EXPLORANDO A EFICIÊNCIA DA NANO ESTRUTURA  
LIGNOCELULÓSICA DE BAMBU COMO BIORREAGENTE NO  
ESPESSAMENTO DE REJEITO FOSFÁTICO.**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas Gerais -  
Unidade Araxá, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Minas.

Orientador(a): Prof. Dr. Mario Guimarães  
Junior

Coorientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Michelly dos  
Santos Oliveira

**ARAXÁ-MG  
2025**

**CAMILA ABADIA DE SOUZA**

**EXPLORANDO A EFICIÊNCIA DA NANO ESTRUTURA  
LIGNOCELULÓSICA DE BAMBU COMO BIORREAGENTE NO  
ESPESSAMENTO DE REJEITO FOSFÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador(a): Prof. Dr. Mario Guimarães Junior

Coorientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Michelly dos Santos Oliveira

Data da Defesa: 13 de fevereiro de 2025



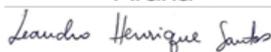
---

Presidente e Orientador: Dr. Mario Guimarães Junior  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá



---

Coorientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Michelly dos Santos Oliveira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá



---

Membro Titular: Prof. Dr. Leandro Henrique Santos  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá



---

Membro Titular: Santiago Henrique Cruz  
Engenheiro de Minas

A Deus, por me guiar e dar forças em todos os momentos. À minha família e amigos, pelo apoio e incentivo ao longo desta jornada.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me guiar, fortalecer e iluminar em cada passo desta jornada.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e por sempre estarem ao meu lado nos momentos mais desafiadores. À minha avó, primos e tios, pelo carinho, companheirismo e por nunca medirem esforços para me apoiar.

Para o meu sobrinho, cujo sorriso trouxe alegria e conforto durante os momentos difíceis.

Ao meu noivo, pelo carinho, paciência e por acreditar em mim em todos os momentos, mesmo diante dos desafios.

À Wanira (*in memoriam*), cujo apoio constante foi essencial em todos os momentos. Suas palavras de conforto e incentivo foram fundamentais ao longo desta trajetória.

Aos meus amigos, pela colaboração, incentivo e compreensão, que tornaram essa caminhada mais leve. Em especial, agradeço à Isabella, Stefany, Patrícia, Gabriela, Ana Luiza, Iago, Aninha, Carlos e Luísa, por estarem sempre por perto, oferecendo apoio e amizade genuína.

Aos meus orientadores, pela dedicação, paciência, entusiasmo e pelo conhecimento compartilhado. Suas orientações contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e ao longo da graduação.

Ao professor Leandro Henrique, pela atenção, paciência e disposição em esclarecer dúvidas de forma gentil e prestativa. E, em especial, ao Santiago, cujo apoio foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

A minha eterna gratidão a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão deste ciclo.

## RESUMO

A necessidade de evolucionar as técnicas de desaguamento de rejeitos, priorizando a utilização de floculantes/coagulantes, sob a forma de polímeros naturais biodegradáveis, vem se tornando cada vez mais necessário no processo de espessamento. Neste contexto, a nanocelulose de bambu (*bambusa vulgaris Schrad*), se mostra como um excelente biorreagente com grande potencial para ser usado no espessamento de rejeito fosfático, uma vez que apresenta excelentes propriedades morfológicas e uma elevada área superficial, podendo contribuir para a eficiência no processo de agregação dos flocos gerados no processo de floculação. Ademais, o bambú é uma opção interessante de matéria-prima lignocelulósica renovável. O objetivo do trabalho foi avaliar a aplicação da nanoestrutura lignocelulósica como biorreagente no processo de espessamento, visando identificar as melhores condições operacionais para otimizar a sedimentação. Os ensaios de sedimentação foram realizados por meio do *Jar test*, com o intuito de se determinar a dosagem ideal do floculante utilizado no tratamento de efluentes residuais. Tanto a velocidade de sedimentação, quanto a turbidez do clarificado foram investigadas a fim de se determinar a eficiência dos reagentes biodegradáveis utilizados. As condições operacionais do equipamento incluíram rotações de 100, 200 e 300 rpm, em tempos de 2, 5 e 8 minutos de condicionamento. Para manter as partículas em suspensão, a rotação foi ajustada para aproximadamente 200 rpm. As dosagens de nanocelulose de 30, 165 e 300 g/t a 0,05% (m/v), bem como valores de pH de 5,5, 7,5 e 9,5; foram selecionados para o experimento. Para comparar os resultados, durante o condicionamento, optou-se pelo reagente comercial Magnafloc 351, na mesma concentração da nanoestrutura (0,05% m/m), na dosagem de 165 g/t, em pH 7,5 e rotação de 200 rpm. Os ensaios foram realizados com rejeito de minério fosfático proveniente do *overflow* de um espessador, localizado em uma Empresa mineradora do Alto Paranaíba. O rejeito com 36,89% de quartzo foi utilizado na quantidade de 0,230 kg para cada teste. A nanoestrutura utilizada foi produzida em meio alcalino (hidróxido de sódio 5% m/v) a 80° C e branqueada em solução de peróxido de hidrogênio (24% v/v) e hidróxido de sódio (4% m/v), a 60° C, com agitação de 500 rpm. Na sequência, o material foi desfibrilado por um desfibrilador mecânico Super Masscolloider Grinder Masuko Sangyo, com rotação do disco inferior de 1500 rpm e com 5 passagens pelos discos giratórios. A distância entre os discos, a partir do ponto zero, foi de + 50 µm na primeira passagem, + 20 µm na segunda passagem e de + 10 µm até a última passagem. A nanoestrutura celulósica, utilizada com dosagens de 30, 165 e 300 g/t, demonstrou efeito positivo na velocidade de sedimentação, apresentando resultados superiores ao teste de sedimentação sem reagente. O biorreagente teve melhor desempenho em pH 5,5, com menor turbidez e maior velocidade de sedimentação, enquanto em pH 9,5 não houve formação da interface sólido-líquido. Embora o Magnafloc 351 tenha mostrado maiores velocidades de sedimentação, a nanoestrutura se destacou pela formação de flocos menores, o que pode beneficiar as etapas de filtração e centrifugação nas condições avaliadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sedimentação. Biopolímeros. lignocelulósicos. *Jar test*. Rejeito

## ABSTRACT

The need to evolve tailings dewatering techniques, prioritizing the use of flocculants/coagulants in the form of biodegradable natural polymers, has become increasingly necessary in the thickening process. In this context, bamboo nanocellulose (*Bambusa vulgaris* Schrad) emerges as an excellent bioreagent with great potential for use in phosphate tailings thickening, as it exhibits excellent morphological properties and a high surface area, which can contribute to the efficiency of the aggregation of the flocs formed during the flocculation process. Furthermore, bamboo is an interesting renewable lignocellulosic raw material. The objective of the study was to evaluate the application of this lignocellulosic nanostructure as a bioreagent in the thickening process, aiming to identify the best operational conditions to optimize sedimentation. Sedimentation tests were conducted using the *Jar test* to determine the ideal dosage of the flocculant used in the effluent treatment. Both sedimentation velocity and the turbidity of the clarified water were investigated to assess the efficiency of the biodegradable reagents used. The equipment's operational conditions included rotation speeds of 100, 200, and 300 rpm, with conditioning times of 2, 5, and 8 minutes. To maintain the particles in suspension, the rotation was adjusted to approximately 200 rpm. Nanocellulose dosages of 30, 165, and 300 g/t at 0.05% (m/v) and pH values of 5.5, 7.5, and 9.5 were selected for the experiment. To compare the results, the commercial reagent Magnafloc 351 was used during conditioning, at the same concentration as the nanostructure (0.05% v/v), at a dosage of 165 g/t, pH 7.5, and a rotation speed of 200 rpm. The tests were conducted with phosphate tailings from the *overflow* of a thickener located at a mining company in Alto Paranaíba. The tailings, which contained 36.89% quartz, were used in the amount of 0.230 kg for each test. The nanostructure was produced in an alkaline medium (5% w/v sodium hydroxide) at 80°C and bleached in a solution of hydrogen peroxide (24% v/v) and sodium hydroxide (4% w/v) at 60°C, with agitation at 500 rpm. Subsequently, the material was fibrillated using a Super Masscolloider Grinder Masuko Sangyo mechanical defibrillator, with the lower disc rotating at 1500 rpm and 5 passes through the rotating discs. The distance between the discs, from the zero point, was +50 µm on the first pass, +20 µm on the second pass, and +10 µm for the remaining passes. The cellulose nanostructure, used at dosages of 30, 165, and 300 g/t, showed a positive effect on sedimentation velocity, with results superior to those of the sedimentation test without reagents. The bioreagent performed best at pH 5.5, with lower turbidity and higher sedimentation velocity, while at pH 9.5, no solid-liquid interface was formed. Although Magnafloc 351 showed higher sedimentation velocities, the nanostructure stood out for forming smaller flocs, which may benefit the filtration and centrifugation stages under the evaluated conditions.

**KEYWORDS:** *Sedimentation. Biopolymers. Lignocellulosics. Jar test. Tailings.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Escolha dos equipamentos em função do tamanho das Partículas.	20
Figura 2 - Curva de Sedimentação.	21
Figura 3 - Esquema operacional de um espessador contínuo convencional.	22
Figura 4 - Zonas de Sedimentação no espessador.	22
Figura 5 - Dupla camada elétrica (DCE).	26
Figura 6 -Potencial Zeta conforme pH para quartzo	27
Figura 7 - Teoria DLVO clássica: curvas de energia de interação	28
Figura 8 - Mecanismo de floculação por pontes (Adaptado de Baltar 1997)	30
Figura 9 - floculação das partículas por reversão localizada de carga.	31
Figura 10 - Estrutura do Material lignocelulósico	32
Figura 11 - (a) nanofibras de polpa branqueada e refinada de bambu.; (b) nanofibras de polpa branqueada e refinada de bambu através de MFA; (c) nanocristais ou nanowhiskers de polpa branqueada de bambu através de MET - <i>Phyllostachys heterocyclus</i> (hidrólise enzimática utilizando celulase por 3h a 60° C) (Ma et al. 2014).	34
Figura 12 - Estrutura da Celulose de Bambu	35
Figura 13 - Diagrama das etapas do trabalho	37
Figura 14 – Homogeneização do rejeito	38
Figura 15 - Nanocelulose com concentração 1,5% (m/m)	42
Figura 16 - Solução homogênea (concentração 0,05% (m/m))	43
Figura 17 - Jar test modelo SP-606A	45
Figura 18 - Sonicação do biorreagente.	46
Figura 19 - Distribuição granulométrica da amostra	50
Figura 20 - Relatório Densidade da amostra com base no banco de dados	51
Figura 21 - topografia de MFA das suspensões de nanofibrilas de celulose de polpa de bambu.	52
Figura 22 - Curva de sedimentação teste sem reagente	53
Figura 23 - Ensaio sedimentação 2	55
Figura 24 - Testes com pH 9,5	56
Figura 25 - Gráfico normal dos efeitos padronizados	58
Figura 26 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados	59
Figura 27 - Teste de igualdade de Variâncias	60

Figura 28 - Formação dos flocos (a) flocos com Nanocelulose de Bambu; (b) flocos com Magnafloc 351.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planejamento Fatorial Multinível.....	48
Tabela 2 - Composição Química da Amostra .....	49
Tabela 3 - Análise de variância da velocidade de sedimentação.....	57
Tabela 4 - Teste de sedimentação Magnafloc 351 .....	60
Tabela 5 - Sumário do Modelo.....	67
Tabela 6 - Análise de Variância completa .....	67

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Intervalos pré-determinados.....	47
Quadro 2 - Análise Granuloquímica .....	50
Quadro 3 - Planejamento fatorial com os resultados.....	54

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	14
2.	Objetivo Geral .....	17
2.1	Objetivos específicos .....	17
3.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	18
3.1	Minério fosfático .....	18
3.2	Separação Sólido-Líquido .....	19
3.2.1	Espessamento .....	20
3.3	Desaguamento de Rejeito .....	23
3.3.1	Rejeitos espessados .....	24
3.4	Agregação de Partículas .....	24
3.4.1	Dupla camada elétrica (DCE).....	25
3.4.2	Teoria DLVO .....	27
3.4.3	Floculação.....	29
3.4.4	Materiais lignocelulósicos .....	31
3.4.5	Nanociência e Nanotecnologia.....	32
3.4.6	Nanocelulose .....	33
4.	MATERIAL E METODOS .....	36
4.1	Amostra.....	38
4.1.1	Caracterização da amostra de rejeito .....	38
4.1.1.1	Análise granulométrica e química.....	38
4.1.1.2	Picnometria.....	39
4.2	Preparação dos reagentes .....	39
4.2.1	Nanocelulose de Bambu .....	39
4.2.1.1	Tratamento Alcalino .....	40
4.2.1.2	Branqueamento das fibras pré-tratadas .....	40
4.2.1.3	Caracterização da Nanocelulose de Bambu.....	41

4.2.1.4	Diluição da Nanocelulose .....	42
4.2.2	Magnafloc 351.....	43
4.3	Ensaio de Sedimentação na proveta sem reagente .....	44
4.4	Ensaio de Sedimentação no <i>Jar test</i> .....	44
4.5	Planejamento Fatorial .....	47
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
5.1	Análise granulométrica .....	49
5.2	Determinação da Densidade (Picnometria).....	51
5.3	Análise Detalhada da Nanocelulose de Bambu .....	52
5.4	Teste de sedimentação na proveta sem reagente.....	53
5.5	Teste de sedimentação no <i>Jar test</i> .....	53
5.5.1	Análise Planejamento fatorial Nanocelulose de Bambu .....	54
5.5.2	Comparação dos testes com Nanocelulose de Bambu e Magnafloc 351	59
6.	CONCLUSÃO .....	62
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
	APÊNDICE .....	67

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é uma potência agrícola que tem experimentado um desenvolvimento tecnológico constante, impulsionado pelo aumento da demanda global por alimentos. O rápido crescimento da produção agrícola no país tem elevado o consumo de fertilizantes fosfatados, que são essenciais para garantir alta produtividade, restaurar solos pobres e desenvolver novas áreas agricultáveis.

Neste sentido, o minério fosfático é considerado a única fonte viável para extração do elemento fósforo, devido à elevada concentração de fosfato (íon poliatômico). A relação de minério necessário para extração do fósforo é relativamente pequena, contudo, sua extração é economicamente viável para a mineração. Outras fontes que contém o íon poliatômico, no momento, são consideradas inviáveis e ambientalmente insustentáveis. A principal utilização do fósforo está relacionada com a fabricação de ácido fosfórico para produção de fertilizantes. Considerando a escala global, de acordo Pantano et al. 2016, aproximadamente 90% são direcionados para a produção de fertilizantes.

Assim, para que o minério seja aplicado de maneira eficiente, é necessário que seja submetido a diversas operações unitárias. Essas etapas podem ser realizadas a úmido ou a seco. Especialmente no caso do fosfato, elas são realizadas a úmido, principalmente na etapa de concentração por flotação.

Em relação ao beneficiamento do minério fosfático, existem diversos processos na indústria mineral que requerem operações de separação sólido-líquido (Luz et al. 2010). Essas são consideradas, na maioria das vezes, etapas cruciais num fluxograma de beneficiamento mineral. A etapa de separação das fases sólidas e líquidas é necessária devido ao grande volume de rejeito gerado e armazenado na forma de polpa, o que requer cuidados especiais para o seu manejo e disposição adequada.

Segundo Peixoto 2012, “o processo de desaguamento de rejeitos é normalmente realizado em espessadores de grande porte”, onde o objetivo é separar as fases líquida e sólida da polpa, promovendo o aumento da concentração do material sólido, recuperação de água e obtenção de polpas com concentrações adequadas.

Neste contexto, o processo de espessamento se baseia na velocidade de sedimentação das partículas, não somente pela ação da gravidade, como também pela atuação de agentes floculantes e/ou coagulantes, os quais contribuem para a formação de agregados, acelerando o processo de decantação.

Assim sendo, os floculantes desempenham papéis essenciais no processo de espessamento. Os agentes floculantes, sendo naturais ou sintéticos, têm como finalidade agregar as partículas, intensificando o processo de sedimentação e a separação sólido-líquido.

No entanto, o floculante, quando disposto de forma inadequada na natureza, pode gerar contaminantes químicos residuais nas águas tratadas, causando degradação da fauna e flora, bem como prejuízos à saúde humana. Portanto, é crucial considerar alternativas sustentáveis, como floculantes naturais e biodegradáveis, a fim de reduzir os danos ambientais. Segundo Guimaraes Júnior (2015, p. 39), “as maiores barreiras para a aceitação destes materiais como substitutos para os tradicionais polímeros convencionais, não biodegradáveis, estão no seu alto custo”.

Os polímeros naturais biodegradáveis, também conhecidos como biopolímeros, são materiais “classificados estruturalmente como polissacarídeos, poliésteres ou poliamidas” (Araujo et al. 2021) e que podem ser decompostos naturalmente no ambiente quando submetido a ações de micro-organismos e enzimas. Considerando o comportamento dos polímeros sintéticos junto ao meio ambiente, há um grande desafio em relação ao tempo de decomposição exigido pela natureza e a geração de subprodutos ao se decompor, por exemplo, microplásticos e monômeros. Neste sentido, Araújo et al. (2021), escreveram que “a biodegradação é uma solução muito promissora, uma vez que, além de ser menos agressiva ao meio ambiente, auxilia na complementação do ciclo de carbono e do nitrogênio”.

