



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Graduação em Engenharia de Minas



MAURA MIRANDA DE OLIVEIRA

**IMPACTOS DA RECIRCULAÇÃO DE POLPA NA EFICIÊNCIA DE
ESPESSADORES EM PLANTAS DE MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO EM
ARIPUANÃ - MT**

Ouro Preto - MG
2026

MAURA MIRANDA DE OLIVEIRA

IMPACTOS DA RECIRCULAÇÃO DE POLPA NA EFICIÊNCIA DE
ESPESSADORES EM PLANTAS DE MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO EM
ARIPUANÃ - MT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

Ouro Preto - MG
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O482i Oliveira, Maura Miranda de.
Impactos da recirculação de polpa na eficiência de espessadores em plantas de mineração [manuscrito]: estudo de caso em Aripuanã - MT. / Maura Miranda de Oliveira. - 2026.
83 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Flotação. 3. Separação sólido-líquido - Espessamento. 4. Reologia - Minas e mineração - Polpa. I. Alves, Vladimir Kronemberger. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.752

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Maura Miranda de Oliveira

Impactos da recirculação de polpa na eficiência de espessadores em plantas de mineração: estudo de caso em Aripuanã - MT

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Aprovada em 04 de (março) de 2026

Membros da banca

[Doutor] - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (UFOP)
[Engenheiro de Minas] - Fernando Barros Puperi - (UFOP)
[Engenheiro de Minas] - Luis Fillipe Nunes Magalhaes - (NEXA)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/04/2026



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**, em 07/04/2026, às 14:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1085428** e o código CRC **91F0BFD8**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para superar os desafios e chegar até aqui.

À minha família, pelo amor, apoio e incentivo constantes ao longo de toda a minha trajetória. Em especial, aos meus pais Cláudia e Eudes, que sempre foram meu maior exemplo e base, acreditando em mim e tornando possível a realização deste sonho.

A José Roberto, pelo companheirismo, paciência e apoio nos momentos mais desafiadores dessa caminhada.

Aos amigos da Minas, em especial Arjunior, Alexandre, Isabela, Leonardo, Marcelo, Matheus e Reydner. Gratidão por tudo que vivemos juntos.

Às equipes de Processos e de Tecnologia da Nexa Resources, pela oportunidade de aprendizado, pela troca de conhecimentos e pela receptividade ao longo desses 1 ano e 6 meses. A vivência prática foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação profissional.

Ao meu orientador Vladimir e ao meu mentor Javier, pela dedicação, orientação e confiança, fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, meu sincero agradecimento.

RESUMO

A recirculação de polpa em espessadores pode alterar as condições de alimentação e influenciar o desempenho do processo de sedimentação. Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da recirculação no comportamento de sedimentação do concentrado de chumbo de uma planta polimetálica. Foram realizados ensaios de floculação e sedimentação em batelada sob duas condições de alimentação, com 27,58% e 46,87% de sólidos em peso, representando respectivamente a condição base e a condição com recirculação simulada. Determinaram-se a velocidade média no regime linear de sedimentação, o tempo crítico pelo método gráfico de Talmadge e Fitch e a razão de espessamento. A condição com menor teor de sólidos apresentou maior velocidade média e menor tempo crítico, enquanto a condição com maior concentração apresentou menor razão de espessamento. A divergência entre os parâmetros evidencia que a avaliação do desempenho depende do critério adotado e está diretamente relacionada ao teor de sólidos e às propriedades reológicas da suspensão. Como contribuição, o estudo demonstra experimentalmente a influência da concentração de sólidos sobre diferentes indicadores de desempenho do espessamento e reforça a necessidade de abordagem integrada para análise operacional de espessadores industriais.

Palavras-chave: Espessamento. Sedimentação em batelada. Recirculação de polpa. Razão de espessamento. Reologia de polpas minerais.

ABSTRACT

Slurry recirculation in thickeners may alter feed conditions and significantly affect the sedimentation performance of mineral suspensions. This study evaluates the impact of recirculation on the settling behavior of a lead concentrate from a polymetallic processing plant. Batch flocculation and sedimentation tests were conducted under two feed conditions, with 27.58% and 46.87% solids by mass, representing the base condition and the simulated recirculation condition, respectively. The average settling velocity in the linear regime, the critical time determined by the Talmadge and Fitch graphical method, and the thickening ratio were determined. The lower solids condition showed higher settling velocity and shorter critical time, whereas the higher solids condition presented a lower thickening ratio. The divergence among these indicators demonstrates that thickener performance assessment depends on the selected criterion and is strongly influenced by solids concentration and slurry rheological properties. As a contribution, this study experimentally demonstrates the influence of solids concentration on different thickening performance indicators and highlights the need for an integrated approach in the operational evaluation of industrial thickeners.

Keywords: Thickening. Batch sedimentation. Slurry recirculation. Thickening ratio. Mineral slurry rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zonas de sedimentação em um espessador.....	23
Figura 2 – Ensaio de espessamento.	24
Figura 3 - Determinação gráfica do tempo crítico (t_c) pelo método de Talmadge & Fitch.....	43
Figura 4 - Agitador mecânico digital utilizado na homogeneização da polpa.	52
Figura 5 - Determinação da densidade da polpa em proveta graduada de 1000 mL. .	53
Figura 6 - Dosagem volumétrica da solução de floculante utilizando seringa graduada.	55
Figura 7 - Ensaio de sedimentação em batelada evidenciando a interface sólido-líquido ao final do teste.....	57
Figura 8- Altura da interface sólido-líquido (H) em função do tempo (t) para a sedimentação base	66
Figura 9 - Curvas de sedimentação do concentrado de chumbo (27,6% sólidos) para diferentes dosagens de floculante.....	66
Figura 10 - Determinação gráfica do tempo crítico (t_c) para a condição base (6 g/t) ..	69
Figura 11 - Altura da interface sólido-líquido (H) em função do tempo (t) para a condição com recirculação (46,87% de sólidos)	71
Figura 12 - Curvas de sedimentação do concentrado de chumbo sob condição de recirculação (46,87% de sólidos)	72
Figura 13 - Determinação gráfica do tempo crítico (t_c) para a condição com recirculação (6 g/t).....	74
Figura 14 – Gráfico r.e. x % de sólidos.....	78
Figura 15 - Relação experimental entre razão de espessamento (R) e % de sólidos para o concentrado de chumbo avaliado.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de sedimentação em segundos até a altura de 200mL para diferentes dosagens de floculante.....	64
Tabela 2 - Velocidade média de sedimentação no regime linear	67
Tabela 3 - Velocidade média de sedimentação no regime linear sob condição de recirculação	73
Tabela 4 - Comparação dos parâmetros cinéticos e estruturais para a dosagem de 6 g/t	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS ...	16
3.2	ESPESSAMENTO DE POLPAS MINERAIS.....	18
3.3	FUNDAMENTOS DA SEDIMENTAÇÃO APLICADOS AO ESPESSAMENTO	21
3.4	FUNDAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO ESPESSAMENTO	24
	3.4.1 Propriedades físicas e estruturais da suspensão.....	25
	3.4.2 Propriedades reológicas e implicações no espessamento	27
3.5	FLOCULAÇÃO APLICADA AO ESPESSAMENTO DE POLPAS MINERAIS	29
	3.5.1 Floculação, cinética de sedimentação e estrutura do leito consolidado.....	30
	3.5.2 Propriedades reológicas e implicações no espessamento	32
3.6	ENSAIOS LABORATORIAIS APLICADOS AO ESPESSAMENTO	33
3.7	TIPOS DE ESPESSADORES E CONFIGURAÇÕES INDUSTRIAIS	37
	3.7.1 Tipologias de espessadores e fundamentos técnicos	38
	3.7.2 Sensibilidade operacional e integração ao circuito de processo	40
3.8	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESPESSADORES.....	41
3.9	RECIRCULAÇÃO DE POLPA, EFICIÊNCIA OPERACIONAL E IMPLICAÇÕES NO DIMENSIONAMENTO	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS	49

4.1 MATERIAIS	49
4.1.1 Caracterização da amostra	49
4.1.2 Reagentes	50
4.1.3 Equipamentos.....	51
4.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DA POLPA	51
4.3 DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM DE SÓLIDOS.....	54
4.4 ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO.....	54
4.5 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO EM BATELADA	56
4.6 SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA RECIRCULAÇÃO.....	57
4.7 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE SEDIMENTAÇÃO	58
4.8 DETERMINAÇÃO DO TEMPO CRÍTICO PELO MÉTODO GRÁFICO.....	59
4.9 DETERMINAÇÃO DA RAZÃO DE ESPESSAMENTO	60
4.10 LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DA POLPA DE CONCENTRADO DE CHUMBO	63
5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO.....	63
5.3 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO - CONDIÇÃO BASE	65
5.3.1 Identificação do regime linear e determinação da velocidade média	67
5.3.2 Determinação do tempo crítico pelo método gráfico.....	68
5.3.3 Determinação da razão de espessamento – Condição base.....	69
5.3.4 Síntese técnica da condição base.....	70
5.4 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO _ RECIRCULAÇÃO DE POLPA	71
5.4.1 Identificação do regime linear e determinação da velocidade média	72
5.4.2 Determinação do tempo crítico pelo método gráfico.....	73

5.4.3	<i>Determinação da razão de espessamento – Condição com recirculação....</i>	74
5.4.4	<i>Síntese técnica da condição com recirculação.....</i>	75
5.5	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SEDIMENTAÇÃO BASE E CONDIÇÃO DE RECIRCULAÇÃO	76
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

A mineração constitui uma das atividades industriais mais relevantes no contexto econômico mundial, sendo responsável pelo fornecimento de matérias-primas essenciais para praticamente todos os setores da cadeia produtiva. As operações mineiras envolvem, de forma integrada, as etapas de lavra e beneficiamento do minério extraído, conhecido como *run-of-mine* (ROM), com o objetivo de concentrar os minerais de interesse econômico e adequar os produtos e adequar os rejeitos para as etapas subsequentes da cadeia produtiva.

No beneficiamento mineral, as operações de separação sólido-líquido ocupam posição estratégica, uma vez que influenciam diretamente o desempenho metalúrgico, o consumo de água, os custos operacionais e os aspectos ambientais das plantas de processamento. Entre essas operações, o espessamento é amplamente empregado para promover o adensamento de polpas minerais, a recuperação de água de processo e o condicionamento de concentrados e rejeitos para transporte, disposição ou etapas adicionais de desaguamento.

Nos últimos anos, em função de eventos de grande impacto associados ao rompimento de barragens de rejeitos no estado de Minas Gerais, a indústria mineral brasileira intensificou a revisão de práticas operacionais e o desenvolvimento de soluções tecnológicas voltadas à melhoria da gestão de rejeitos e ao aumento da eficiência hídrica. Nesse cenário, o desempenho dos sistemas de espessamento passou a assumir importância ainda mais significativa, especialmente em plantas que operam com múltiplos concentrados e elevado grau de interdependência entre circuitos.

O espessamento baseia-se na sedimentação gravitacional de partículas sólidas suspensas em um fluido, no beneficiamento mineral a água e pode ser considerado um intermédio entre a decantação simples e a filtração. Embora sua configuração construtiva seja relativamente simples, seu desempenho é governado por fenômenos complexos, envolvendo sedimentação impedida, compressão do leito, floculação, fenômenos físico-químicos das interfaces, e interações hidrodinâmicas dependentes

da concentração e da reologia da suspensão. Em ambiente industrial, essas variáveis são dinâmicas e respondem a flutuações de vazão, variações granulométricas e alterações na dosagem de reagentes.

A planta de beneficiamento que constitui o campo deste estudo está localizada no município de Aripuanã, no estado do Mato Grosso, e processa minérios polimetálicos de cobre, chumbo e zinco. Dentre os equipamentos empregados no circuito de concentrados, destaca-se o espessador de concentrado de chumbo, projetado para operar com alimentação próxima a 30% de sólidos e vazão média da ordem de 33 m³/h.

Durante a operação industrial, observa-se a ocorrência recorrente de recirculação de polpa no circuito do espessador de chumbo. Embora o controle de densidade do *underflow* possa ser realizado por meio de ajustes de vazão de transferência, dosagem de floculante e controle do leito de sólidos, a recirculação é empregada na prática operacional, especialmente em condições transitórias e durante a estabilização do processo.

A recirculação consiste no retorno de parte do *underflow* do espessador, modificando o balanço de massa e água do circuito e alterando temporariamente as características da suspensão alimentada ao espessador. Tal condição pode resultar em aumento da concentração efetiva de sólidos, alteração na fração de partículas finas e mudanças nas propriedades reológicas da polpa, com possíveis impactos sobre a cinética de sedimentação e sobre a estrutura do leito consolidado.