Diante do exposto, a nanocelulose, material orgânico, natural e biodegradável, apresenta um enorme potencial de aplicações em diversas áreas, como na produção de filmes, embalagens sustentáveis, biotecnologia, indústria de celulose e cosméticos, dentre outros. Este material consiste em nanoestruturas formadas por partes cristalinas e/ou amorfas, sob a forma de nanofibras ou nanocristais, com dimensões nanométricas. Esta nanoestrutura de aspecto fibroso, no caso das nanofibras, se mostra muito atraente para várias aplicações, incluindo a área do beneficiamento mineral. As nanofibras de celulose, como a chamaremos neste trabalho, são unidades

fibrilares resultantes da combinação linear de macromoléculas de celulose contendo regiões, tanto amorfas quanto cristalinas, de celulose, com a capacidade de formar redes emaranhadas (Guimarães Junior, 2015). Elas apresentam, alta rigidez, resistência e atoxidade, podendo ser obtidas a partir de fontes naturais, como o bambu, por exemplo.

As nanofibras produzidas a partir da biomassa de bambu podem ser utilizadas como floculantes, já que sua elevada área superficial, capacidade absorviva e capacidade de gerar redes tridimensionais, podem contribuir para a sua eficiência no processo de concentração dos agregados durante o procedimento de floculação. A grande quantidade de grupos hidroxilas presentes nestas nanoestruturas é outro ponto que merece destaque, uma vez que a presença destes grupos tornam suas superfícies extremamente reativas (Pessoa, 2022).

Com base nos recentes eventos relacionados às barragens de rejeitos e lamas, que promoveram grandes problemas ambientais, sociais e econômicos, as empresas mineradoras têm focado no aumento de sua eficiência, priorizando segurança e economia, durante a fase de processamento e disposição dos rejeitos, incluindo também, operações de separação sólido-líquido. Concomitantemente a esses fatos, a necessidade de evolucionar as técnicas de desaguamento de rejeitos e lamas, priorizando a utilização de floculantes e/ou coagulantes, na forma de polímeros naturais, em substituição aos sintéticos, é uma realidade cada vez mais necessária, uma vez que, o aumento da concentração de sólidos, minimizando a quantidade de água direcionada para as barragens, pode contribuir sobremaneira na preservação do meio ambiente.

Assim, os biopolímeros vem ganhando destaque na mineração, visto que podem ser utilizados para recuperar áreas contaminadas, controlar a emissão de poeiras e atuar, também, como floculantes. Nas últimas décadas, segundo Andrade (2017), vários estudos que comprovam a eficiência destes biopolímeros, como compostos coadjuvantes no processo de coagulação e floculação, com foco no tratamento de efluentes de laticínios e tratamento de água, tem sido desenvolvidos. Por este motivo, este estudo tem como principal objetivo avaliar a eficiência do uso de nanoestrutura lignocelulósica de bambú, como biorreagente no espessamento do rejeito fosfático, utilizando o *Jar test*. Para isso, o trabalho pretende determinar as

melhores condições operacionais, tendo como base os parâmetros de velocidade de sedimentação e turbidez do clarificado.

## **2. Objetivo Geral**

Avaliar a eficiência da nanoestrutura lignocelulósica obtidos da biomassa de bambu como biorreagentes no espessamento do rejeito Fosfático.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Verificar o comportamento das concentrações de nanoestruturas lignocelulósicas durante o processo de espessamento.
- Analisar o efeito do pH, agitação, dosagens de reagentes e tempo de condicionamento no aumento da velocidade de sedimentação e na redução da turbidez do clarificado, durante o espessamento.
- Verificar a eficiência das nanoestruturas lignocelulósicas na redução da turbidez do clarificado, durante o processo de espessamento.
- Determinar a melhor dosagem dos reagentes envolvidos no processo visando o maior rendimento durante o processo de floculação.
- Comparar os resultados obtidos entre a nanoestrutura lignocelulósica de bambu e o reagente convencional sintético, durante o processo de espessamento.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Minério fosfático

O fósforo é um elemento químico de número atômico 15 da Tabela Periódica dos Elementos, se caracteriza por ser um elemento sem sucedâneo, não apresentando atualmente condição de ser substituído por outra substância ou mesmo renovado. É um elemento não metálico, muito reativo, não encontrado de forma livre na natureza. Apresenta-se na forma de sais denominados fosfatos e participa em cerca de 0,23% da composição química da crosta terrestre (Souza, 2001; Guimarães, 1997; Barros, 2005).

O fósforo também é utilizado na produção de fertilizantes, onde atua como macronutriente primário junto ao nitrogênio e o potássio. Além disso, é empregado nas indústrias de ração animal, alimentos e bebidas, e na fabricação de detergentes sintéticos.

As reservas de rochas fosfáticas, atualmente, se encontram associadas com minerais contaminantes e com teores baixos de fósforo. Assim, para aumentar a produção de concentrados fosfáticos e permitir o melhor aproveitamento do recurso mineral, investimentos em estudos que priorizem o aumento da recuperação metalúrgica de fósforo, a melhoria de qualidade do concentrado produzido e o aproveitamento das frações finas e de rejeitos antigos, são estritamente necessários. Os estudos de concentração de minérios silicatados e carbonatados também aparecem como estritamente necessários (Oliveira, 2007).

Assim sendo, a apatita é considerada a principal fonte natural de fósforo e pode estar presente em quase todos os ambientes geológicos. Suas características morfológicas, físicas e químicas determinam seu comportamento durante o beneficiamento dos minérios apatíticos (Toledo; Pereira, 2001).

O grupo das apatitas é caracterizado por um elevado número de substituições de íons na rede cristalina e por diversos meios de formação. Sendo assim, a apatita possui uma composição química complexa e diversificada, além de uma grande variabilidade nas propriedades de superfície de um mineral para outro. A fluorapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ), a cloroapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ ) e a hidroxiapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) são consideradas as apatitas naturais mais comuns.

### 3.2 Separação Sólido-Líquido

No setor de mineração, a água desempenha um papel crucial, sendo essencial nas etapas de beneficiamento mineral. Dada a importância da água, a etapa de separação sólido-líquido é ainda mais crucial. A maioria das etapas de beneficiamento mineral ocorre em meio úmido, tornando indispensável a recuperação e recirculação da água utilizada nesses processos. Isso é fundamental para reduzir o consumo de água para novas finalidades.

De acordo com Valadão et al. (2012), “as operações de separação sólido-líquido têm como objetivo a recuperação e/ou recirculação de água, a preparação de polpas com porcentagem de sólidos adequada a etapas subsequentes, o desaguamento final de concentrados e a preparação de rejeitos para o descarte”.

A separação sólido-líquido é uma etapa crítica, apresentando alto custo e, em casos específicos, pode representar um consumo energético de 15 a 40%, como por exemplo o minério de ferro do quadrilátero Ferrífero (Valadão et al. 2012).

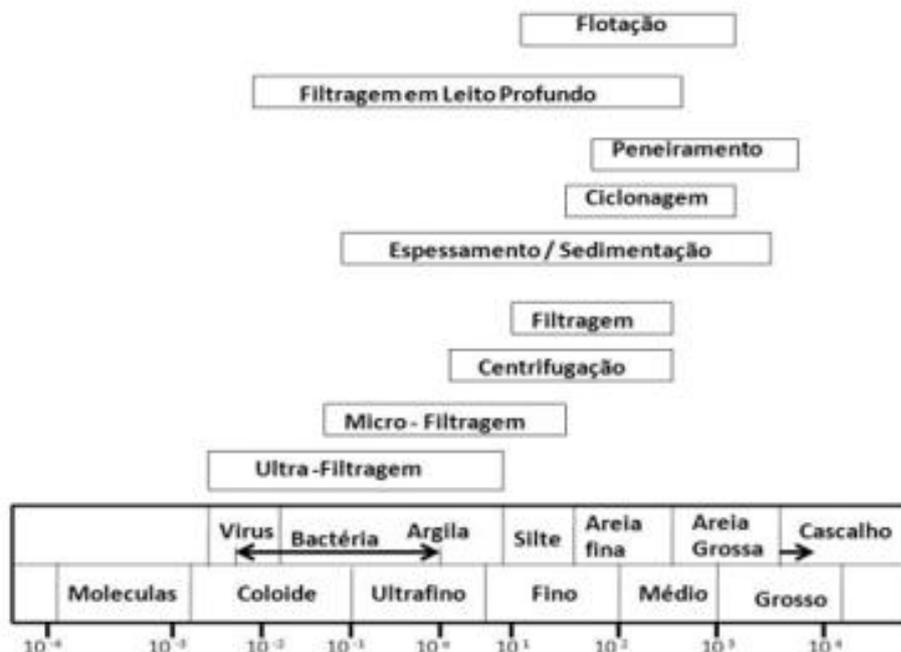
Equipamentos como espessadores, filtros e hidrociclones são comumente utilizados na etapa de separação sólido-líquido. Segundo Valadão *et al.*, (2012), diversos fatores podem influenciar a eficiência dos sistemas de separação sólido-líquido, como por exemplo, o tamanho da partícula sólida ou microrganismo (figura 1), características de superfície do sólido, porcentagem de sólidos na polpa e viscosidade do líquido. Os espessadores desempenham um papel crucial nesta etapa, oferecendo redução do volume de rejeitos, tratamento de polpas e recuperação de água. Sua operação é com base na sedimentação gravitacional para realizar a separação das partículas sólidas da água.

Tratando de polpas minerais, é essencial escolher a operação de separação sólido-líquido com base nas características da polpa, como a granulometria, forma, massa específica e concentração de sólidos.

Quanto a isso, Segundo França et al. (2018), escreveu:

As polpas com baixas concentrações de sólidos e granulometria fina geralmente requerem algum tipo de pré-tratamento (agregação e concentração) antes da etapa de desaguamento; já as com maior concentração podem ser processadas diretamente nos equipamentos de desaguamento propriamente ditos (França et al. 2018).

Figura 1 – Escolha dos equipamentos em função do tamanho das Partículas.



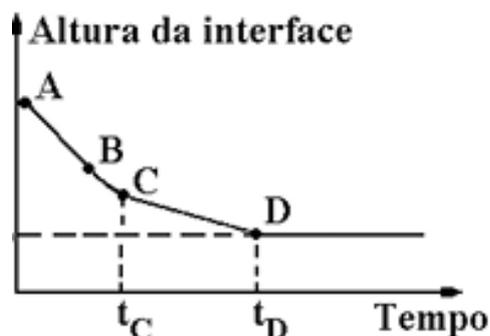
Fonte: VALADÃO (2008).

Durante o processo de espessamento, uma maior porcentagem de sólidos pode promover a formação de flocos, beneficiando a aglomeração e a sedimentação das partículas. Entretanto, uma alta concentração de partículas finas pode diminuir a eficiência da separação e aumentar o consumo de reagentes flocculantes.

### 3.2.1 Espessamento

O processo de espessamento se baseia na velocidade de sedimentação das partículas, sendo influenciada pela gravidade, pelo uso de flocculantes e/ou coagulantes, bem como pelas diferentes densidades dos componentes em suspensão. A velocidade de sedimentação é uma medida da taxa na qual as partículas em suspensão se depositam no fundo de um tanque pela ação da gravidade. Esta medida é determinada pela variação da distância em função do tempo em uma região linear na curva de sedimentação, conforme o trecho AB na figura 2.

Figura 2 - Curva de Sedimentação.



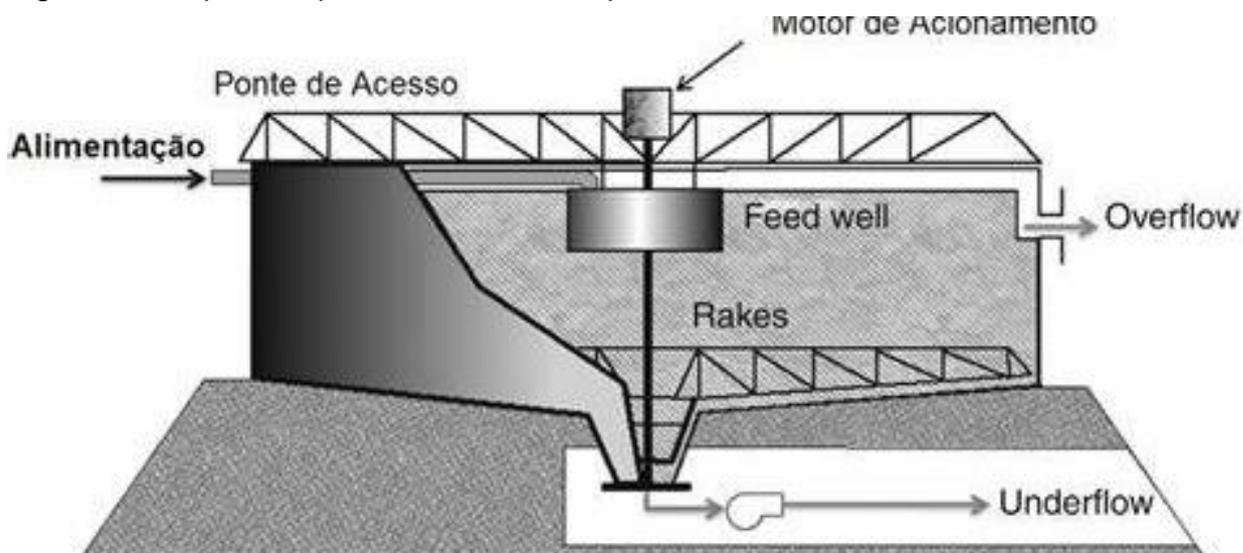
Fonte: SCHONS (2023).

De acordo com Chaves (2013), o processo de espessamento é realizado em tanques denominado espessador, com propósito de obter um produto adensado (*underflow*) que possibilite o seu bombeamento. Na literatura, os equipamentos utilizados para desaguamento de rejeitos são classificados como clarificadores e espessadores.

Segundo França e Massarani (2018), os espessadores têm como produto de interesse o sólido e são caracterizados pela produção de material espessado com alta porcentagem de sólidos. Por outro lado, os clarificadores têm como produto de interesse o líquido, produzindo material com percentual baixo de sólidos.

Os equipamentos de espessamento (figura 3), são constituídos de um tanque cilíndrico-cônico, e seus diâmetros variam de alguns metros até dezenas de metros (Chaves, 2013). Estes equipamentos são mais utilizados no processamento mineral e geralmente operam em regime contínuo.

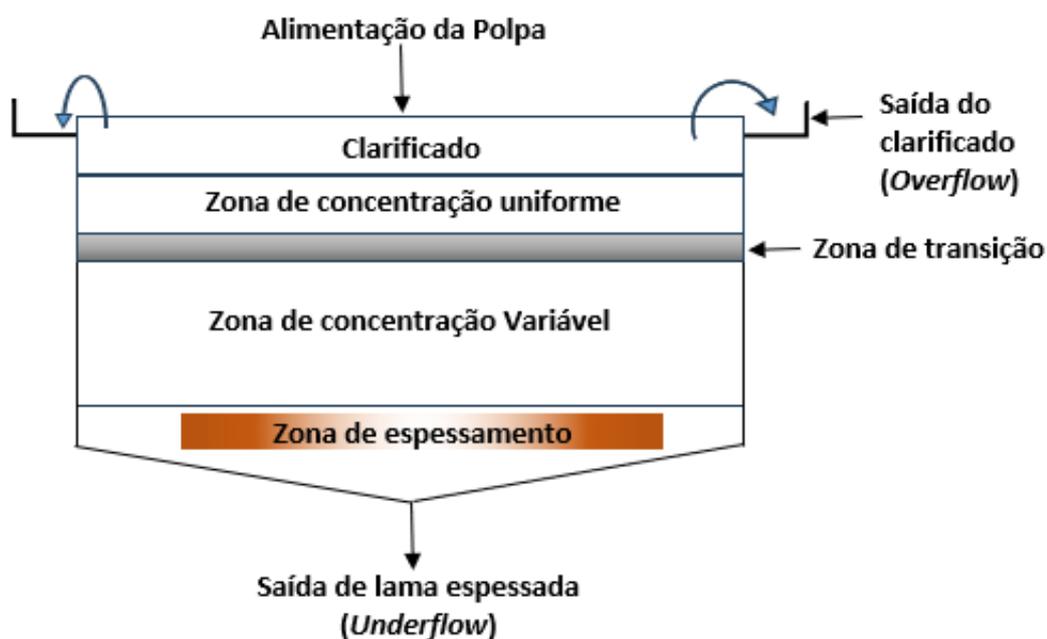
Figura 3 - Esquema operacional de um espessador contínuo convencional.



Fonte: GUPTA E YAN (2016).

As zonas de sedimentação (figura 4) de um espessador são essenciais para o processo de separação sólido-líquido. Na zona de alimentação, a polpa de maior densidade é introduzida, iniciando a sedimentação. As partículas mais finas e o líquido tendem a mover-se para o topo, formando o *overflow*, enquanto as partículas mais pesadas se depositam no fundo, formando o *underflow*.

Figura 4 - Zonas de Sedimentação no espessador.



Fonte: PROPRIA AUTORA (2025).