Ainda que não represente a condição ideal de operação, a recirculação constitui realidade observada no processo estudado e impõe ao espessador condições distintas daquelas originalmente previstas em regime estável. Nesse contexto, torna-se tecnicamente relevante investigar como essa prática influencia o comportamento cinético da suspensão e a transição entre os regimes de sedimentação e compressão.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os impactos da recirculação de polpa no comportamento cinético e estrutural do espessamento do concentrado de chumbo em planta de beneficiamento mineral polimetálica, por meio de ensaios laboratoriais de sedimentação em batelada e da determinação do tempo crítico pelo método gráfico de Talmadge e Fitch, utilizando a razão de espessamento como parâmetro comparativo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os fundamentos teóricos da separação sólido-líquido aplicados ao espessamento de polpas minerais, com ênfase nos regimes de sedimentação impedida, compressão do leito e floculação.
- Caracterizar a polpa de concentrado de chumbo em condição base e sob condição simulada de recirculação, determinando densidade e percentagem de sólidos.
- Realizar ensaios laboratoriais de floculação e sedimentação em batelada, visando determinar a velocidade média no regime linear de sedimentação e o tempo crítico associado à transição para compressão.
- Simular, em escala laboratorial, a condição de recirculação observada na operação industrial, mantendo controle das variáveis experimentais.
- Determinar a razão de espessamento (R) para as diferentes condições avaliadas, com base no tempo crítico e na carga inicial de sólidos.
- Comparar os valores de razão de espessamento obtidos para a condição base e para a condição com recirculação, interpretando as implicações sobre o comportamento do sistema de espessamento.
- Contribuir para o entendimento técnico dos efeitos da recirculação de polpa sobre a cinética de sedimentação e a resposta estrutural da suspensão em espessadores industriais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A compreensão dos fenômenos envolvidos no espessamento de polpas minerais exige a análise integrada dos fundamentos da separação sólido-líquido, dos mecanismos de sedimentação de suspensões concentradas, dos processos de floculação e dos critérios de dimensionamento de espessadores industriais.

Em sistemas minerais, tais fenômenos não ocorrem de forma isolada, mas interagem continuamente sob influência das características físico-químicas da polpa e das condições operacionais adotadas. A variabilidade granulométrica, mineralógica e reológica das suspensões torna o comportamento do espessamento particularmente sensível às alterações no teor de sólidos e nas condições hidrodinâmicas.

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam a análise desenvolvida neste trabalho, abordando desde os princípios gerais da separação sólido-líquido até os métodos clássicos de dimensionamento de espessadores, com ênfase na influência da recirculação de polpa sobre o comportamento da sedimentação e sobre os parâmetros de projeto.

3.1 SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS

A separação sólido-líquido constitui uma das operações estruturantes do tratamento de minérios, não apenas pela sua recorrência nos fluxogramas industriais, mas pelo impacto sistêmico que exerce sobre o desempenho global da planta. Trata-se de uma operação que transcende a simples separação física entre fases, assumindo papel estratégico no equilíbrio entre eficiência metalúrgica, estabilidade operacional e sustentabilidade hídrica.

No contexto do beneficiamento mineral, a polpa representa um sistema multifásico complexo, no qual partículas sólidas de diferentes tamanhos, formas e densidades encontram-se suspensas em um meio líquido, geralmente água de processo. Conforme discutido por Luz e Lins (2010), o comportamento dessa suspensão não pode ser analisado isoladamente, pois sua resposta à sedimentação ou ao desaguamento influencia diretamente etapas subsequentes, como flotação, transporte

hidráulico e disposição de rejeitos. Assim, qualquer variação na eficiência da separação sólido-líquido repercute ao longo de todo o circuito.

Concha (2014) e Svarovsky (2001) enfatizam que as polpas minerais apresentam características que diferem substancialmente de suspensões de composição controlada. A presença de ampla distribuição granulométrica, partículas de geometria irregular e elevada fração de finos confere ao sistema comportamento hidrodinâmico não trivial. A sedimentação deixa de ser fenômeno puramente individual, passando a ser governada por interações coletivas entre partículas e efeitos reológicos associados à concentração de sólidos.

Do ponto de vista físico, os principais mecanismos envolvidos na separação sólido-líquido incluem sedimentação gravitacional, filtração por meio poroso e separação centrífuga. Entretanto, na indústria mineral, a sedimentação gravitacional assume protagonismo, sobretudo em operações de grande escala. França e Massarani (2010) destacam que a simplicidade construtiva e o baixo consumo energético relativo tornam a sedimentação particularmente adequada para o tratamento de elevadas vazões de polpa, característica típica de plantas de mineração.

A relevância dessa operação não se restringe ao desempenho produtivo. Dahlstrom (2011) argumenta que a eficiência dos sistemas de separação sólido-líquido está diretamente relacionada à sustentabilidade das operações minerais, uma vez que a recuperação de água reduz a dependência de captação externa e minimiza o volume de rejeitos com alto teor de umidade. Em um cenário de crescente restrição ambiental, a otimização do desaguamento deixa de ser apenas questão técnica e passa a representar condicionante estratégica para a viabilidade do empreendimento.

Em plantas polimetálicas, essa complexidade é ampliada pela coexistência de fluxos com características mineralógicas distintas. Cada fluxo pode apresentar comportamento específico de sedimentação e floculação, exigindo ajustes operacionais diferenciados. Nesse contexto, a separação sólido-líquido não é apenas etapa do fluxograma, mas elemento de integração e estabilidade do sistema produtivo.

3.2 ESPESSAMENTO DE POLPAS MINERAIS

O espessamento de polpas minerais constitui a principal aplicação industrial da sedimentação gravitacional no tratamento de minérios, desempenhando papel central no equilíbrio entre eficiência de separação, recuperação hídrica e estabilidade operacional do circuito. Diferentemente de sistemas simples de decantação, o espessador industrial opera de forma contínua, submetido a variações dinâmicas de vazão, concentração de sólidos e características físico-químicas da suspensão.

Segundo Concha (2014), o espessamento deve ser compreendido como processo multifásico governado por interações simultâneas entre fenômenos hidrodinâmicos, mecânicos e reológicos. A sedimentação não ocorre de maneira homogênea ao longo do equipamento, mas organiza-se em regiões distintas, cuja estabilidade depende do equilíbrio entre alimentação, sedimentação e descarga.

Do ponto de vista físico, o funcionamento do espessador envolve a alimentação contínua da polpa em um poço central (feedwell), onde ocorre a dissipação de energia cinética e a mistura com o floculante. Essa dissipação é fundamental para reduzir a intensidade de turbulências na entrada do equipamento, evitando a quebra de flocos e a perturbação das zonas de sedimentação. Dessa forma, o feedwell desempenha papel essencial na criação de condições hidrodinâmicas adequadas para o início do processo, favorecendo a formação e a estabilidade dos flocos.

A qualidade dessa etapa é determinante para o desempenho subsequente do equipamento, pois condiciona tanto a eficiência da agregação quanto o padrão de sedimentação ao longo do tanque. Conforme discutido por Svarovsky (2001), a hidrodinâmica do feedwell influencia diretamente a distribuição radial de sólidos e o padrão de escoamento no interior do espessador.

Após a alimentação, estabelece-se uma organização vertical do sistema, caracterizada por zonas com comportamentos físicos distintos. Na região superior predomina a clarificação, onde a concentração de sólidos é reduzida e o líquido clarificado é coletado por transbordo na calha de *overflow*. Abaixo dessa zona desenvolve-se a região de sedimentação impedida, na qual as partículas sedimentam de forma coletiva, interagindo entre si e deslocando o fluido ascendente. Na porção

inferior forma-se o leito de sólidos, submetido a compressão progressiva e drenagem do fluido intersticial.

Bürger (2000) enfatiza que a coexistência desses regimes confere ao espessamento natureza altamente sensível a variações nas condições de alimentação. O deslocamento da interface entre sedimentação impedida e compressão pode resultar em alterações significativas na densidade do *underflow* e na qualidade do *overflow*. Assim, o espessador deve ser interpretado como sistema de equilíbrio dinâmico, no qual pequenas perturbações podem gerar respostas amplificadas.

Chaves (2013) destaca que o espessamento representa uma solução técnica intermediária entre a decantação simples e a filtração. A decantação, embora seja um processo de menor complexidade operacional e baixo consumo energético, apresenta limitações associadas à baixa eficiência na remoção de partículas finas e à necessidade de grandes áreas para atingir níveis adequados de clarificação, além de maior sensibilidade a variações na alimentação. Por outro lado, a filtração permite a obtenção de maiores concentrações finais de sólidos, porém com maior consumo energético e restrições operacionais para grandes vazões. Nesse contexto, o espessamento se destaca por aliar elevada capacidade de processamento, menor exigência energética em comparação à filtração e maior robustez operacional, sendo particularmente adequado para plantas de médio e grande porte.

Entretanto, essa robustez não implica ausência de limitações físicas. Em espessadores operando com elevadas concentrações de sólidos, a compressão do leito torna-se fator limitante do processo. A taxa de drenagem passa a depender da permeabilidade do leito consolidado, que é fortemente influenciada pela granulometria, pela presença de finos e pela estrutura dos flocos formados. Concha (2014) ressalta que a resistência à compressão do leito pode governar a capacidade final do equipamento, especialmente em aplicações envolvendo rejeitos finos.

Nesse contexto, o torque do rake assume papel fundamental como indicador operacional, uma vez que reflete diretamente a resistência mecânica do leito ao movimento do sistema de arraste. O aumento do torque está associado ao

adensamento excessivo e à redução da mobilidade do material no fundo do espessador, podendo indicar operação próxima aos limites do equipamento. Assim, o monitoramento do torque torna-se essencial para a prevenção de sobrecargas mecânicas e para o controle da estabilidade operacional.

Além dos fenômenos internos, o espessamento exerce influência decisiva sobre o balanço hídrico da planta. Dahlstrom (2011) argumenta que a eficiência de recuperação de água nos espessadores determina a necessidade de captação externa e o volume de rejeitos com alto teor de umidade. Assim, o desempenho do espessador possui implicações operacionais, econômicas e ambientais.

Em plantas polimetálicas, a complexidade do espessamento é ampliada pela coexistência de correntes com características mineralógicas distintas. Diferentes minerais apresentam densidades, formas e comportamentos de superfície variados, resultando em respostas distintas à floculação e à sedimentação. A presença de múltiplos espessadores dedicados a correntes específicas permite maior controle operacional, mas aumenta a sensibilidade do sistema a variações de processo.

Outro aspecto relevante refere-se à integração do espessador ao circuito global. O teor de sólidos do *underflow* influencia diretamente operações subsequentes, como transporte hidráulico, filtração e disposição de rejeitos. Da mesma forma, a qualidade do *overflow* afeta a eficiência de etapas a montante, como a flotação. Portanto, o espessamento não deve ser analisado como operação isolada, mas como elemento estruturante da estabilidade do circuito mineral.

Quando submetido a condições de recirculação de polpa, o espessador passa a operar sob regime ainda mais complexo. A elevação progressiva do teor de sólidos, a ampliação da fração de finos e as alterações reológicas da suspensão modificam o equilíbrio interno entre sedimentação e compressão. Nesses casos, parâmetros originalmente considerados no projeto podem deixar de representar adequadamente a condição real de operação, impactando tanto a eficiência operacional quanto os critérios de dimensionamento.

Dessa forma, o entendimento aprofundado do espessamento de polpas minerais constitui base indispensável para a análise crítica do desempenho de espessadores

industriais e para a avaliação da influência de variáveis operacionais, como a recirculação de polpa, sobre sua eficiência e dimensionamento.

3.3 FUNDAMENTOS DA SEDIMENTAÇÃO APLICADOS AO ESPESSAMENTO

A sedimentação constitui o fenômeno físico fundamental que governa o funcionamento dos espessadores empregados no tratamento de minérios.

Em suspensões suficientemente diluídas, as partículas encontram-se afastadas umas das outras, permitindo que a sedimentação ocorra de forma aproximadamente independente. Nesse regime, o equilíbrio entre força gravitacional, empuxo e arrasto viscoso define a velocidade terminal de queda. Sob hipóteses ideais de escoamento laminar e partículas esféricas isoladas, a Lei de Stokes estabelece que essa velocidade é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula e à diferença de densidade entre sólido e fluido, sendo inversamente proporcional à viscosidade do meio. Contudo, como enfatiza Svarovsky (2001), tais hipóteses raramente são satisfeitas em polpas minerais reais, nas quais predominam partículas irregulares, ampla distribuição granulométrica e presença significativa de finos.

À medida que a concentração volumétrica de sólidos aumenta, o deslocamento individual das partículas passa a ser influenciado pelo campo de escoamento induzido pelas partículas vizinhas. Surge, então, o regime de sedimentação impedida, no qual o meio particulado pode ser tratado, do ponto de vista macroscópico, como contínuo. Nesse regime, a velocidade de sedimentação deixa de depender exclusivamente das propriedades individuais das partículas e passa a ser função da concentração local de sólidos.

A formulação teórica clássica para esse comportamento foi proposta por Kynch, cuja abordagem parte de um balanço de massa unidimensional aplicado a suspensões concentradas. Segundo essa teoria, a velocidade de sedimentação é função apenas da fração volumétrica de sólidos, hipótese que conduz a uma equação de conservação não linear capaz de descrever a propagação de descontinuidades de concentração ao longo de uma coluna de sedimentação. Concha (2014) destaca que essa formulação

constitui o fundamento conceitual para interpretação de ensaios de sedimentação em batelada e para desenvolvimento de métodos clássicos aplicados ao projeto de espessadores.