A eficiência do espessamento depende de vários fatores, como a granulometria dos sólidos, a área superficial específica, estado de agregação e/ou dispersão das partículas suspensas no líquido e a viscosidade do líquido. A configuração do cone de sedimentação também é ajustada conforme a granulometria do material processado.

Além dos fatores citados anteriormente, para que um espessador funcione adequadamente, segundo Peixoto (2012), a velocidade ascendente do líquido clarificado deve ser menor do que a velocidade de sedimentação das partículas sólidas. Dessa forma, evita-se o arraste dessas partículas para o *overflow* e garante-se a eficiência do processo.

### **3.3 Desaguamento de Rejeito**

O processamento mineral em meio aquoso é utilizado na indústria de mineração devido à sua eficácia na separação do mineral-minério e da ganga. No entanto, essa técnica gera uma quantidade significativa de rejeitos, que são materiais residuais transportados sob forma de polpa e depositados em barragens de contenção de rejeitos.

Considerando que a barragem de rejeito é o método mais comum para desaguamento de rejeitos na mineração, é imperativo que essas estruturas atendam às exigências de proteção ambiental e segurança. Além disso, devem ser integradas ao processo produtivo, contemplando, por exemplo, as necessidades de recuperação e reintrodução da água nos circuitos (Soares, 2010).

O desenvolvimento e a implementação de tecnologias avançadas para o desaguamento de rejeitos, como o espessamento e a filtração, são uma tendência crescente na indústria de mineração. Essas práticas não só otimizam o uso da água, um recurso que vem se tornando cada vez mais valioso e limitado, mas também aumentam a estabilidade das barragens de rejeitos, reduzindo significativamente o risco de falhas catastróficas.

### **3.3.1 Rejeitos espessados**

A técnica de rejeitos espessados é uma metodologia avançada no campo da mineração, que visa reduzir o volume de água nos rejeitos antes da sua disposição. Este processo não só otimiza o uso do espaço, como também minimiza os riscos ambientais associados às barragens de rejeitos convencionais. Os espessadores são equipamentos utilizados para esta finalidade, em que a sua função principal é adensar o material alimentado até um valor conveniente para a operação subsequente de beneficiamento (CHAVES, 2013).

O conceito de disposição de rejeitos espessados foi introduzido por Robinsky em 1968 e consiste no aumento da concentração de sólidos em peso, por meio do desaguamento da polpa e consequente aumento do teor de sólidos (PORTES, 2013).

De acordo com Portes (2013), “o rejeito desaguado, ou polpa de alta densidade, resulta do aumento da densidade da polpa. Nesta consistência, ainda apresentam segregação e liberação de água em pequenas quantidades, sendo o transporte deste material também condicionado à sua velocidade crítica”. A velocidade crítica é um termo que se refere a velocidade mínima necessária para manter as partículas sólidas em suspensão na polpa durante seu transporte.

A porcentagem de sólidos presente na polpa que será direcionada para as barragens tem grande influência nos parâmetros considerados para determinar o método adequado para disposição de rejeito. Nos rejeitos convencionais, esta porcentagem varia entre 20 e 50% de sólidos e para os rejeitos espessados, estes valores estão entre 55 e 75% de sólidos. Tais concentrações variam de acordo com a forma e granulometria da partícula, tensão de escoamento, bem como com a adição de reagentes que auxiliam no desaguamento, como os coagulantes e floculantes (Franks et al. 2011, apud Martins, 2022).

### **3.4 Agregação de Partículas**

A agregação de partículas é um conceito fundamental na química e física, descrevendo como partículas finas se unem formando estruturas maiores. As partículas coloidais presentes em um meio aquoso sem atuação de reagentes,

geralmente tem superfícies carregadas negativamente causando repulsão entre partículas que inibe a agregação em partículas maiores que podem ser removidas por gravidade (Hespanhol, 2018).

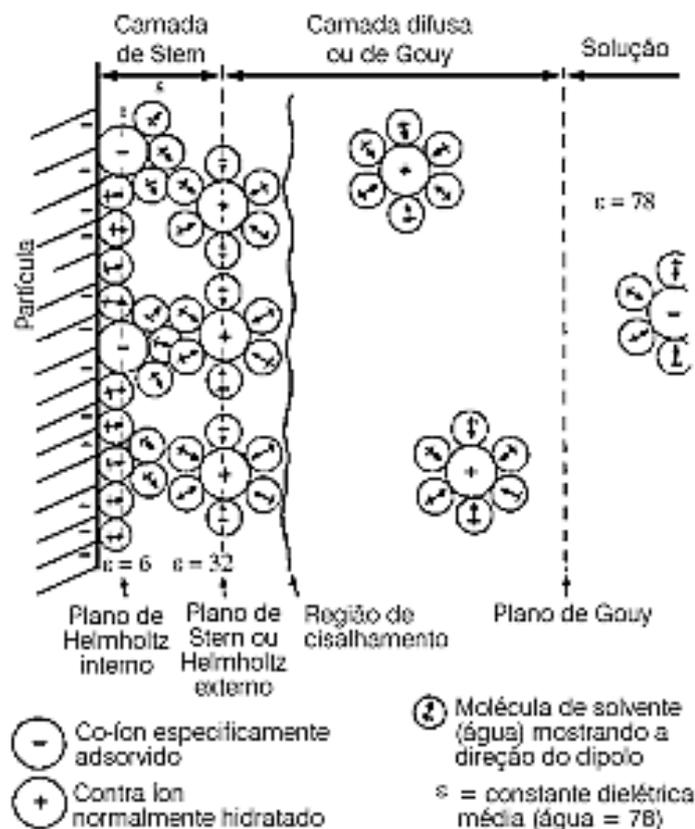
Segundo Baltar (2010), compreender os mecanismos envolvidos nos processos de agregação de partículas finas é de grande importância para as operações de espessamento e filtração, onde a presença de partículas coloidais dispersas pode resultar em significativa redução na capacidade do equipamento.

### **3.4.1 Dupla camada elétrica (DCE)**

A dupla camada elétrica (DCE) (figura 5) de partículas coloidais é a superfície gerada na interface sólido-líquido. A DCE é constituída pela camada de Stern, que é uma camada estacionária composta por íons adsorvidos devido à adsorção específica ou forças eletrostáticas, e a camada difusa, constituída pelos íons livres no solvente que são atraídos para a superfície da partícula devido à agitação térmica (Monte, 2010).

As partículas coloidais adquirem cargas elétricas na superfície, quando expostas ao contato com solvente polar, por diferentes mecanismos, tais como: dissociação de grupos da superfície e adsorção ou dissolução de íons da superfície (Júnior, Varanda, 1999).

Figura 5 - Dupla camada elétrica (DCE).

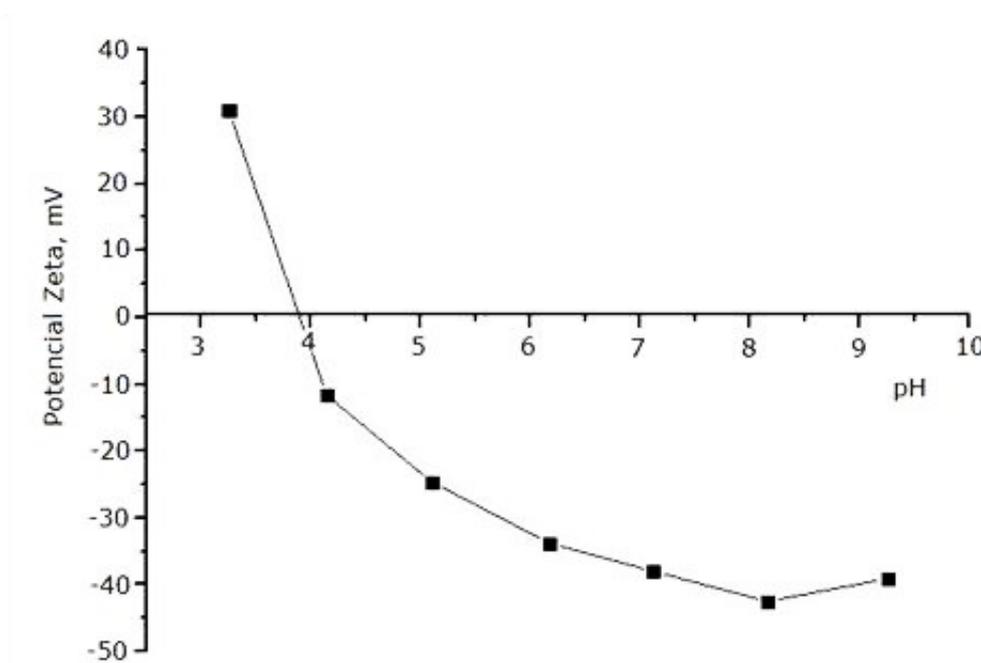


Fonte: JUNIOR, VARANDA (1999).

A carga da superfície da partícula influencia a distribuição dos íons da solução na vizinhança, conforme demonstrado na figura 5 atraindo e repelindo contra-íons e co-íons, respectivamente. Essa distribuição de íons desde a superfície da partícula até o interior da solução (meio de dispersão) gera diferentes potenciais (Júnior, Varanda, 1999).

O potencial no plano de cisalhamento, quando há movimentação simultânea das camadas elétricas com a presença de um campo elétrico, é conhecido como potencial zeta (figura 6). Este potencial é muito útil no controle de coagulação, pois mudanças em seu valor indicam mudanças na força repulsiva entre os colóides (Silva, 2003).

Figura 6 -Potencial Zeta conforme pH para quartzo



Fonte: BALTAR (2012).

O valor do potencial Zeta é influenciado por vários fatores, entre eles o pH do meio. Quando o potencial zeta é nulo, ocorre geralmente no ponto isoelétrico, onde as cargas positivas e negativas na superfície da partícula estão em equilíbrio, resultando em uma carga líquida zero. Assim, haverá chances das partículas se aglomerarem e sedimentarem devido a condição de estabilidade fornecida.

### 3.4.2 Teoria DLVO

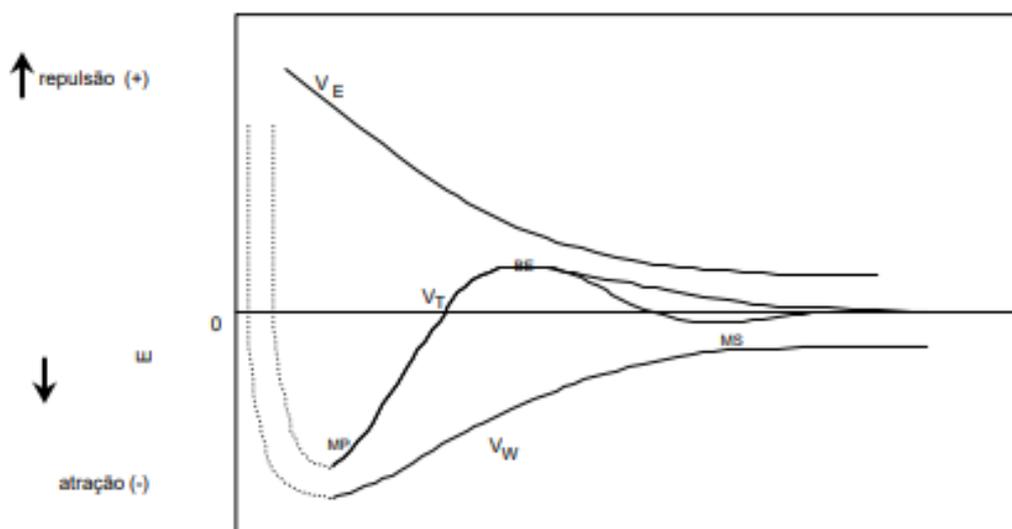
Os fundamentos teóricos da agregação e dispersão de partículas coloidais e ultrafinas em polpas minerais são descritos na teoria DLVO, desenvolvida pelos cientistas Derjaguin-Landau (russos) e Verwey-Overbeek (holandeses) na década de 40 (Silvestre, 2007).

Segundo Baltar (2010), “essa teoria baseia-se nas variações de energia que são observadas quando as partículas se aproximam umas das outras”. Portanto, de acordo com Silvestre (2007), a agregação e dispersão das partículas têm origem nas forças de van der Waals (atrativas) e nas forças entre as duplas camadas elétricas das partículas (repulsivas).

Considerando a interação entre duas partículas, a figura 7 exemplifica a energia de interação quando as partículas se aproximam. Assim, conforme a teoria DLVO (equação 1), a energia total de interação ( $V_T$ ) das partículas é a soma resultante das energias repulsivas ( $V_E$ ) e a energia das forças de van der Waals ( $V_W$ ).

$$V_T = V_W + V_E \quad [1]$$

Figura 7 - Teoria DLVO clássica: curvas de energia de interação



Fonte: LINS, F. F.; ADAMIAN, R (2000).

O processo de agregação das partículas irá ocorrer somente quando a energia total de interação atrativa for maior que a energia total repulsiva. Por outro lado, caso a energia repulsiva seja maior, o sistema estará estável (disperso).

A teoria X-DLVO, também conhecida como teoria DLVO estendida, representa uma ampliação da clássica teoria DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek). A teoria DLVO considera somente as forças de atração de Van der Waals e forças de repulsão eletrostática para compreender a estabilidade de dispersões coloidais. Entretanto, estudos mostraram a possibilidade da existência de forças estruturais ( $V_S$ ), resultando na teoria X-DLVO (LINS et al., 2000).

Além das forças repulsivas ( $V_E$ ), atrativas ( $V_W$ ) da teoria DLVO e as forças estruturais ( $V_S$ ) mencionadas, a energia total de interação ( $V_T$ ) da teoria estendida, conforme a equação 2, também está relacionada à associação hidrofóbica das

cadeias orgânicas dos coletores adsorvidos na superfície das partículas ( $V_{ASS}$ ), em que, partículas hidrofóbicas contam somente com a contribuição das forças estruturais ( $V_S$ ) e as partículas hidrofílicas que são hidrofobizadas pela ação dos coletores são submetidas a forças estruturais antes do contato direto com as cadeias orgânicas (LINS et al., 2000). Além desta, tem-se a interação das partículas quando submetidas a forças magnéticas ( $V_M$ ) e o efeito estérico em relação a repulsão quando há interação das partes externas após adsorção do polímero ( $V_{EST}$ ). Há um campo vasto de forças que podem estar presentes no beneficiamento de minérios (LINS et al., 2000), como a ação das forças capilares e a ligação de polímeros na flocculação.

$$V_T = [V_W + V_E] + V_S + V_{Ass} + V_M + V_{Est} + \dots \quad [2]$$

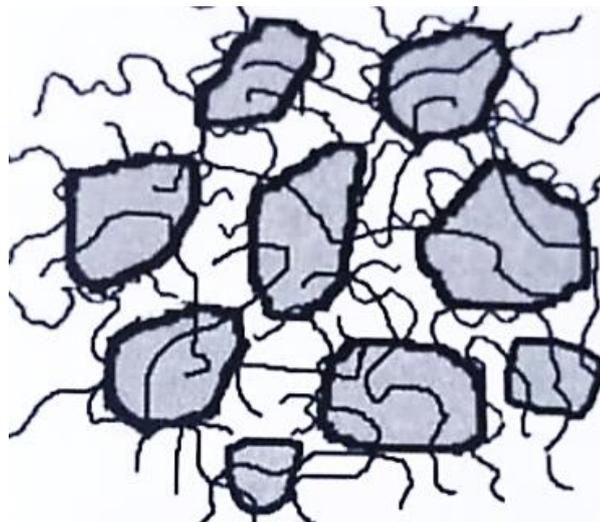
### 3.4.3 Flocculação

A flocculação é um processo físico-químico, onde partículas coloidais se aglomeram formando conjuntos maiores e mais densos, denominados flocos. Este processo é tipicamente iniciado pela adição de agentes flocculantes, como polímeros, que promovem a união das partículas suspensas através da formação de pontes de ligação entre as moléculas do polímero e as partículas.

De acordo com Nakano (2016), a agitação do meio deve ser suficiente para ocorrer geração dos gradientes de velocidade que causam turbulência capaz de provocar choques, colisões e/ou encontros entre as partículas.

Existem três mecanismos de flocculação, sendo a flocculação por pontes, flocculação por neutralização de carga na superfície e flocculação por reversão localizada de carga. Na flocculação por pontes (figura 8) cada molécula do flocculante se adsorve em várias partículas simultaneamente, formando agregados que, por sua vez, tendem a unir-se a outros agregados (Baltar, 2018). Assim, este tipo de flocculação é predominante em sistemas com polímeros com elevado peso molecular, podendo ser não iônicos ou obter carga elétrica idêntica à superfície da partícula.

Figura 8 - Mecanismo de floculação por pontes (Adaptado de Baltar 1997)



Fonte: BALTAR (2018).

O mecanismo de floculação por pontes gera flocos com estrutura aberta, onde há um distanciamento entre as partículas. Os flocos apropriados para o espessamento são formados neste tipo de floculação, no qual são mais flexíveis em relação aos flocos gerados por neutralização ou reversão localizada de carga (Erikson et al. 1988; *apud* Baltar, 2018).

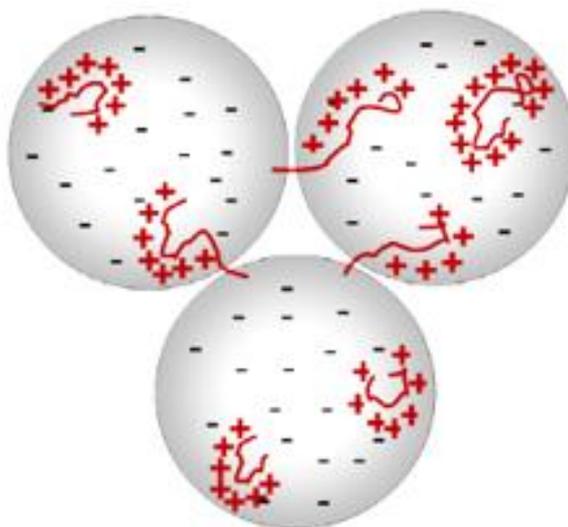
De acordo com Baltar (2018), “considerando-se que a superfície mineral, geralmente, tem excesso de carga negativa, no espessador deve usar um floculante aniônico com elevado peso molecular (no mínimo  $10^6$ ), a fim de facilitar a formação de flocos por pontes”.

Considerando o mecanismo de floculação pela neutralização de carga na superfície, segundo Oliveira e Rubio (2011), este ocorre em sistemas constituídos de polímeros floculantes de elevada densidade de carga catiônica e baixo peso molecular e partículas aniônicas em suspensão. Entretanto, a carga elétrica do polímero terá somente a capacidade de neutralizar o excesso de carga presente na superfície e o processo de agregação é efetivo devido a minimização da repulsão eletrostática entre as partículas.

Por outro lado, a floculação das partículas por reversão localizada de carga (figura 9), necessita de um polímero de alta densidade de carga e baixo peso molecular. A adsorção na superfície mineral, com carga contrária, reverte a carga elétrica na área coberta pelo polímero (Baltar, 2018). Entretanto, como consequência,

a superfície da partícula apresentará uma distribuição de carga heterogênea, contendo localidades positivas e negativas.

Figura 9 - flocculação das partículas por reversão localizada de carga.



Fonte: BALTAR (2018).

Ao realizar a escolha do floculante, algumas características devem ser consideradas em todos os casos, como o tamanho da cadeia (peso molecular), a natureza da carga elétrica, a densidade de carga e sua composição química.

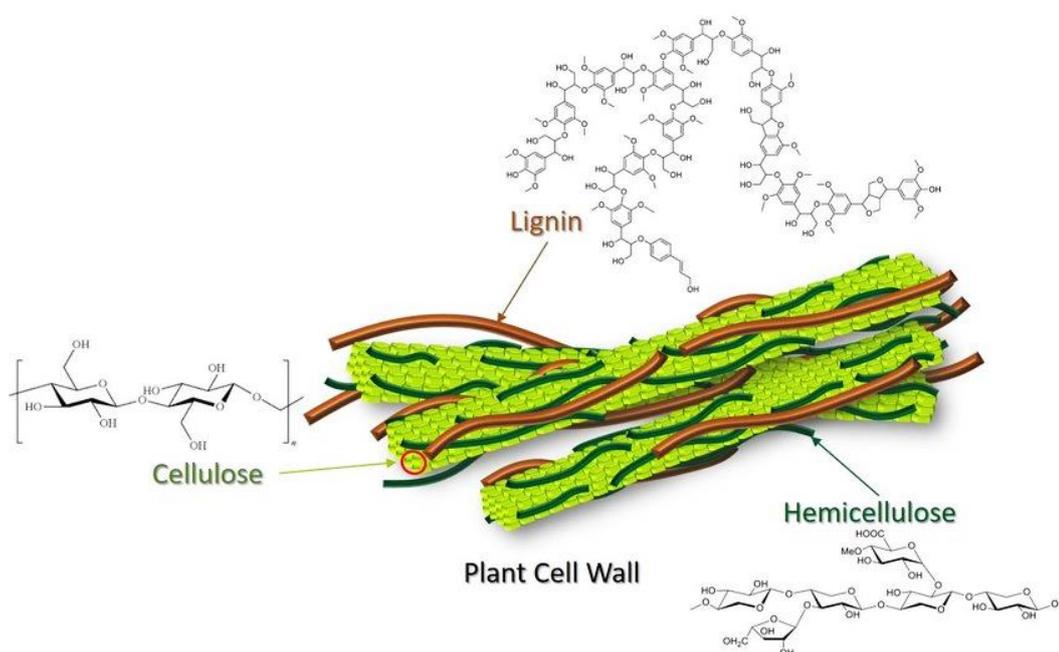
#### 3.4.4 Materiais lignocelulósicos

Os materiais lignocelulósicos são os mais abundantes da biosfera, “representando aproximadamente 60% da biomassa vegetal” (Rodrigues et al. 2017 p. 287), ou seja, são uma fonte renovável e, atualmente, têm sido foco de estudos científicos devido ao seu potencial para aplicações futuras no meio industrial e tecnológico. Os materiais lignocelulósicos vem sendo utilizados pelo homem desde o período da antiguidade para a geração de energia através da queima da madeira, galhos e folhas. Estes materiais podem ser encontrados em resíduos de colheitas, madeira de lei, madeira de conífera, resíduos celulósicos e biomassas herbáceas.

Esses materiais apresentam como principais características a presença de celulose hemicelulose e lignina em sua estrutura química da parede celular, conforme a figura 10 (Guimarães Junior, 2020). A celulose é o principal componente dos

materiais lignocelulósicos, sendo um polissacarídeo composto por moléculas de glicose unidas pela ligação  $\beta$ -1,4-glicosídicas (Rodrigues et al. 2017 p. 287). Esta estrutura, conhecida como celobiose, é constituída por seis grupos de hidroxila formando uma interação química do tipo ligações de hidrogênio intra e intermolecular. Segundo Silva (2009, p.663), “devido a essas ligações de hidrogênio há uma forte tendência de a celulose formar cristais que a tornam completamente insolúvel em água e na maioria dos solventes orgânicos”.

Figura 10 - Estrutura do Material lignocelulósico



Fonte: JENSEN (2017).

### 3.4.5 Nanociência e Nanotecnologia

Em termos científicos e tecnológicos, o termo "nano" é comumente relacionado a nanociência e à nanotecnologia, que se referem ao manuseio de materiais em um nível nanométrico. Esta escala abre portas para estudos exploratórios focados em explorar novas propriedades e comportamentos destes materiais e, assim, garantindo um leque de possibilidades para inovações científicas e tecnológicas.

Segundo Tonet et al. (2019, p. 435), “o estudo de estruturas atômicas e moleculares que possuem dimensões na escala nanométrica é chamado de Nanociência. Por outro lado, a manipulação e aplicação industrial dessas estruturas

nanométricas, é denominado Nanotecnologia”. A nanociência e a nanotecnologia são áreas complementares que, juntas, têm o potencial de revolucionar o meio industrial e melhorar a qualidade de vida.

A nanotecnologia “possibilitou o desenvolvimento de nanomateriais e nanopartículas que tornaram os materiais tradicionais mais leves, com maior resistência mecânica e com capacidade de suportar altas temperaturas” (Clebsch et al., 2017). Na mineração, este campo “tem o potencial de desenvolver novas técnicas e abordagens para a detecção e extração de minerais, melhorando a eficiência, reduzindo o impacto ambiental e possibilitando a recuperação de materiais valiosos” (Sisinno, et al., 2024).

Dentro da área da Nanociência e Nanotecnologia há uma grande preocupação dos efeitos adversos que os nanomateriais podem ocasionar para o ecossistema. Assim, destaca-se a importância de identificar os possíveis impactos ao meio ambiente e a saúde humana.

Dentro da área da Nanociência estão sendo desenvolvidos estudos com a preocupação dos possíveis efeitos adversos de nanomateriais à saúde humana e aos organismos vivos, bem como sua interação, cinética, dinâmica e destino nos sistemas e compartimentos bióticos e abióticos, e a avaliação de risco da sua produção, uso e destino (Sisinno et al. 2024).

### **3.4.6 Nanocelulose**

As pesquisas para o desenvolvimento de materiais poliméricos biodegradáveis de fontes renováveis são crescentes, uma vez que a disponibilidade de biopolímeros é abundante na natureza e alguns possuem custo relativamente baixo (Pereira et al., 2014).

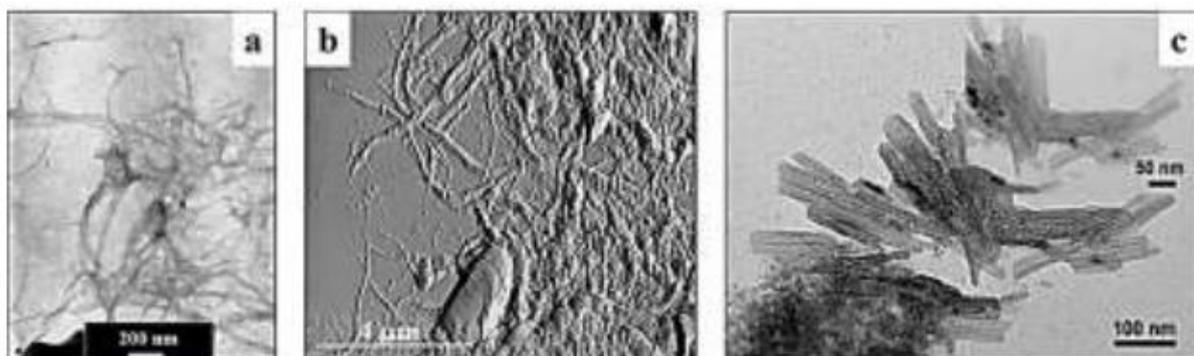
As nanofibras de celulose são unidades fibrilares compostas por macromoléculas de celulose com regiões amorfas e cristalinas, capazes de formar redes emaranhadas (Guimarães Junior, 2015). Os nanocristais de celulose contêm uma estrutura cristalina ideal ao módulo de Young elevado, ao relacionar com o módulo teórico da celulose natural.

Segundo Lengowski (2016), “o prefixo ‘nano’ está relacionado a uma escala de medida em que um nanômetro representa um milionésimo do milímetro. O grande diferencial desses materiais é potencializar propriedades físicas e químicas em concentrações extremamente reduzidas”.

De acordo com Melo et al. (2016), “as nanofibras de celulose, ou nanowhiskers, podem ser obtidas a partir de diferentes fontes de fibras naturais, inclusive vegetais, como algodão, cana-de-açúcar e bambu”. Além disso, também ser obtidas pelo processo químico de hidrólise ácida combinada com agitação mecânica em meio aquoso, pela desintegração mecânica e através do processo de oxidação química interligado com a desintegração mecânica.

Segundo Melo et al. (2016), “dentre as fibras lignocelulósicas, destacam-se as de bambu, pois trata-se de materiais amplamente utilizados como reforços em compósitos poliméricos, devido, principalmente, às suas propriedades mecânicas. As microfibras de nanofibras e nanocristais de polpas branqueadas de bambu são evidenciadas na figura 11.

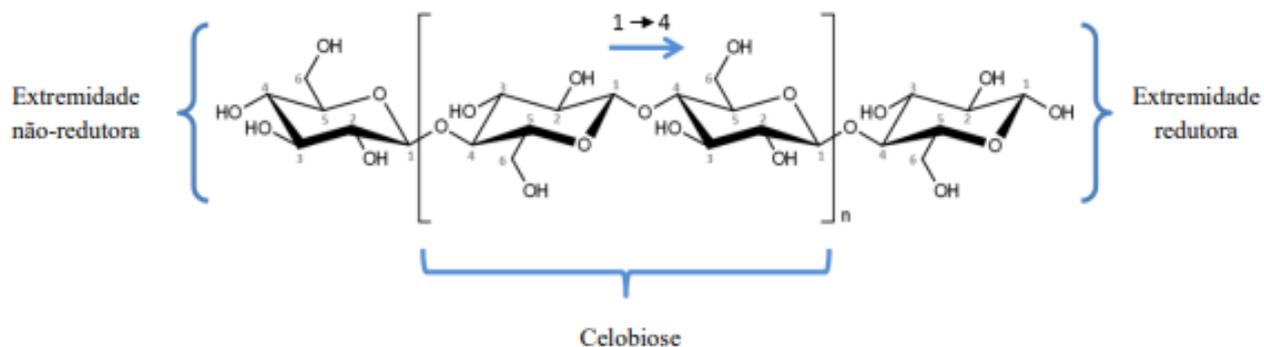
Figura 11 - (a) nanofibras de polpa branqueada e refinada de bambu.; (b) nanofibras de polpa branqueada e refinada de bambu através de MFA; (c) nanocristais ou nanowhiskers de polpa branqueada de bambu através de MET - *Phyllostachys heterocycla* (hidrólise enzimática utilizando celulase por 3h a 60° C) (Ma et al. 2014).



Fonte: GUIMARÃES (2015).

As nanofibras lignocelulósicas do bambu podem ser eficientes como floculantes devido à sua alta área superficial e relação de aspecto, melhorando a agregação dos flocos no processo de floculação. A grande quantidade de grupos hidroxilas presentes nestas nanoestruturas (figura 12) é outro ponto que merece destaque, uma vez que a presença destes grupos tornam suas superfícies extremamente reativas.

Figura 12 - Estrutura da Celulose de Bambu



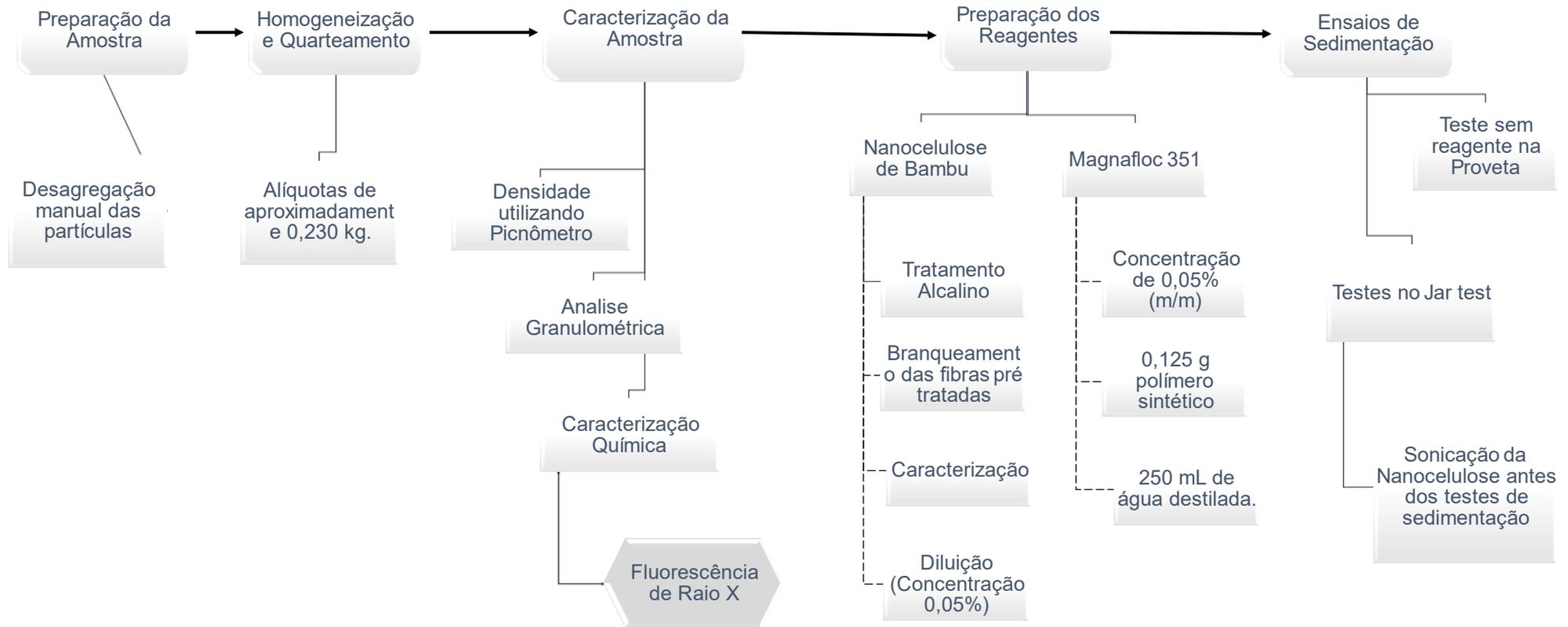
Fonte: CAMARGOS (2016).

A nanocelulose tem se mostrado um material de grande relevância para diversas áreas, incluindo a indústria. Assim, suas propriedades, como alta resistência, leveza, biodegradabilidade e a sua elevada área superficial fazem dela um material promissor para reforço de polímeros, tratamentos de efluentes industriais e produção de compósitos. Além disso, sua obtenção a partir de fontes renováveis, como o bambu, contribui para a redução dos impactos ambientais e reforça a importância de alternativas sustentáveis.

#### 4. MATERIAL E METODOS

Neste tópico abordaremos a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho. Os procedimentos foram realizados nas instalações da Empresa parceira, no Município Mineiro de Serra do Salitre, no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) e no Laboratório de Polímeros e Materiais Nanoestruturados (LPMN), ambos localizados no CEFET-MG, Unidade de Araxá. As etapas desenvolvidas abrangeram a caracterização e preparação da amostra e reagentes, bem como os ensaios de sedimentação no *Jar test* (figura 13). Importante ressaltar que as etapas de caracterização da amostra foram realizadas na sede da empresa parceira.