Bürger (2000) amplia essa abordagem ao integrar o fenômeno de sedimentação com a consolidação do leito, tratando o processo como sistema acoplado entre transporte de sólidos e evolução de tensões internas. Nesse modelo, a sedimentação é descrita por uma equação hiperbólica governada pela função velocidade–concentração, enquanto a consolidação é incorporada por meio de uma lei constitutiva que relaciona tensão efetiva e concentração volumétrica. Essa integração permite representar matematicamente a transição entre sedimentação impedida e compressão do leito, fenômeno observado experimentalmente como mudança na inclinação da curva altura versus tempo.

No interior de um espessador industrial contínuo, o regime de sedimentação impedida predomina na região intermediária do equipamento. A taxa de transporte de sólidos resulta da diferença entre a velocidade descendente do meio particulado e a velocidade ascensional do fluido clarificado. O equilíbrio entre essas velocidades determina a estabilidade da interface sólido-líquido e a eficiência da clarificação. Pequenas variações na concentração de alimentação podem modificar a função velocidade–concentração e deslocar essa interface, alterando o desempenho global do equipamento.

Com o aumento progressivo da concentração, as partículas entram em contato contínuo e passam a transmitir tensões através de uma rede estrutural consolidada. Nesse estágio, inicia-se o regime de compressão do leito. A sedimentação deixa de ser predominantemente hidrodinâmica e passa a depender da drenagem do fluido intersticial através de um meio poroso deformável. A permeabilidade do leito, fortemente influenciada pela granulometria e pela fração de finos, torna-se parâmetro determinante da taxa de adensamento.

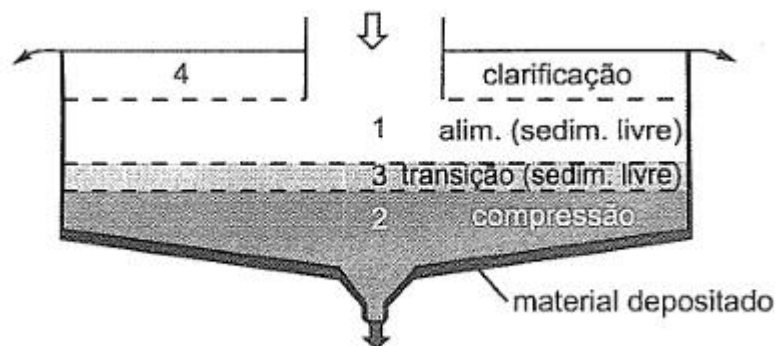
Concha (2014) ressalta que, em concentrações elevadas, a resistência à compressão pode constituir o principal limitante da capacidade de processamento do espessador. Bürger (2000) demonstra que a evolução temporal da concentração

nesse regime depende da relação constitutiva entre tensão efetiva e fração volumétrica de sólidos, evidenciando o caráter mecânico da consolidação. Em sistemas contendo elevada fração de partículas finas, a redução da permeabilidade intensifica o controle exercido pela compressão sobre o desempenho do equipamento, podendo limitar a densidade final do *underflow*.

A coexistência desses regimes, sedimentação livre, sedimentação impedida e compressão, confere ao espessamento caráter altamente não linear. A resposta do sistema não é proporcional às variações de alimentação, uma vez que pequenas alterações na concentração ou na estrutura da polpa podem modificar significativamente a posição das zonas internas do espessador. Essa sensibilidade explica a importância da correta caracterização da função velocidade–concentração e da resistência à compressão para interpretação dos resultados experimentais.

O espessador contínuo pode ser dividido em zonas hidrodinâmicas distintas, conforme ilustrado na Figura 1, nas quais predominam os regimes de clarificação, sedimentação impedida e compressão do leito.

Figura 1 – Zonas de sedimentação em um espessador.

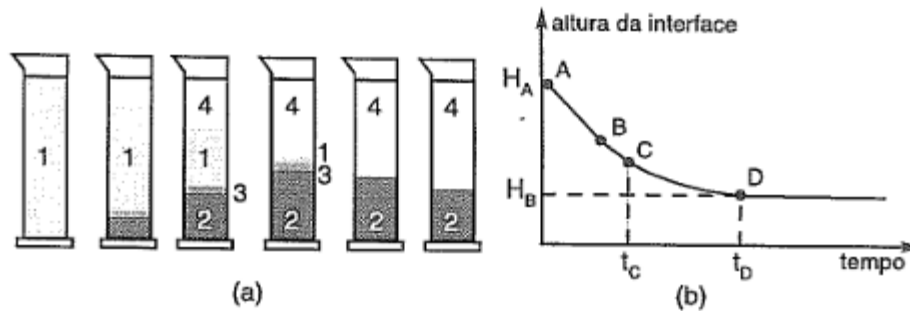


Fonte: Chaves (2004).

A análise de ensaios de sedimentação em batelada fundamenta-se justamente na identificação desses regimes ao longo da curva altura versus tempo. O trecho inicial aproximadamente linear corresponde à sedimentação impedida, cuja inclinação representa a velocidade característica da suspensão para determinada concentração inicial. A redução progressiva da inclinação indica o início da consolidação, ponto crítico para aplicação de métodos clássicos de análise cinética.

A interpretação do ensaio de sedimentação em batelada pode ser representada conforme ilustrado na Figura 2, na qual se observam as diferentes fases de evolução da interface sólido-líquido ao longo do tempo.

Figura 2 – Ensaio de espessamento.



Fonte: Chaves (2004).

Sob perspectiva de projeto e análise operacional, a compreensão desses fundamentos permite estabelecer a conexão entre fenômenos observados em escala laboratorial e o comportamento de espessadores industriais. Entretanto, como adverte Bürger (2000), a extrapolação de parâmetros obtidos em batelada requer cautela, pois a função velocidade–concentração e a lei de compressão são sensíveis às propriedades estruturais e reológicas da polpa. Alterações na concentração de finos ou na microestrutura da suspensão podem modificar substancialmente esses parâmetros.

A sedimentação deve, portanto, ser compreendida como processo multifásico governado por equações de conservação acopladas a relações constitutivas que dependem da estrutura do sistema particulado. No contexto deste estudo, que avalia o comportamento do espessamento sob diferentes condições operacionais, a compreensão desses fundamentos fornece a base teórica necessária para interpretar variações nos parâmetros cinéticos observados experimentalmente.

3.4 FUNDAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO ESPESSAMENTO

A caracterização da polpa mineral constitui etapa estruturante para a compreensão dos processos de separação sólido-líquido e, particularmente, do

espessamento industrial.

Em sistemas minerais reais, a polpa não é composta apenas por partículas discretas imersas em água. A presença de finos coloidais, reagentes residuais de flotação, íons dissolvidos e variações de pH contribuem para modificar as forças interparticulares, influenciando a estabilidade da suspensão. Assim, a caracterização da polpa não se limita à medição de propriedades isoladas, mas exige análise integrada das variáveis que governam a sedimentação, a floculação e a compressão do leito.

Conforme discutido por Luz (2010) e Chaves (2013), o desempenho de operações de desaguamento depende diretamente da natureza da polpa alimentada. Qualquer alteração em sua composição ou estrutura interna pode modificar significativamente a cinética de sedimentação, a formação de flocos e a estabilidade do leito consolidado. Essa relação torna a caracterização da polpa elemento central tanto para análise operacional quanto para dimensionamento de espessadores.

3.4.1 Propriedades físicas e estruturais da suspensão

As propriedades físicas da polpa mineral estabelecem a base estrutural sobre a qual os fenômenos de sedimentação se desenvolvem. Entre os parâmetros mais relevantes destacam-se o teor de sólidos, a concentração volumétrica, a distribuição granulométrica e as características geométricas e densitárias das partículas.

O teor de sólidos constitui o parâmetro primário na análise da sedimentação. Pode ser expresso em base mássica ou volumétrica, sendo esta última particularmente relevante do ponto de vista teórico. Nos modelos fundamentados na teoria de Kynch, a fração volumétrica de sólidos representa a variável independente que governa a velocidade de sedimentação. Bürger (2000) demonstra que, em suspensões concentradas, a velocidade de sedimentação não é constante, mas função decrescente da concentração local, refletindo o aumento da resistência interna do meio particulado.

À medida que a concentração volumétrica aumenta, o fluido intersticial passa a

escoar através de uma rede de partículas cada vez mais densa. A interação sólido - sólido torna-se cada vez mais significativa, reduzindo a velocidade relativa entre fases sólida e líquida. Esse comportamento caracteriza a transição do regime de sedimentação livre para o regime de sedimentação impedida, predominante em espessadores industriais.

Além da cinética de sedimentação, o teor de sólidos influencia a formação e a estabilidade das zonas internas do espessador. Concha (2014) destaca que variações na concentração de alimentação podem deslocar verticalmente a interface entre sedimentação impedida e compressão do leito. Esse deslocamento altera simultaneamente o tempo de residência hidráulico e a capacidade de adensamento, podendo resultar em instabilidade operacional.

A distribuição granulométrica complementa esse quadro estrutural. Polpas minerais são tipicamente polidispersas, contendo desde partículas grossas, resultantes da britagem e moagem, até frações ultrafinas geradas por moagem excessiva ou degradação mecânica. A presença de partículas finas exerce efeito desproporcional sobre o comportamento global da suspensão. Svarovsky (2001) observa que partículas finas possuem baixas velocidades de sedimentação individual e elevada tendência à estabilização coloidal, dificultando a clarificação espontânea do líquido.

Do ponto de vista estrutural, partículas finas ocupam os espaços intersticiais entre partículas maiores, reduzindo a permeabilidade do leito formado durante a compressão. Essa redução de permeabilidade diminui a taxa de drenagem do fluido intersticial, tornando a compressão do leito um processo governado não apenas pela gravidade, mas também pela resistência hidráulica interna. Em sistemas com elevada fração de finos, a compressão passa a ser fator limitante do espessamento.

A forma das partículas adiciona outro nível de complexidade. Partículas minerais apresentam morfologias angulosas ou lamelares, em contraste com as hipóteses simplificadas de esfericidade adotadas em modelos clássicos. Chaves (2013) destaca que partículas irregulares apresentam maior coeficiente de arrasto, o que reduz sua velocidade terminal e aumenta a sensibilidade da sedimentação a variações na

viscosidade do meio.

A densidade mineral, por sua vez, determina a força gravitacional atuante sobre cada partícula. Em sistemas polimetálicos, nos quais minerais como chumbo, cobre e zinco coexistem, diferenças de densidade podem resultar em sedimentação diferencial. Concha (2014) observa que tal segregação pode afetar a homogeneidade do leito consolidado, alterando sua estrutura mecânica e sua resposta à compressão.

Assim, as propriedades físicas e estruturais da suspensão não apenas influenciam a velocidade de sedimentação, mas definem a arquitetura interna do sistema particulado, condicionando o comportamento global do espessador.

3.4.2 Propriedades reológicas e implicações no espessamento

À medida que a concentração de sólidos se eleva, a polpa mineral apresenta comportamento reológico não-newtoniano, no qual a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação não é linear e a viscosidade aparente torna-se função da estrutura interna da suspensão. Esse comportamento contrasta com o de fluidos newtonianos, cujo coeficiente de viscosidade é constante, independentemente da taxa de deformação. Em suspensões mineralógicas densas, a presença de interações hidrodinâmicas e de contato entre partículas leva ao desenvolvimento de redes estruturadas capazes de suportar tensões antes do fluxo, caracterizando tensões de escoamento e comportamento viscoplástico das polpas (BOGER, 2009).

O desenvolvimento de tensão de escoamento implica que a suspensão somente flui quando submetida a tensões acima de um limiar crítico. Em espessadores industriais, essa propriedade tem impacto direto sobre a descarga do *underflow*, pois o mecanismo de arraste deve aplicar energia suficiente para superar essa resistência estrutural. Caso contrário, pode ocorrer acúmulo progressivo de sólidos no leito, resultando em instabilidade operacional e flutuações na densidade do *underflow*, especialmente em sistemas com elevada taxa de compressão do leito (CONCHA, 2014).

A viscosidade aparente também influencia a velocidade de sedimentação na região intermediária de espessamento da polpa. Em meios mais viscosos, a

resistência ao movimento das partículas aumenta, reduzindo a taxa de sedimentação coletiva e alterando o padrão de escoamento interno. Nguyen *et al.* (2014) demonstram, por meio de modelagens que acoplam balanço populacional e dinâmica dos fluidos computacional, que a reologia da polpa afeta tanto a formação de zonas de recirculação quanto a distribuição radial de sólidos no interior do espessador, contribuindo para perfis não uniformes de concentração e velocidades locais de sedimentação.