Figura 13 - Diagrama das etapas do trabalho



Fonte: PROPRIA AUTORA (2025).

## 4.1 Amostra

A pesquisa foi conduzida utilizando-se amostras de rejeito fosfático fornecido pela empresa colaboradora, totalizando 6,14 kg. Além disso, foram empregados biorreagente de nanocelulose de bambu e o reagente comercial Magnafloc 351. A matéria-prima usada é proveniente do município de Serra do Salitre – MG. O Rejeito de minério fosfático é oriundo do *overflow* do espessador. Para que os resultados apresentassem representatividade, realizou-se a desagregação do material, com sua posterior homogeneização (figura 14) através de uma pilha alongada com 1 m de comprimento. Em torno de 10% de material, localizado em cada extremidade da pilha alongada, foi removido e retomado novamente. Na sequência, foram separadas alíquotas de aproximadamente 0,230 kg, para prosseguimento das etapas.

Figura 14 – Homogeneização do rejeito



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

### 4.1.1 Caracterização da amostra de rejeito

Para caracterização da amostra de rejeito foram realizados ensaios de densidade utilizando picnômetro, análise granulométrica e caracterização química.

#### 4.1.1.1 Análise granulométrica e química

Para determinar a fração granulométrica e a composição química do rejeito, foi realizada uma análise granulométrica e a análise da composição química da amostra, implicando a técnica de Fluorescência de Raios X (FRX), que permite identificar e

quantificar elementos de maneira não destrutiva. A amostra foi peneirada à úmido utilizando-se malhas 9# (2000  $\mu\text{m}$ ), 16# (1000  $\mu\text{m}$ ), 24# (710  $\mu\text{m}$ ), 32# (500  $\mu\text{m}$ ), 65# (212  $\mu\text{m}$ ), 100# (150  $\mu\text{m}$ ), 200# (75  $\mu\text{m}$ ), 325# (45  $\mu\text{m}$ ), 400# (38  $\mu\text{m}$ ) e 500# (25  $\mu\text{m}$ ). Posteriormente, para determinação dos elementos químicos, a amostra foi enviada para um laboratório externo com finalidade de realizar a fluorescência de raios X.

#### 4.1.1.2 Picnometria

Para obter a caracterização completa da amostra, a densidade relativa foi determinada usando a técnica de picnometria. O procedimento para determinar a densidade de sólidos por picnometria envolve a pesagem do picnômetro vazio (A1), Em seguida, o picnômetro é preenchido até transbordar, e o conjunto é pesado após a secagem da água excedida na parte externa do picnômetro (A4). Após secar o picnômetro internamente, uma amostra de rejeito é colocada no picnômetro até a formação de uma camada fina e pesado (A2). Por fim, o volume restante do picnômetro foi preenchido com água e pesado novamente (A3). A densidade de sólidos é calculada pela equação 3, utilizando os valores obtidos em cada pesagem.

$$\rho = \frac{(A2-A1)}{(A4+A2)-(A1+A3)} \quad [4]$$

## 4.2 Preparação dos reagentes

Foram realizadas a preparação da Nanocelulose de Bambu e o reagente sintético Magnafloc 351, buscando explorar a influência de ambos no teste de sedimentação.

### 4.2.1 Nanocelulose de Bambu

Para obtenção da Nanocelulose de Bambu, foi necessário realizar o tratamento alcalino das fibras de Bambu *In Natura*, seguido do seu branqueamento, desfibrilação mecanoquímica e caracterização do Biorreagente. Este potencial reagente biodegradável foi fornecido pelo orientador deste trabalho e professor do CEFET-MG, Mario Guimarães Junior, já nas condições adequadas para utilização nos testes de sedimentação.

#### 4.2.1.1 Tratamento Alcalino

As partículas de bambu foram submetidas a etapa de cominuição, passando por um moinho de martelo e, em seguida, em um moinho de facas. Após isso, realizou-se uma análise granulométrica do produto da moagem nas peneiras de malhas 40 e 60#. O material retido (fibras) na peneira de 60# passou por um tratamento alcalino e posteriormente, de branqueamento. A solução alcalina utilizada para o tratamento das fibras foi o hidróxido de sódio (NaOH) na concentração de 5% (m/v). O procedimento foi repetido por duas vezes, utilizando 1 g de fibra para 40 ml de NaOH. O procedimento foi executado em banho-maria a uma temperatura constante de 80° C, com agitação mecânica mantida em aproximadamente 500 rpm ao longo de 2 horas. Para iniciar a reação entre os componentes, é imperativo que o sistema alcance a temperatura de 80° C. Ao término do processo, a solução foi armazenada em um béquer e mantida em repouso até alcançar a temperatura ambiente.

Para que as fibras atingissem pH 7, foi utilizado o processo de lavagem e monitoramento do pH com o auxílio de um pHmetro. Ao alcançar o pH desejado, removeu-se o excesso de água e, em seguida, o material foi armazenado em um saco plástico a vácuo. Ao término do processo, a solução foi armazenada em um béquer, mantida em repouso até alcançar a temperatura ambiente, sendo que, na sequência, uma alíquota foi retirada para verificação da umidade da fibra.

#### 4.2.1.2 Branqueamento das fibras pré-tratadas

A metodologia para realizar o branqueamento foi baseada no trabalho de Guimarães Junior, M. (2015).

No processo de branqueamento, realizado por duas vezes, utilizou-se um licor composto por NaOH, na concentração de 4% (m/v) e peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), a 24% (v/v). A proporção usada foi de 1:1. O branqueamento da fibra ocorreu na proporção 1:4 fibras/licores. O procedimento foi executado em banho-maria a temperatura constante de 60° C, com agitação mecânica mantida em aproximadamente 500 rpm, ao longo de 3 horas. Para iniciar a reação entre os componentes, é imperativo que o sistema alcance a temperatura de 60° C. Ao término do processo, a solução foi armazenada em um béquer, mantida em repouso até

alcançar a temperatura ambiente, onde posteriormente, retirou-se uma alíquota para verificação da umidade da fibra. As etapas seguintes foram realizadas da mesma forma que a etapa anterior.

Por fim, para obtenção das nanofibras de celulose, a partir das fibras de bambu branqueadas, preparou-se uma suspensão em solução aquosa, com concentração de 1,5% (m/v). Estas fibras ficaram em processo de hidratação durante 3 dias, sendo que, a cada 24 horas houve agitação da suspensão durante 30 minutos com auxílio de um agitador mecânico a 700 rpm. Finalmente, como etapa final do processo de obtenção das nanofibras de celulose, efetuou-se o procedimento de desfibrilação mecânica utilizando um SuperMassColloider grinder (Masuko Sangyo MKCA6-2), com rotação do disco menor que 150 rpm, com 5 passagens pelos discos do equipamento. A distância entre os discos a partir do ponto zero foi de + 50  $\mu\text{m}$  na primeira passagem, + 20  $\mu\text{m}$  na segunda passagem e de + 10  $\mu\text{m}$  nas passagens seguintes.

#### **4.2.1.3 Caracterização da Nanocelulose de Bambu**

As análises de morfologia das amostras de nanocelulose de bambu foram realizadas utilizando Microscopia de Força Atômica (MFA) no Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução da Universidade Federal de Goiás (UFG-GO), com o equipamento Agilent Technologies 5500 N9410S. Para as medições, uma gota de suspensão diluída de aproximadamente 0,05 g/L foi aplicada em uma superfície de mica recém clivada, a qual foi seca a 60° C durante 12 horas. As imagens foram obtidas em modo dinâmico à temperatura ambiente, com uma velocidade de varredura de 1 Hz. Utilizou-se ponteiros de silício com raio de curvatura inferior a 10 nm e constante elástica de 42 N/m. O software Gwyddion 64 bits versão 2.3.4 foi utilizado para processar as imagens e medir os diâmetros das amostras em uma área escaneada de 5 $\mu\text{m}$  x 5 $\mu\text{m}$  (Kaboarani et al., 2012). Para calcular os diâmetros, foram consideradas as alturas das nanofibrilas, de modo a evitar interferência da ponta da sonda nas medidas. Aproximadamente 100 nanofibrilas ou feixes foram selecionados aleatoriamente para cada condição experimental, e duas medições de altura foram realizadas para determinar o diâmetro médio (Silvério et al., 2013).

#### 4.2.1.4 Diluição da Nanocelulose

A nanocelulose de Bambu inicialmente, encontrava-se com concentração *in natura* de 1,5% (m/v) (figura 15). Entretanto, para realização dos testes foi necessária uma diluição do biorreagente até a concentração de 0,05% (m/m), utilizando a equação 4.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad [4]$$

Onde:

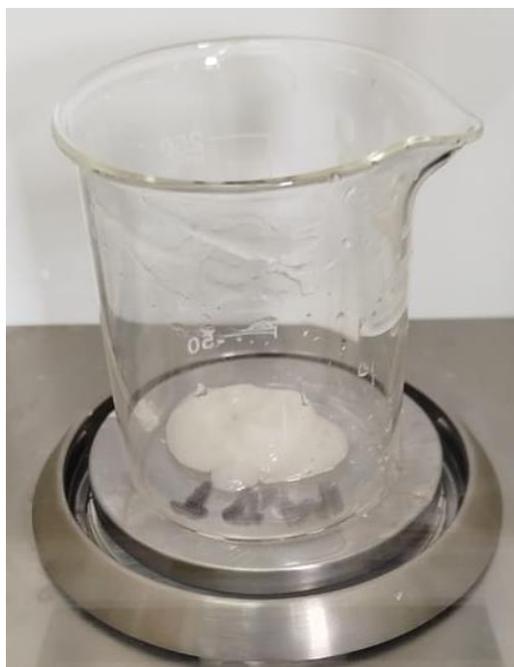
$C_1$ = Concentração inicial

$V_1$ = Volume inicial

$C_2$ = Concentração Final

$V_2$ = Volume Final

Figura 15 - Nanocelulose com concentração 1,5% (m/m)



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Após os cálculos necessários, foram pesados em um béquer, 250 g de água destilada e 8,3 g de Nanocelulose de bambu em uma balança de precisão. Para o

preparo da suspensão, a nanocelulose e a água destilada foram transferidos para um balão volumétrico de 1000 ml. A suspensão foi, então, agitada lentamente com o auxílio de um agitador magnético (figura 16). Após identificar uma suspensão homogênea, a agitação foi interrompida e a nanocelulose, transferida para um recipiente plástico e armazenado na geladeira até seu uso.

Figura 16 - Solução homogênea (concentração 0,05% (m/m))



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

#### 4.2.2 Magnafloc 351

O Magnafloc 351, floculante sintético não aniônico da BASF foi preparado na concentração de 0,05% (m/m) para utilização dos ensaios de sedimentação. Dado que o floculante estava na forma de pó, pesaram-se 0,125 g do mesmo em uma balança de precisão. Em seguida, adicionou-se esse quantitativo a um béquer de vidro contendo 250 ml de água destilada. A solução foi agitada lentamente até que todos os flocos solubilizem.

### 4.3 Ensaio de Sedimentação na proveta sem reagente

Para realizar o teste de sedimentação em proveta sem reagentes, mediu-se 1000 ml de água em uma proveta graduada, em seguida, colocou-se 153,09 g de rejeito fosfático, seguindo a porcentagem de sólidos de 14%. A polpa foi agitada para dispersar as partículas. Após o fim da agitação, o processo de sedimentação foi monitorado durante 24 horas, utilizando uma fita marcadora na parte exterior da proveta, para realização da mensuração da altura da interface do clarificado nos tempos pré-determinados. Com os valores obtidos para altura de todas as interfaces, construiu-se a curva de sedimentação, avaliando-se na sequência, a velocidade de sedimentação pela equação 5, fixando-se a distância de 60 cm, a fim de garantir medições de velocidade mais precisas.

$$V_s = \frac{\Delta D}{\Delta T} \quad [5]$$

### 4.4 Ensaio de Sedimentação no Jar test

Os ensaios de sedimentação foram realizados utilizando o equipamento *Jar test* modelo SP-606A (Figura 17). As seis cubetas foram empregadas, embora os testes tenham sido executados individualmente. Para a preparação das polpas nas cubas do *Jar test*, foram medidos 1411 ml de água com o auxílio de uma proveta de 1000 ml, que em seguida foram transferidos para cada cuba. Em seguida, 0,230 kg de material (rejeito) foram adicionados a cada cubeta, formando uma polpa com 14% de sólidos. A determinação da porcentagem de sólidos foi baseada no banco de dados fornecido pela empresa parceira.

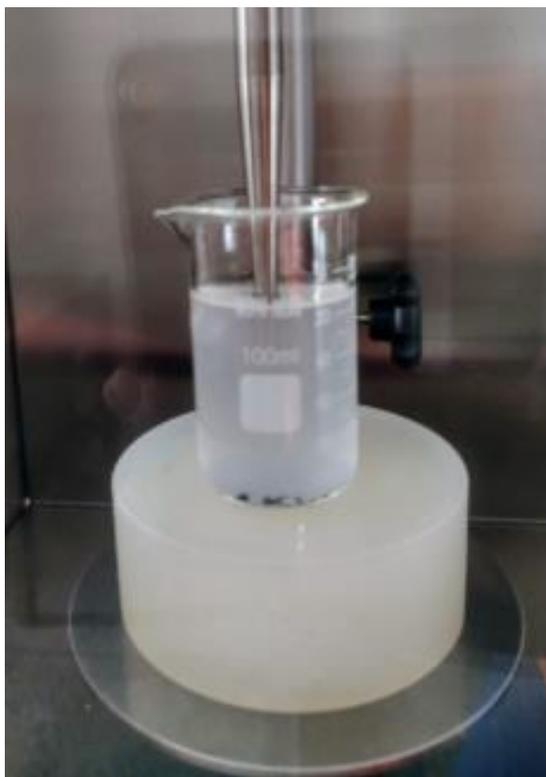
Figura 17 - *Jar test* modelo SP-606A

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2025).

A polpa foi homogeneizada para cada teste realizado até que todos os sólidos estivessem suspensos. A rotação de homogeneização foi 200 rpm. Em seguida, foi medido o pH da polpa natural, utilizando o medidor de pH modelo HANNA M-7962, obtendo um pH de aproximadamente 7,5. Após identificação do pH natural, conforme planejamento fatorial proposto, o pH de cada polpa foi ajustado utilizando hidróxido de sódio a 10% m/m (NaOH) para elevação do pH. Da mesma forma, o ácido clorídrico (HCl 1M) foi utilizado para reduzir o valor do pH.

Antes de iniciar o teste de sedimentação com adição de suspensão de nanocelulose de bambu (0,05% m/m), foi realizada a sonicação do biorreagente (figura 18) no laboratório de Polímeros e Materiais Nanoestruturados. A sonicação foi realizada utilizando um sonicador de ponteira ultrassônico modelo QR550, fabricado pela Eco-Sonics. Para realizar a sonicação, a amostra deve ser primeiramente colocada em um recipiente adequado, garantindo que a ponteira micro do sonicador QR550 fique submersa na amostra, sem tocar nas paredes ou fundo do frasco. Durante o processo de sonicação é importante monitorar a amostra e utilizar um abafador devido o barulho do instrumento. Finalmente, o equipamento e a ponteira foram devidamente limpos e a polpa foi mantida sob agitação no *Jar test*.

Figura 18 - Sonicação do biorreagente.



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Após o processo de sonicação, a nanocelulose foi mantida em repouso por 10 minutos antes do início de uma nova etapa de teste, a fim de padronizar a qualidade do biorreagente após a sonicação. A solução foi então adicionada à polpa homogênea sob agitação e condicionada de acordo com o planejamento fatorial. Após o período de condicionamento, o equipamento *Jar test* foi desligado e iniciou-se o ensaio de sedimentação com o acionamento do cronômetro. A altura da interface do clarificado foi registrada em intervalos pré-determinados, conforme indicado no quadro 1, com auxílio de um gabarito feito com papel milimetrado localizado na parte exterior de cada cuba. A duração de cada teste foi de 30 minutos, definida nos testes preliminares. Ao final do teste, removeu-se uma alíquota no local de coleta presente na cuba para determinação da turbidez do clarificado, utilizando o turbidímetro HI93703 da Hanna Instruments.

Quadro 1 - Intervalos pré-determinados

intervalos pré-determinados			
minutos	segundos	minutos	segundos
0	0	0,92	55
0,08	5	1	60
0,17	10	2	120
0,25	15	3	180
0,33	20	5	300
0,42	25	7	420
0,5	30	9	540
0,58	35	14	840
0,7	40	19	1140
0,75	45	24	1440
0,83	50	30	1800

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Para comparar os resultados obtidos com o biorreagente nanocelulose, foram realizados três testes de sedimentação no *Jar test* utilizando o floculante sintético Magnafloc 351 na concentração de 0,05% (m/v). Os testes seguiram o mesmo procedimento utilizado com a nanocelulose de bambu, exceto pelo processo de sonicação. Utilizou-se uma dosagem de 165 g/t de Magnafloc, tempo de condicionamento de 5 minutos, pH 7,5 e rotação de 200 rpm, conforme os 3 pontos centrais do planejamento fatorial. Ao final de cada teste, removeu-se uma alíquota no local de coleta presente na cuba para determinação da turbidez do clarificado, utilizando o turbidímetro HI93703 da Hanna Instruments.