Importante também destacar que a reologia da polpa é função não apenas da concentração de sólidos, mas também da microestrutura dos agregados sólidos existentes no sistema. A formação de flocos por meio da adição de reagentes flocculantes altera significativamente a estrutura interna da suspensão, modificando simultaneamente a distribuição de tamanhos de partículas e a conectividade entre elas. Essa alteração estrutural influencia tanto a velocidade inicial de sedimentação quanto a resistência mecânica do leito consolidado. Zhang *et al.* (2023) evidenciaram que diferentes dosagens de flocculante impactam diretamente a velocidade de assentamento e a densidade dos flocos formados. Os autores observaram que, embora o aumento da dosagem de flocculante eleve a velocidade de sedimentação dos flocos, promovendo maior concentração no *underflow*, esse incremento pode resultar em uma estrutura de flocos mais “solta” ou menos densa, o que, paradoxalmente, tende a reduzir a densidade final do leito consolidado e aumentar sua compressibilidade. Esse resultado indica que a relação entre dosagem de flocculante, velocidade de assentamento e propriedades do leito consolidado não é linear, mas depende da interação entre microestrutura dos flocos e composição da polpa.

Sob condições de recirculação de polpa, o efeito reológico torna-se ainda mais pronunciado. O retorno de correntes parcialmente processadas expõe os flocos a múltiplos ciclos de cisalhamento, favorecendo sua fragmentação e alteração da distribuição de tamanhos de agregados. Esse processo modifica tanto a viscosidade aparente quanto a tensão de escoamento da suspensão, resultando em um fluido mais heterogêneo e de comportamento menos previsível durante a sedimentação e a compressão do leito consolidado (GUIMARÃES, 2010; SCHNEIDER *et al.*, 2018).

Adicionalmente, a reologia condiciona a transição entre regimes de sedimentação.

Na fase inicial, conhecida como sedimentação impedida, a velocidade da interface sólido-líquido pode ser considerada aproximadamente constante em determinadas faixas de concentração. À medida que a fase sólida se aproxima de concentrações críticas, a resistência hidráulica interna e a tensão estrutural aumentam, reduzindo a taxa de deslocamento da interface e iniciando o regime de compressão do leito. Essa transição é capturada experimentalmente por parâmetros como o tempo crítico (t_c), que representa o tempo associado ao início do predomínio de forças reológicas sobre forças gravitacionais no leito sedimentado.

Portanto, a reologia da polpa mineral atua como elemento determinante para a interpretação dos ensaios de sedimentação, condicionando não apenas os fenômenos hidrodinâmicos observados, mas também a estabilidade estrutural do leito consolidado. A compreensão das interações entre propriedades reológicas, estrutura de flocos e regime de sedimentação é, assim, indispensável para explicar diferenças observadas nos ensaios laboratoriais e para fundamentar análises de eficiência operacional em condições reais de espessamento.

A análise reológica aqui apresentada refere-se ao comportamento intrínseco da polpa mineral em função de sua concentração e estrutura particulada, independentemente de intervenções químicas externas, as quais serão discutidas na seção 3.6.

3.5 FLOCULAÇÃO APLICADA AO ESPESSAMENTO DE POLPAS MINERAIS

A floculação constitui um dos mecanismos centrais do espessamento de polpas minerais modernas, especialmente em sistemas que apresentam elevada fração de partículas finas, comportamento coloidal estável ou forte dispersão eletrostática. Em condições industriais reais, a sedimentação puramente gravitacional raramente é suficiente para garantir simultaneamente elevada taxa de clarificação do *overflow* e formação eficiente do leito de sólidos. A introdução de floclantes poliméricos modifica deliberadamente a microestrutura da suspensão, alterando sua cinética de sedimentação, sua resposta reológica e sua capacidade de consolidação.

Sob a perspectiva físico-química, a floculação pode ser definida como o processo de agregação induzida de partículas sólidas mediado por macromoléculas solúveis de

alto peso molecular. Diferentemente da coagulação, que atua predominantemente por neutralização de cargas elétricas superficiais, a floculação em sistemas minerais industriais ocorre majoritariamente por ponteamento polimérico, conforme descrito por Svarovsky (2001).

Nesse mecanismo, cadeias poliméricas adsorvem-se parcialmente à superfície das partículas minerais, deixando segmentos livres capazes de interagir com partículas adjacentes. Forma-se, assim, uma rede tridimensional de agregados cujo tamanho hidrodinâmico efetivo supera amplamente o das partículas primárias. A eficiência desse processo depende do equilíbrio entre adsorção superficial, extensão conformacional da cadeia polimérica e frequência de colisões entre partículas.

Em polpas minerais típicas, as superfícies apresentam carga negativa em ampla faixa de pH, favorecendo a utilização de floculantes aniônicos de elevado peso molecular. Chaves (2013) destaca que o peso molecular elevado aumenta o alcance do ponteamento e a probabilidade de formação de agregados extensos. Entretanto, cadeias excessivamente longas ou dosagens elevadas podem gerar estruturas altamente abertas, mecanicamente frágeis e suscetíveis à ruptura sob cisalhamento.

A análise desenvolvida nas seções anteriores descreveu as propriedades intrínsecas da polpa mineral e os fundamentos físicos que governam a sedimentação de suspensões concentradas sob ação gravitacional. Nesta seção, a floculação é abordada como mecanismo de modificação estrutural do sistema particulado, capaz de alterar os parâmetros constitutivos que regem a função velocidade–concentração, a permeabilidade do leito consolidado e a resposta reológica da suspensão. Dessa forma, a floculação não é tratada como fenômeno independente da sedimentação, mas como intervenção físico-química que redefine as condições sob as quais os regimes de sedimentação e compressão se desenvolvem no espessamento industrial.

3.5.1 Floculação, cinética de sedimentação e estrutura do leito consolidado

Do ponto de vista hidrodinâmico, a floculação altera profundamente a relação entre concentração de sólidos e velocidade de sedimentação. O aumento do diâmetro hidrodinâmico efetivo dos agregados modifica a razão entre força gravitacional e força

de arrasto. Contudo, a aplicação direta de modelos baseados em partículas esféricas isoladas torna-se inadequada, uma vez que os flocos apresentam estrutura porosa e incorporam líquido intersticial, reduzindo sua densidade aparente.

Concha (2014) ressalta que, em suspensões floculadas, a velocidade de sedimentação coletiva passa a refletir propriedades emergentes da estrutura agregada. A função velocidade–concentração, fundamental na teoria da sedimentação desenvolvida a partir de Kynch e expandida por Bürger (2000), é diretamente modificada pela qualidade da floculação. Melhor formação de flocos tende a aumentar a inclinação do trecho linear da curva de sedimentação em batelada, enquanto floculação deficiente resulta em menor velocidade característica e maior arraste de partículas finas para o *overflow*.

Entretanto, o efeito da dosagem de floculante não é monotônico. Estudos recentes indicam que há uma faixa ótima de dosagem na qual se maximiza simultaneamente a velocidade de sedimentação e a qualidade do efluente clarificado. Dosagens insuficientes produzem agregação incompleta; dosagens excessivas podem gerar flocos volumosos, porém estruturalmente mais compressíveis e com maior retenção de líquido intersticial.