#### 4.5 Planejamento Fatorial

Com base nos testes exploratórios anteriores que estabeleceram a metodologia a ser utilizada, foram realizados os testes de sedimentação de forma aleatória utilizando a nanocelulose de bambu no equipamento *Jar test*, seguindo o planejamento fatorial de dois níveis ( $2^4$ ) com 3 pontos centrais (ensaio 17,18 e 19)

conforme a tabela 1. Os fatores avaliados incluíram a dosagem de Nanocelulose (30, 165 e 300 g/t), a variação do pH (5,5; 7,5 e 9,5) em faixas que variam de ácidas a alcalinas, o tempo de condicionamento (2, 5 e 8 minutos) e a frequência de agitação durante o condicionamento (100, 200 e 300 rpm).

Tabela 1 - Planejamento Fatorial Multinível

OrdemPad	OrdemEns	Nanocelulose (g/t)	pH	Tempo Cond (min)	Rotação (rpm)
1	1	30	5,5	2	100
2	2	300	5,5	2	100
3	3	30	9,5	2	100
4	4	300	9,5	2	100
5	5	30	5,5	8	100
6	6	300	5,5	8	100
7	7	30	9,5	8	100
8	8	300	9,5	8	100
9	9	30	5,5	2	300
10	10	300	5,5	2	300
11	11	30	9,5	2	300
12	12	300	9,5	2	300
13	13	30	5,5	8	300
14	14	300	5,5	8	300
15	15	30	9,5	8	300
16	16	300	9,5	8	300
17	17	165	7,5	5	200
18	18	165	7,5	5	200
19	19	165	7,5	5	200

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados alcançados após o desenvolvimento da metodologia e sua respectiva discussão.

### 5.1 Análise granulométrica e química

A análise química por fluorescência de raios-X e granulométrica foi realizada pela empresa parceira para identificar a composição química da amostra utilizada nos testes, conforme mostrado na Tabela 2. Com base nos dados, observa-se que o rejeito contém 36,89% de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), 17,93% de Óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), indicando uma possível recuperação de ferro, podendo ser aplicado na indústria siderúrgica e 8,32% de óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ). O alto teor de  $\text{SiO}_2$ , principal componente do rejeito, evidência a possibilidade de reaproveitamento, como, na indústria siderúrgica e construção civil. Por outro lado, em rejeitos, o quartzo geralmente está associado com outros minerais, exigindo processos complexos para sua separação. Além disso, este rejeito contém 2,77% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  indicando a presença de fósforo, principal elemento para produção de fertilizantes.

Tabela 2 - Composição Química da Amostra

Espécie química	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{K}_2\text{O}$
Teor (%)	2,77	17,93	8,32	7,36	6,6	36,89	5,73	0,27	1,54

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Adicionalmente, a análise granuloquímica da amostra (Quadro 2) indica que 82% da partículas (P82) é passante em 25  $\mu\text{m}$ . No qual, este material passante contém 2,88 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e 36,67% de  $\text{SiO}_2$ .

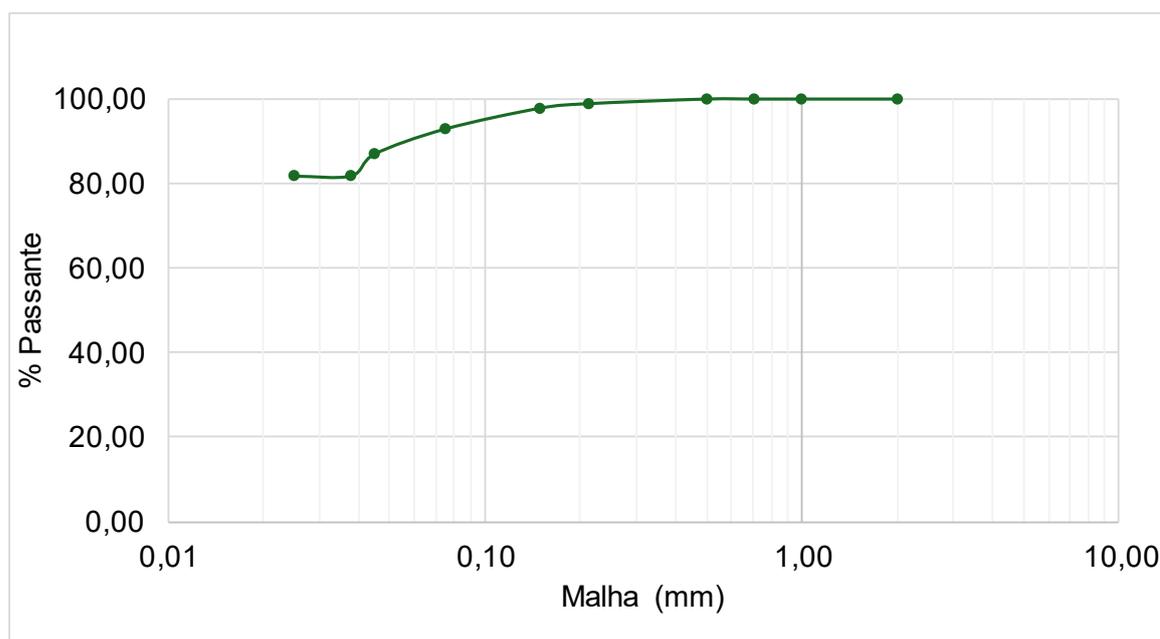
## Quadro 2 - Análise Granuloquímica

Overflow deslamagem ( 11/10/2024)							Óxidos por faixa									
Mesh (#)	µm	Massa (g)	Retido Simp. (%)	Retido Acum. (%)	Passante (%)	Dist. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	RCP
9	2000		0,0%	0,0%	100,0%	0,0%										
16	1000		0,0%	0,0%	100,0%	0,0%										
24	710		0,0%	0,0%	100,0%	0,0%										
32	500		0,0%	0,0%	100,0%	0,0%										
65	212	2,2	1,1%	1,1%	98,9%	0,9%	2,2	14,27	10,06	9,23	6,46	36,88	6,53	0,22	2,47	4,20
100	150	2,1	1,0%	2,1%	97,9%	0,8%	1,95	15,75	9,61	9,41	6,06	35,76	6,79	0,23	2,12	4,83
200	75	9,9	4,9%	7,1%	92,9%	2,4%	1,27	14,19	13,2	6,28	7,25	37,66	4,58	0,23	1,92	4,94
325	45	11,8	5,9%	13,0%	87,0%	2,7%	1,18	14,87	13,54	4,88	7,68	38,48	3,52	0,25	1,87	4,14
400	38	10,3	5,1%	18,1%	81,9%	3,3%	1,69	14,50	11,70	5,78	7,32	40,07	3,64	0,26	2,13	3,42
500	25	0,15	0,1%	18,2%	81,8%	0,1%	2,88	18,59	7,72	7,52	6,37	36,67	6,09	0,28	1,46	2,61
<500	<25	163,6	81,8%	100,0%	0,00%	89,8%	2,88	18,59	7,72	7,52	6,37	36,67	6,09	0,28	1,46	2,61
Total		200,05	100,0%	-		100,0%	2,62	17,86	8,58	7,25	6,54	36,99	5,75	0,27	1,56	2,77
Amostra de cabeça							2,77	17,93	8,32	7,36	6,60	36,89	5,73	0,27	1,54	2,66

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Após a análise granulométrica, considerando as massas retidas em cada peneira foi possível identificar a porcentagem retida e o passante em cada malha. Assim, a curva granulométrica foi construída correspondente aos resultados e apresentada na figura 19.

Figura 19 - Distribuição granulométrica da amostra



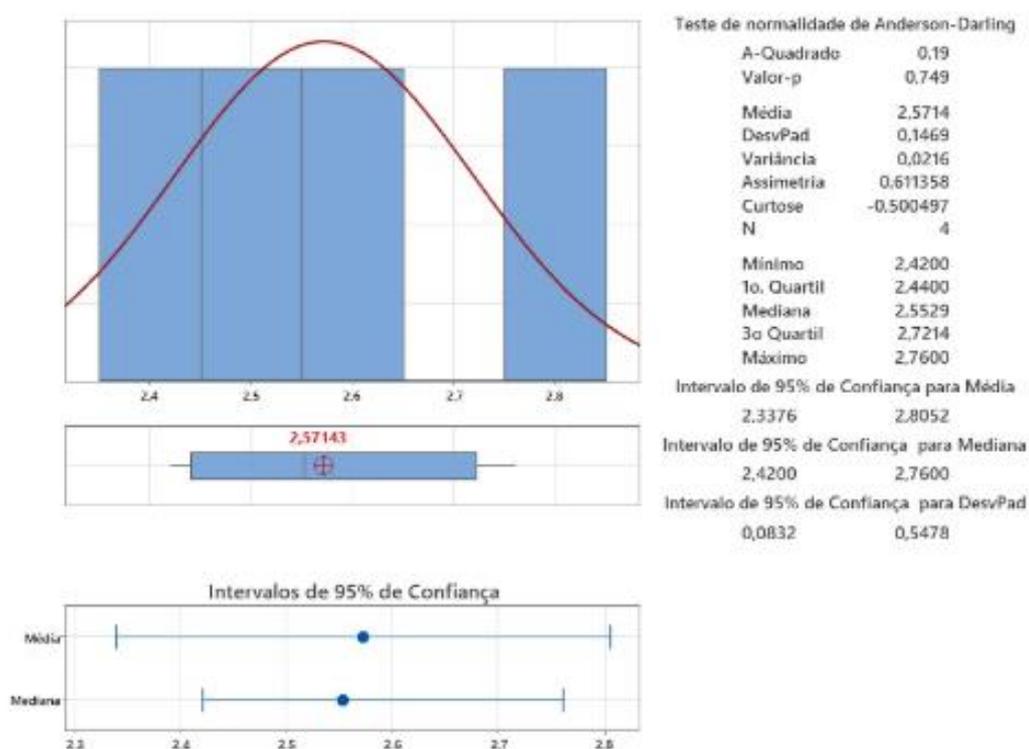
Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

De acordo com a figura 19, observa-se que 98,90% da amostra possui granulometria inferior a 0,212 mm (65#), enquanto 81,85% apresentam tamanhos abaixo de 0,038 mm (400#). Esses resultados eram esperados, pois materiais destinados a barragens geralmente possuem partículas mais finas.

## 5.2 Determinação da Densidade (Picnometria)

Os ensaios de picnometria realizados pela empresa parceira resultaram em uma densidade de  $2,59 \text{ g/cm}^3$ . Com base no banco de dados da empresa, foi possível analisar estatisticamente a variabilidade da densidade do rejeito fosfático utilizando o *software* Minitab, conforme representado na figura 20.

Figura 20 - Relatório Densidade da amostra com base no banco de dados



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

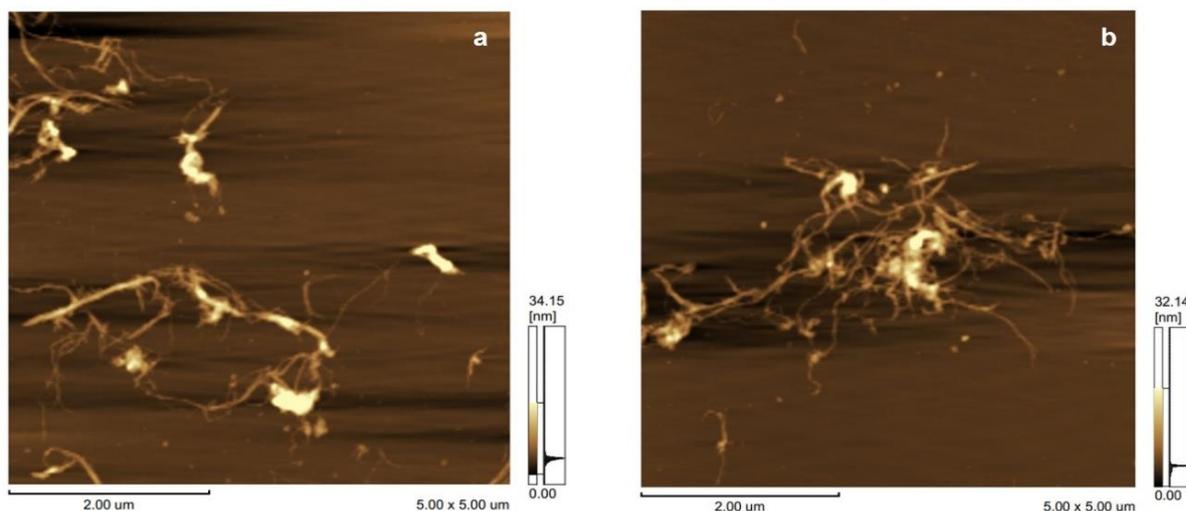
De acordo com a figura 20, o teste de Anderson-Darling apresentou um valor-p de 0,749, evidenciando que os dados seguem uma distribuição normal ao nível de significância de 5%, ou seja, os dados são representativos. Além disso, considerando um intervalo de 95% de confiança, a densidade foi de aproximadamente 2,33 a 2,81  $\text{g/cm}^3$  com desvio padrão de 0,08 a 0,55. Por outro lado, a densidade média e o seu desvio padrão foram de aproximadamente  $2,57 \text{ g/cm}^3$  e 0,15, respectivamente. Contudo, observa-se que o valor de densidade obtido no método de picnometria ( $2,59$

g/cm<sup>3</sup>) encontra-se dentro do intervalo de confiança estatístico, reforçando a representatividade do banco de dados.

### 5.3 Análise Detalhada da Nanocelulose de Bambu

A figura 21 mostra imagens de topografia de MFA das suspensões de nanofibrilas de celulose de polpa de bambu. Nota-se que as amostras formam novelos devido às fortes ligações de hidrogênio. Após diversas passagens pelo desfibrilador, observou-se uma ampla faixa de distribuição de tamanhos (largura) das nanoestruturas. As imagens revelam menos amostras e maior individualização dos feixes de nanocelulose com o aumento do número de passagens pelo desfibrilador mecânico. Os resultados da investigação morfológica são consistentes com outros estudos sobre a morfologia de materiais nanocelulósicos de diferentes fontes (Karimi et al. 2014; Jonoobi et al. 2009; Shi et al. 2011; Li et al. 2014; Abe & Yano, 2010).

Figura 21 - topografia de MFA das suspensões de nanofibrilas de celulose de polpa de bambu.

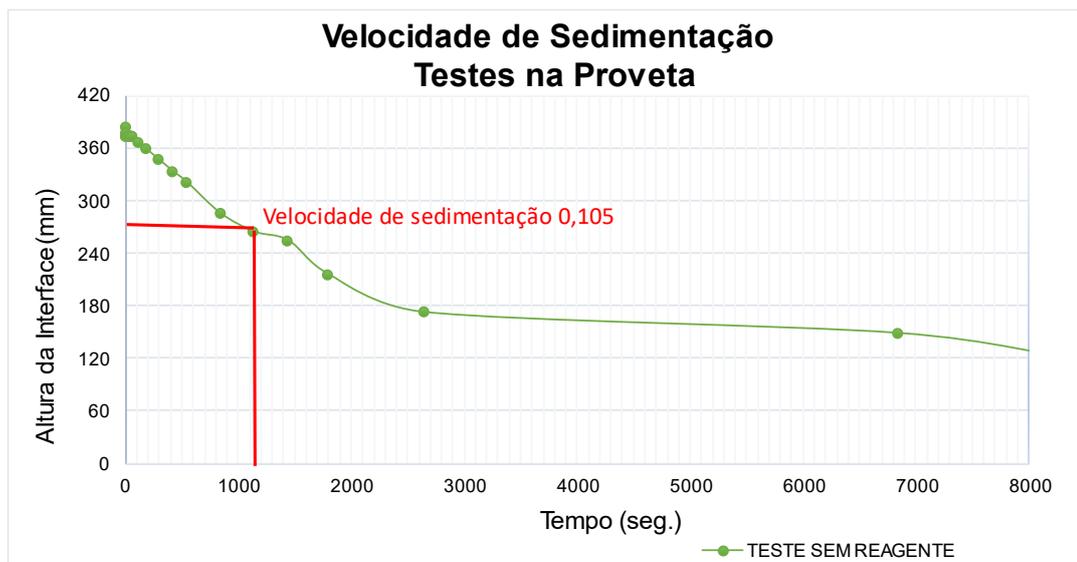


Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

#### 5.4 Teste de sedimentação na proveta sem reagente

A figura 22 representa a curva de sedimentação do teste realizado para determinar o comportamento natural do material sem atuação dos reagentes. Com pH natural, identificou-se a formação da interface sólido-líquido.

Figura 22 - Curva de sedimentação teste sem reagente



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Observando a curva da figura 22, nota-se que a velocidade de sedimentação foi de 0,105 mm/s. Este comportamento está associado a queda livre das partículas individuais, onde as partículas sedimentam sem interferência significativa umas das outras. Após 1000 s, a sedimentação é mais lenta devido a formação da rede estrutural das partículas, interação maior entre as partículas e a resistência elevada a consolidação.

#### 5.5 Teste de sedimentação no *Jar test*

Inicialmente, foram realizados ensaios de sedimentação no *Jar test*, utilizando um planejamento fatorial para avaliar o comportamento da nanocelulose de bambu. Em seguida, foram conduzidos testes com o Magnafloc 351, floculante poliacrilamida não aniônico, com o objetivo de comparar e determinar a eficiência do biorreagente

de nanocelulose de bambu em relação ao reagente sintético comercial Magnafloc, produzido pela BASF.

### 5.5.1 Análise Planejamento fatorial Nanocelulose de Bambu

O Quadro 3 apresenta os resultados do planejamento fatorial com a utilização da Nanocelulose de Bambu no processo de sedimentação. Foram realizados 19 ensaios no *Jar test*, variando o pH, tempo de condicionamento, dosagem da nanocelulose e a agitação do meio durante o condicionamento. A velocidade de sedimentação e a turbidez do clarificado após 30 minutos, foram analisados de forma individual.

Quadro 3 - Planejamento fatorial com os resultados

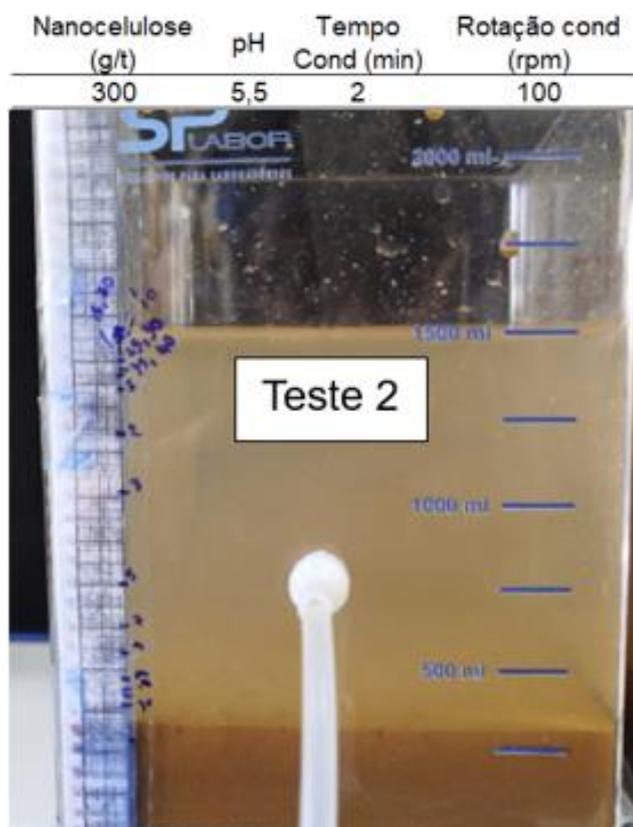
Ensaio	Nanocelulose de Bambu (g/t)	pH	Tempo Condicionamento (min)	Rotação (rpm)	Turbidez (NTU)	Veloc. Sedimentação (mm/s)
1	30	5,5	2	100	389	0,177
2	300	5,5	2	100	1000	0,200
3	30	9,5	2	100	407	0,050
4	300	9,5	2	100	432	0,045
5	30	5,5	8	100	665	0,161
6	300	5,5	8	100	1000	0,143
7	30	9,5	8	100	149	0,041
8	300	9,5	8	100	723	0,046
9	30	5,5	2	300	203	0,126
10	300	5,5	2	300	299	0,158
11	30	9,5	2	300	104	0,040
12	300	9,5	2	300	820	0,045
13	30	5,5	8	300	428	0,131
14	300	5,5	8	300	1000	0,125
15	30	9,5	8	300	309	0,074
16	300	9,5	8	300	626	0,125
17	165	7,5	5	200	1000	0,167
18	165	7,5	5	200	1000	0,162
19	165	7,5	5	200	1000	0,153

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

A taxa de sedimentação é um fator crucial no processo de sedimentação, uma vez que promove maior eficiência no espessamento quando a velocidade de sedimentação é elevada. Para realizar o cálculo das velocidades de sedimentação, considerou-se altura de interface de 60 mm para todos os testes, a fim de garantir a precisão.

Observando a Quadro 3, nota-se que a dosagem de 300 g/t de nanocelulose de bambu mostrou, em geral, maior eficiência na velocidade de sedimentação, especialmente em condições de pH 5,5 e 7,5, quando comparado com as dosagens de 30 g/t e 165 g/t. Além disso, o ensaio 2 (figura 23) teve mais eficiência, com velocidade de sedimentação de 0,2 mm/s, entretanto, a turbidez foi acima do nível de detecção.

Figura 23 - Ensaio sedimentação 2

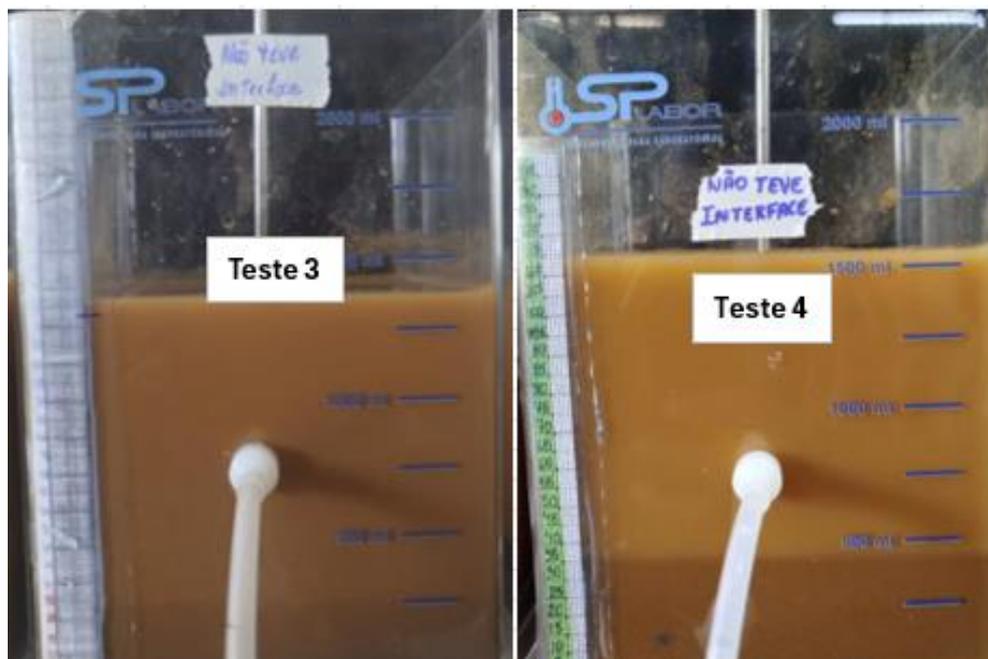


Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Os testes 3 e 4 (figura 24), realizados em pH 9,5, variando somente a dosagem da nanocelulose não tiveram a interface sólido-líquido devido a quantidade de partículas suspensas durante o processo de sedimentação. Essa dispersão das partículas coloidais no meio pode estar associada com o aumento da repulsão eletrostática entre as partículas, no qual diminui a eficiência do processo de sedimentação. Além disso, percebe-se que a velocidade de sedimentação nesses testes foi mais lenta em comparação aos demais, o que implica na necessidade de um maior tempo de sedimentação e diminui a eficiência na separação sólido-líquido.

Isso sugere que partículas coloidais podem ser direcionadas para o *overflow* do espessador, reduzindo a qualidade do clarificado.

Figura 24 - Testes com pH 9,5



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Utilizando os resultados obtidos, foi realizada análise estatística dos dados por meio do Minitab®, considerando um nível de confiança de 95%. Primeiramente, avaliou-se por meio da análise de variância (ANOVA) os fatores que tiveram um efeito significativo estatisticamente em relação a velocidade de sedimentação.

Na tabela 3, referente à velocidade de sedimentação, evidencia que o modelo geral explicou 99,95% da variância, com um valor-P de 0,004. De acordo com as definições estatísticas qualquer fator que apresente valor-P menor que 0,05, ou seja, abaixo do nível de significância de 5% é considerado significativo para a resposta do modelo. A qualidade do modelo obtido também está relacionada com o valor de  $R^2$  (AJUSTADO), que, neste caso, apresentou um percentual de 99,53.

Tabela 3 - Análise de variância da velocidade de sedimentação

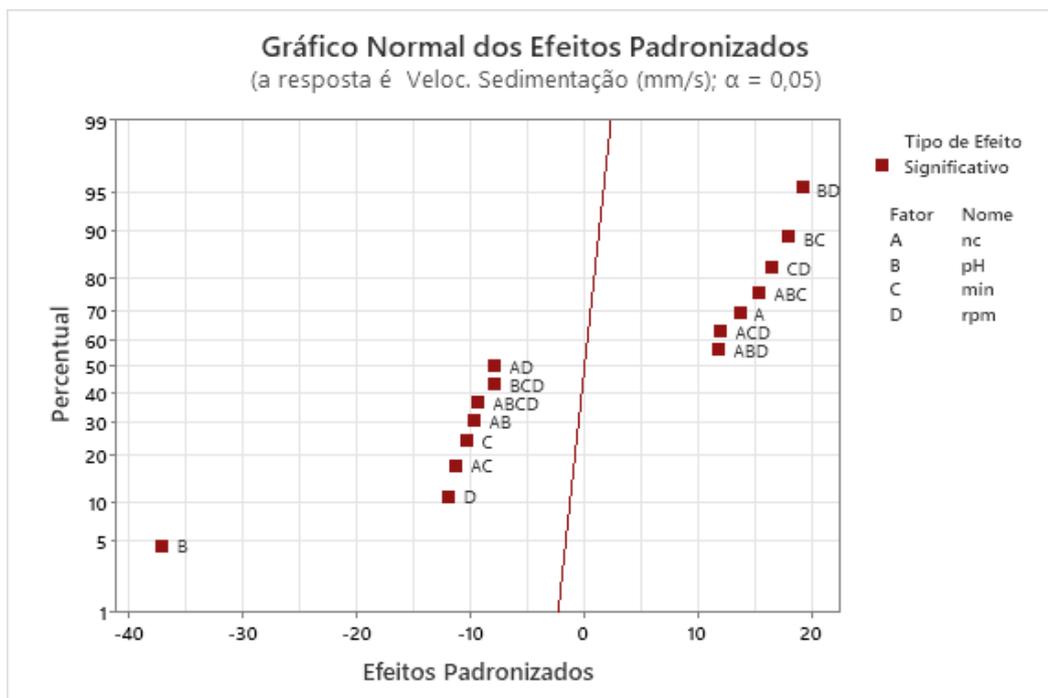
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	16	99,95%	0,004
Linear	4	47,91%	0,002
<b>Dosagem Nanocelulose</b>	<b>1</b>	<b>4,90%</b>	<b>0,005</b>
<b>pH</b>	<b>1</b>	<b>36,41%</b>	<b>0,001</b>
<b>Condicionamento (min)</b>	<b>1</b>	<b>2,85%</b>	<b>0,009</b>
<b>Rotação (rpm)</b>	<b>1</b>	<b>3,76%</b>	<b>0,007</b>
Interação com 2 Fatores	6	32,70%	0,005
pH*condicionamento	1	8,41%	0,003
<b>pH*rotação</b>	<b>1</b>	<b>9,64%</b>	<b>0,003</b>
Erro	2	0,05%	
Total	12	100,0%	

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Ainda na tabela 3, entre os fatores do modelo, o pH é o fator com maior influência na velocidade de sedimentação, contribuindo com 36,41% do total, com um valor-P de 0,001. No entanto, a alteração do pH implica em um aumento nos custos operacionais devido à necessidade de utilizar reagentes químicos. Além do pH, a dosagem da Nanocelulose de bambu contribui 4,90% na variabilidade da velocidade de sedimentação. Outra informação é a interação entre 2 fatores, onde pH\*condicionamento e pH\*rotação possuem significância para o resultado da velocidade de sedimentação. O erro do modelo interfere somente 0,05% na resposta final, demonstrando confiabilidade dos testes de sedimentação.

A figura 25 ilustra os efeitos padronizados da dosagem da Nanocelulose de bambu (Fator A), pH (fator B), tempo de condicionamento (fator C) e rotação (fator D).

Figura 25 - Gráfico normal dos efeitos padronizados

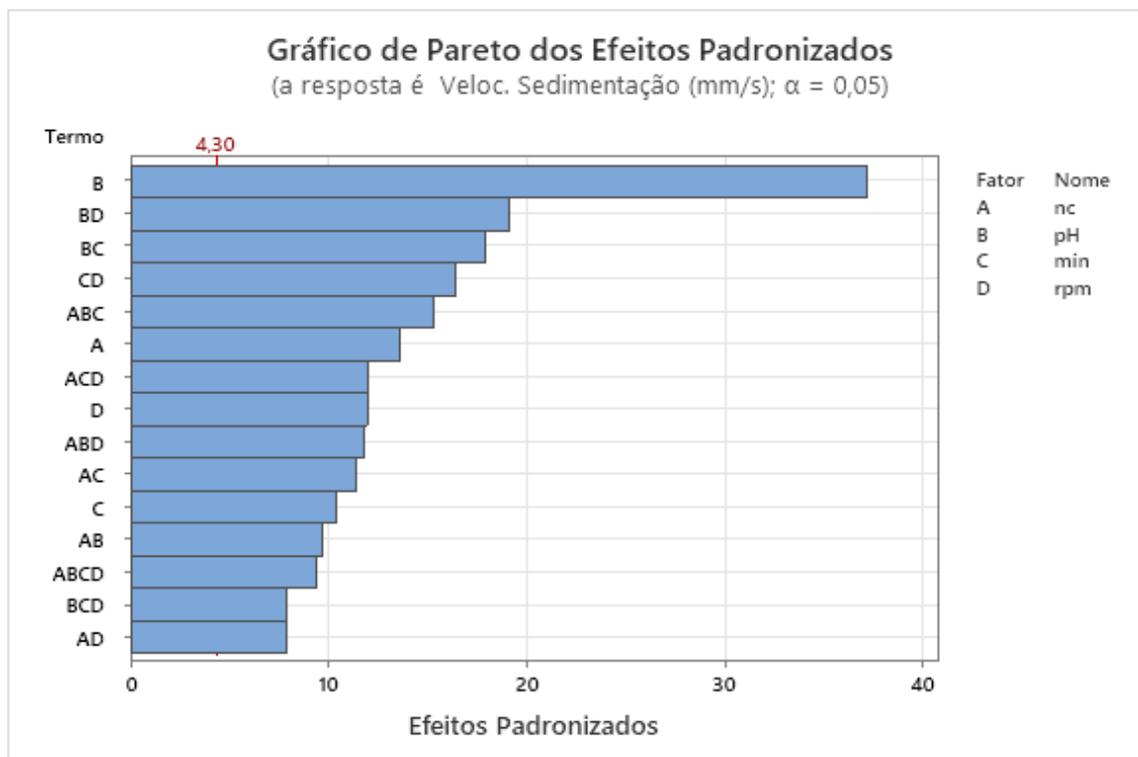


Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Analisando o comportamento do gráfico dos efeitos padronizados, há influências positivas e negativas. Assim, os efeitos BD, BC e CD possuem maior significância, no qual se concentram à direita da linha de referência. Isso indica que o pH em combinação com a rotação e o tempo de condicionamento, tem um papel crítico no aumento da velocidade de sedimentação. O Fator A, de forma individual também foi significativo, evidenciando que somente a variação da dosagem de Nanocelulose de bambu tem grande influência no resultado. Além disso, a interação negativa AB (dosagem da Nanocelulose e pH) é evidenciada na figura 24, onde ao final do teste, a turbidez do meio estava acima de 1000 NTU devido à quantidade de partículas dispersas.

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados (figura 26), demonstra os fatores e as interações que influenciaram a resposta do experimento de forma decrescente. O valor 4,30 presente no gráfico indica o valor crítico, em que apenas os valores positivos favorecem a velocidade de sedimentação.

Figura 26 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Dentre os fatores, o pH (fator B) apresenta-se como o mais significativo e exerce a maior influência sobre a velocidade de sedimentação. Posteriormente, observa-se que as interações entre pH e rotação (fatores BD), bem como entre pH e tempo de condicionamento (fatores BC), corroboram para que a combinação do pH com outros parâmetros apresente um impacto substancial nos resultados obtidos.

### 5.5.2 Comparação dos testes com Nanocelulose de Bambu e Magnafloc 351

Os testes com magnafloc 351 mostraram maior velocidade de sedimentação e menor turbidez quando comparados aos ensaios utilizando a Nanocelulose de Bambu (tabela 4). Nos testes 17, 18 e 19, realizados sob as mesmas condições dos ensaios com Magnafloc 351, mas utilizando Nanocelulose de Bambu (Quadro 3), as velocidades de sedimentação obtidas foram 0,167 mm/s, 0,162 mm/s e 0,153 mm/s, respectivamente. Tal resultado já era esperado, visto que flocculantes sintéticos tendem

a ser mais eficazes no processo de agregação das partículas devido ao seu alto peso molecular, estrutura química e capacidade de adsorção.

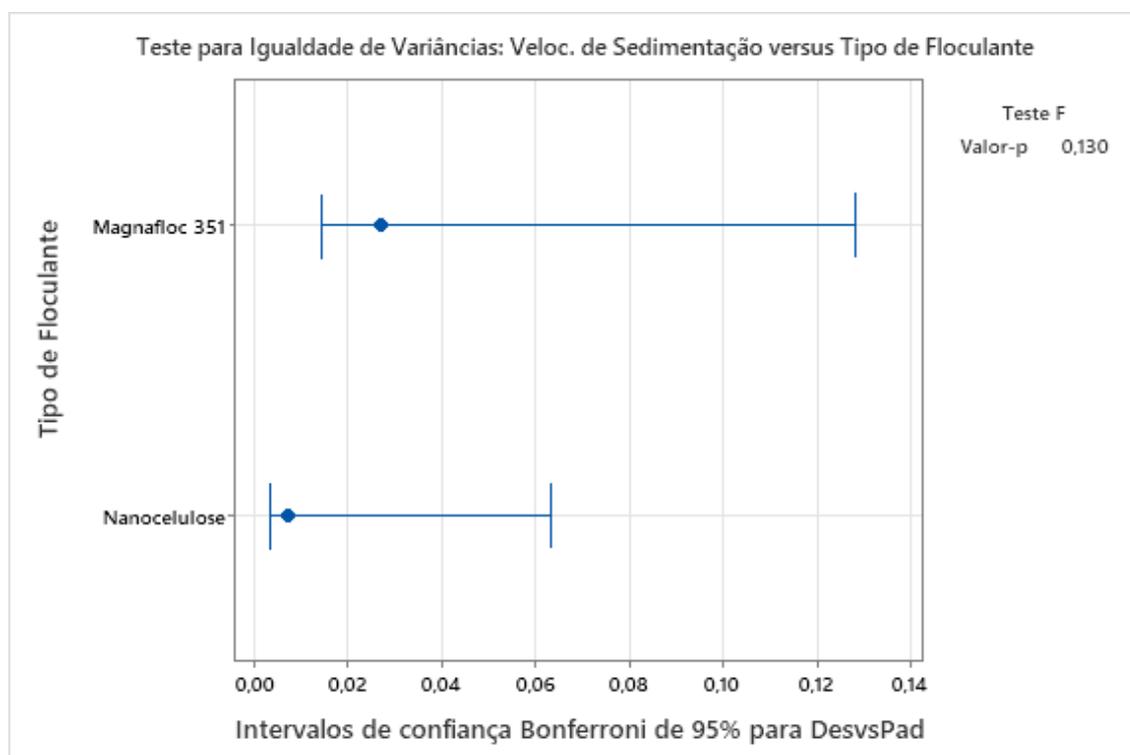
Tabela 4 - Teste de sedimentação Magnafloc 351

Ensaio	Magnafloc 351 (g/t)	pH	Tempo Condicionamento (min)	Rotação (rpm)	Turbidez (NTU)	Veloc. Sedimentação (mm/s)
20	165	7,5	5	200	129	0,306
21	165	7,5	5	200	153	0,333
22	165	7,5	5	200	135	0,331

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Logo, conforme a figura 27, os dois flocculantes se sobrepõem, evidenciando que em termos estatísticos não há diferença entre as variâncias, como reforçado pelo valor-p de 0,130, que é maior que o nível de significância de 0,05 (5%). Assim, não se rejeita a hipótese nula de igualdade das variâncias.

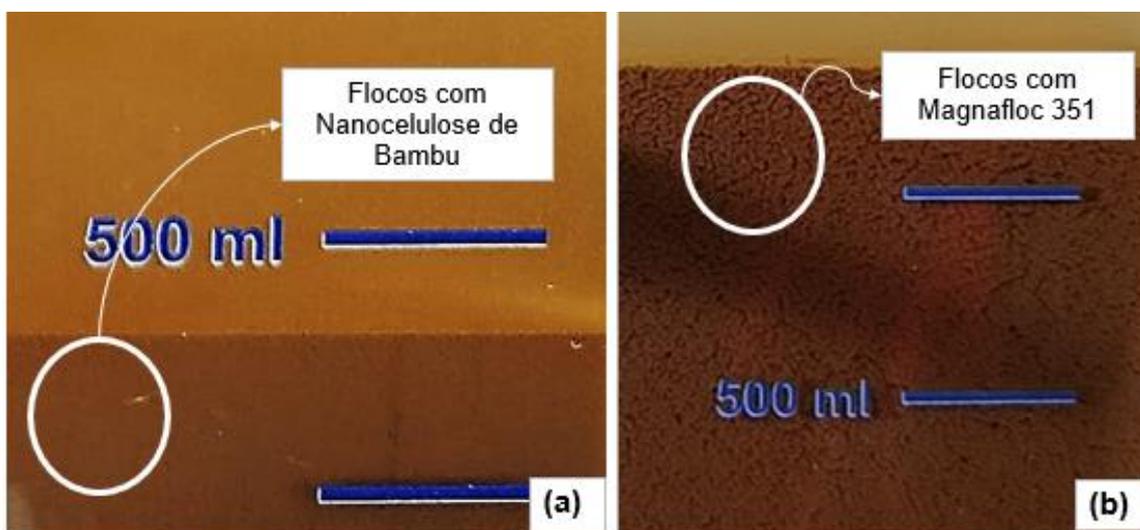
Figura 27 - Teste de igualdade de Variâncias



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

Embora os testes indiquem que o Magnafloc 351 tenha apresentado melhores resultados, fica claro aqui que a Nanocelulose de Bambu apresentou benefícios estratégicos e ambientais que a tornam a melhor opção a longo prazo. Além disso, durante o processo de agregação das partículas foi observado que o biorreagente permitiu a formação de flocos menores (Figura 28a), ao comparar com os flocos formados sob atuação do Magnafloc 351 (figura 28b). Isso facilita a compactação das partículas e melhora a eficiência na remoção de água devido à menor retenção de água nos flocos gerados, favorecendo as etapas de filtragem e centrifugação.

Figura 28 - Formação dos flocos (a) flocos com Nanocelulose de Bambu; (b) flocos com Magnafloc 351.



Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2024).

## 6. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado teve como objetivo explorar a eficiência da nano estrutura lignocelulósica de bambu como biorreagente no espessamento de rejeito fosfático. Conclui-se que a Nanocelulose de Bambu, nas dosagens de 30, 165 e 300 g/t, demonstrou efeito positivo na velocidade de sedimentação, quando comparada ao teste feito na proveta sem reagente que teve uma velocidade de sedimentação de 0,105 mm/s.

Os testes com a nanocelulose de bambu, conforme o planejamento fatorial, indicaram que os ensaios 1 e 2 apresentaram maior velocidade de sedimentação. Isso demonstra que o aumento da dosagem da nanocelulose de bambu resulta em uma maior velocidade de sedimentação, mas também afeta negativamente a turbidez do meio.

No teste 2, observa-se que, embora tenha se formado a interface sólido-líquido, a turbidez final foi elevada (>1000 NTU), no entanto, a velocidade de sedimentação foi alta (0,200 mm/s). Conclui-se que, em condições de maior velocidade, partículas coloidais podem permanecer suspensas.

O desempenho da nanocelulose de bambu foi maior atuando em meio ácido (pH 5,5), proporcionando menor turbidez e maior velocidade de sedimentação. Entretanto, os testes realizados em pH 9,5 não apresentaram formação da interface sólido-líquido. Ao término desses testes, observou-se um número significativo de partículas dispersas no meio. Além disso, a velocidade de sedimentação foi inferior em comparação com os testes realizados em pH 5,5 e 7,5.

Os resultados estatísticos mostram que as interações entre tempo de condicionamento, rotação e o pH afetam o processo, embora a dosagem da nanocelulose tenha uma contribuição menor.

Apesar dos testes com Magnafloc 351 apresentarem maiores velocidades de sedimentação, nas condições avaliadas, é importante ressaltar que, a nanocelulose de bambu apresenta características que beneficie as etapas de filtração e centrifugação devido a formação flocos menores. Além disso, este biorreagente apresenta potencial como alternativa sustentável para sedimentação devido a sua propriedade biodegradável e sua origem é de fontes renováveis.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABE, K. & YANO, H. **Comparison of the characteristics of cellulose microfibril aggregates isolated from fiber and parenchyma cells of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*)**. *Cellulose*, v.17, p.271–277, 2010.
- ANDRADE, E.L. **Análise de eficiência de biopolímero como composto coadjuvante no processo de coagulação-floculação e sedimentação**. Tese de M.Sc., Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2017.
- ARAÚJO, B. A.; FREITAS, L. S. de; SARMENTO, K. K. F.; BEZERRA, V. R.; LIMA, C. A. P. de; MEDEIROS, K. M. de. **The application of biodegradable polymers as a sustainable alternative**. *Research, Society and Development, [S. l.]*, v. 10, n. 9, p. e49010918248, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i9.18248. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18248>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- BALTAR, C. A. M. **Agregação na separação sólido-líquido**. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. *Tratamento de Minérios*. 6 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2018, p. 513-539.
- BALTAR, C. A. M. **Processos de agregação**. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. *Tratamento de Minérios*. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 559-594.
- BARROS, L. A. F. **Caracterização Tecnológica de Minério Fosfático de Salitre Patrocínio - MG**. 2005. p. 434 Tese de Doutorado. (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. 4ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 2, 2013, 240 p.
- CLEBSCH, A. B.; WATANABE, M. **Abordagem da nanociência e nanotecnologia a partir da escala**. *Revista Novas Tecnologias na Educação*, v. 15, n. 1, 2017.
- CRUZ, João Guilherme Heinz. **Alternativas para a aplicação de coagulante vegetal à base de tanino no tratamento do efluente de uma lavanderia industrial**. 2004.
- ESPANHOL, K. M. H. **Cinética de floculação de suspensões coloidais: influência da dosagem de coagulante metálico e da concentração de partículas primárias nas constantes de agregação e ruptura**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- FERNANDES, F. S. **Uso de materiais lignocelulósicos para remoção de metais pesados**. 2021. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.
- FREITAS, C. M.; BARCELLOS, C.; HELLER, L.; LUZ, Z. M. P. **Desastres em barragens de mineração: lições do passado para reduzir riscos atuais e futuros**. *Epidemiologia e serviços de saúde*, v. 28, n. 1, p. e20180120, 2019.
- GUIMARÃES JÚNIOR, M. **Desenvolvimento de bionanocompósitos utilizando nanofibras celulósicas de bambu como agente de reforço em matriz de amido e**

**álcool polivinílico.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

GUIMARÃES, R. C. **Aspectos Relevantes da Separação de Barita em Minérios Fosfáticos Através de Flotação.** Belo Horizonte, 1997. p. 249 Tese de Doutorado. (Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG.

JONOOBI, M., HARUN, J., SHAKERI, A., MISRA, M., & OKSMAN, K. **Chemical composition, crystallinity, and thermal degradation of bleached and unbleached kenaf bast (*Hibiscus cannabinus*) pulp and nanofibers.** Bioresource, v.4, p.626–639, 2009.

JÚNIOR, Lima; ABREU, F. O. M. S. **Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes para tratamento de águas: uma revisão sobre benefícios e potencialidades.** Revista Virtual de Química, v. 10, n. 3, 2018.

JUNIOR, M.; VARANDA, L. **O Mundo Dos Colóides O Mundo Dos Colóides.** [s.l.] QUÍMICA E SOCIEDADE, maio 1999.

KABOORANI, A; RIEDL, B.; BLANCHET, P.; FELIN, M.; HOSSEINAEI, O.; WANG, S. **Nanocrystalline cellulose (NCC): a renewable nano-material for polyvinyl acetate (PVA) adhesive.** European Polymer Journal, v.48, p.1829-1837, 2012.

LI, MENG, WANG, LI-JUN, LIA, DONG, CHENG, YAN-LING, ADHIKARI, BENU. **Preparation and characterization of cellulose nanofibers from de-pectinated sugar beet pulp.** Carbohydrate polymers, v.102, p.1346-143, 2014.

LINS, F, F.; ADAMIAN, R. **Minerais Coloidais, Teoria DLVO Estendida e Forças Estruturais.** 2000.

LO, K. S. *et al.* **Obtenção de nanowhiskers a partir de fibras de bambu para uso em nanocompósitos.** 2016.

LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios.** 6ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2022.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 2010.

MARTINS, M. **Efeito de floculantes no espessamento e reologia de polpas de rejeito de minério de ferro.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2022.

MONTE, M. B. M.; PERES, A. E. C. **Química de Superfície na Flotação.** In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios.** 5 ed. Rio de Janeiro.

NAKANO, F. P. **Obtenção de fibras de pódio da casca do *Eucalyptus grandis* para utilização piloto na tratabilidade físico-química de água bruta com turbidez entre 100-110 NTU.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2016.

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. **Mecanismos, técnicas e aplicações de agregação no tratamento mineral e ambiental.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011. ISBN 978-85-61121-73-0.

OLIVEIRA, M. S. **Minério fosfático sílico-carbonatado: Estudo fundamental**. Belo Horizonte, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

PANTANO, G.; GROSSELI, G.; FADINI, P. **Sustainability in phosphorus use: a question of water and food security**. Química Nova, v. 39, n. 39, 2016.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de Nova Metodologia de Desaguamento de Rejeitos em Polpa**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

PEREIRA, F. V. *et al.* **Bionanocompósitos preparados por incorporação de nanocristais de celulose em polímeros biodegradáveis por meio de evaporação de solvente, automontagem ou eletrofição**. Química Nova, v. 37, p. 1209-1219, 2014.

PESSOA, M. E. A. **Obtenção de nanocelulose a partir de fibras de sisal e sua aplicação em fluidos de perfuração**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. Dissertação (Mestrado)—Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Belo Horizonte.

RODRIGUES, C. *et al.* **Materiais lignocelulósicos como matéria-prima para a obtenção de biomoléculas de valor comercial**. In: Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria-Vol. 4. Blucher Open Access, 2017. p. 283-314.

SHI, J., SHI, S. Q., BARNES, H. M., PITTMAN, C. U., Jr. **A chemical process for preparing cellulose fibers hierarchically from kenaf bast fibers**. Bioresource, v.6, p.879–890, 2011.

SILVA, J. **REOLOGIA E MICROESTRUTURA NA ESTABILIZAÇÃO DE SUSPENSÕES CONCENTRADAS DE Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**. Belo Horizonte: Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - UFOP - CETEC - UEMG, 2003.

SILVA, R. *et al.* **Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos**. Química Nova, v. 32, p. 661-671, 2009.

SILVERIO, H. A.; FLAUZINO NETO, W. P.; DANTAS, N. O.; PASQUINI, D. **Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from corncob for application as reinforcing agent in nanocomposites**, Industrial Crops and Products, v.44, p.427– 436, 2013.

SILVESTRE, M. O. **Estudo do estado de dispersão das partículas em polpa de minério sulfetado de chumbo-zinco**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SISINNO, C. L. S. *et al.* **Nanociência e nanotecnologia: considerações gerais para o setor mineral**. 2024.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos**. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves (Eds.). Tratamento de Minérios. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. **A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos**. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 22, n. 1/2, p. 27-64, 2001.

TONET, M.D.; LEONEL, A. A. **Nanociência e Nanotecnologia: uma revisão bibliográfica acerca das contribuições e desafios para o ensino de Física**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 36, n. 2, p. 431-456, 2019.

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. de. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. 234 p.

## APÊNDICE

Os resultados completos do modelo e a análise de variância em relação à velocidade de sedimentação estão apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 - Sumário do Modelo

### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,0070946	99,95%	99,53%	*	*	*	-123,89

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2025).

Tabela 6 - Análise de Variância completa

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	16	0,190974	99,95%	0,190974	0,011936	237,14	0,004
Linear	4	0,091546	47,91%	0,091546	0,022887	454,70	0,002
nc	1	0,009361	4,90%	0,009361	0,009361	185,97	0,005
pH	1	0,069564	36,41%	0,069564	0,069564	1382,07	0,001
min	1	0,005439	2,85%	0,005439	0,005439	108,06	0,009
rpm	1	0,007183	3,76%	0,007183	0,007183	142,70	0,007
Interações de 2 fatores	6	0,062479	32,70%	0,062479	0,010413	206,89	0,005
nc*pH	1	0,004727	2,47%	0,004727	0,004727	93,91	0,010
nc*min	1	0,006521	3,41%	0,006521	0,006521	129,55	0,008
nc*rpm	1	0,003108	1,63%	0,003108	0,003108	61,75	0,016
pH*min	1	0,016066	8,41%	0,016066	0,016066	319,18	0,003
pH*rpm	1	0,018428	9,64%	0,018428	0,018428	366,12	0,003
min*rpm	1	0,013631	7,13%	0,013631	0,013631	270,81	0,004
Interações de 3 fatores	4	0,029131	15,25%	0,029131	0,007283	144,69	0,007
nc*pH*min	1	0,011827	6,19%	0,011827	0,011827	234,96	0,004
nc*pH*rpm	1	0,007014	3,67%	0,007014	0,007014	139,35	0,007
nc*min*rpm	1	0,007183	3,76%	0,007183	0,007183	142,70	0,007
pH*min*rpm	1	0,003108	1,63%	0,003108	0,003108	61,75	0,016
Interações de 4 fatores	1	0,004456	2,33%	0,004456	0,004456	88,52	0,011
nc*pH*min*rpm	1	0,004456	2,33%	0,004456	0,004456	88,52	0,011
Curvatura	1	0,003362	1,76%	0,003362	0,003362	66,79	0,015
Erro	2	0,000101	0,05%	0,000101	0,000050		
Total	18	0,191075	100,00%				

Fonte: PRÓPRIA AUTORA (2025).