Esse comportamento tem implicações diretas na etapa subsequente de compressão do leito. A estrutura dos flocos condiciona a permeabilidade do leito consolidado e sua resistência à drenagem. Conforme destacado por Concha (2014), a transição do regime de sedimentação impedida para compressão representa mudança no mecanismo dominante de separação: da sedimentação coletiva para drenagem através de meio poroso estruturado.

Leitos formados por flocos mais compactos tendem a apresentar maior permeabilidade e menor resistência à compressão. Por outro lado, flocos altamente abertos ou frágeis podem colapsar sob carga gravitacional, reduzindo a permeabilidade e tornando a drenagem do fluido intersticial o fator limitante do adensamento. Nesse regime, o processo passa a ser governado pela resistência hidráulica interna e pela tensão efetiva desenvolvida no interior do leito, conforme formalizado por Bürger (2000).

3.5.2 Propriedades reológicas e implicações no espessamento

A interação entre floculação e reologia constitui um dos aspectos mais complexos do espessamento de polpas minerais, especialmente em sistemas concentrados e sujeitos a variações operacionais. Conforme discutido por Boger (2009), suspensões particuladas de elevada concentração volumétrica desenvolvem comportamento reológico não newtoniano decorrente da formação de redes estruturais entre partículas. A introdução de floclulantes modifica essa rede, alterando simultaneamente a distribuição de tensões internas, a viscosidade aparente e a tensão de escoamento do sistema.

Concha (2014) ressalta que, no regime de sedimentação impedida, a interação hidrodinâmica entre partículas é dominante; contudo, à medida que a concentração aumenta, a resistência mecânica da estrutura formada passa a governar o processo. A floculação altera essa estrutura ao promover agregação e modificar o arranjo espacial das partículas. Dessa forma, a função velocidade–concentração que fundamenta a teoria da sedimentação concentrada, conforme formalizada por Bürger (2000), torna-se dependente da qualidade e da estabilidade dos flocos formados.

Bürger (2000) demonstra que o processo de sedimentação-consolidação pode ser descrito como sistema acoplado entre transporte de sólidos e evolução da tensão efetiva no leito. A formação de flocos modifica os parâmetros constitutivos dessa modelagem, uma vez que altera a permeabilidade do meio e a relação entre concentração e tensão interna. Assim, a floculação influencia não apenas a cinética inicial da sedimentação, mas também o regime de compressão subsequente.

Estudos experimentais recentes reforçam essa interpretação. Zhang *et al.* (2023), ao investigarem suspensões de rejeitos floclulados sob diferentes dosagens de floclulante, observaram que o aumento da dosagem elevou inicialmente a velocidade de sedimentação (*zone settling velocity*), porém modificou a estrutura dos flocos formados. Em determinadas faixas de dosagem, os flocos apresentaram maior volume e maior retenção de líquido intersticial, resultando em leitos mais compressíveis e com menor densidade final. Os autores destacam que a relação entre dosagem, velocidade de sedimentação e concentração do *underflow* é governada pela microestrutura do

agregado e por sua resistência ao cisalhamento.

Esse resultado é particularmente relevante quando se considera a recirculação de polpa. O retorno de correntes parcialmente processadas submete os flocos a múltiplos ciclos de cisalhamento hidráulico. Conforme discutido por Boger (2009), tensões de cisalhamento superiores ao limite estrutural do agregado promovem ruptura parcial ou total dos flocos, reduzindo seu tamanho efetivo e alterando a distribuição granulométrica da suspensão.

Guimarães (2010) destaca que sistemas industriais sujeitos à recirculação operam sob regime dinâmico, no qual as características da polpa alimentada ao espessador diferem daquelas originalmente consideradas no projeto. A fragmentação progressiva dos flocos e o aumento da fração de partículas finas livres modificam a viscosidade aparente e podem elevar a tensão de escoamento da polpa concentrada. Schneider *et al.* (2018) reforçam que tais alterações impactam diretamente a estabilidade do leito consolidado e a previsibilidade dos parâmetros cinéticos obtidos em ensaios laboratoriais.

Sob a ótica hidrodinâmica, Nguyen *et al.* (2014) demonstram que a reologia da polpa influencia o padrão de escoamento interno no espessador, afetando a formação de zonas de recirculação e a distribuição espacial de sólidos. Em sistemas com floculação instável ou degradação estrutural, a heterogeneidade reológica pode intensificar esses efeitos, comprometendo a eficiência global do processo.

Concha (2014) enfatiza que, quando as condições reais de operação divergem daquelas consideradas na caracterização inicial da polpa, torna-se necessária reavaliação dos parâmetros cinéticos e estruturais utilizados para análise do desempenho do espessador. Dessa forma, a floculação deve ser entendida como variável dinâmica integrada ao comportamento global do sistema, especialmente em plantas nas quais a recirculação constitui prática operacional recorrente.

3.6 ENSAIOS LABORATORIAIS APLICADOS AO ESPESSAMENTO

Os ensaios laboratoriais constituem a principal ferramenta experimental para a caracterização do comportamento de polpas minerais submetidas a processos de

sedimentação e espessamento. Apesar de realizados em escala reduzida e sob condições controladas, tais ensaios permitem investigar os mecanismos físicos que governam a separação sólido-líquido, fornecendo parâmetros fundamentais para interpretação dos regimes de sedimentação, avaliação da influência de flocculantes e análise do desempenho potencial de sistemas industriais.

Historicamente, o desenvolvimento dos métodos de projeto de tanques de sedimentação esteve diretamente associado à observação experimental de suspensões em repouso. Coe e Clevenger (1916) estabeleceram uma das primeiras abordagens sistemáticas para correlacionar dados obtidos em ensaios de sedimentação em batelada com a capacidade de processamento de tanques industriais, introduzindo o conceito de taxa admissível de transporte de sólidos. Posteriormente, Talmadge e Fitch (1955) consolidaram a utilização gráfica das curvas altura versus tempo como ferramenta de análise, formalizando procedimento que permanece como referência clássica na literatura técnica.

O ensaio de sedimentação em batelada consiste, de forma geral, na introdução de uma polpa com concentração inicial conhecida em uma coluna ou proveta graduada, seguida do monitoramento da posição da interface sólido-líquido ao longo do tempo. Durante o ensaio, a suspensão permanece em repouso, de modo que o deslocamento da interface ocorre exclusivamente sob a ação da gravidade. O resultado primário é a curva que relaciona a altura da interface à variável temporal, cuja forma reflete a evolução dos regimes internos de sedimentação.

A interpretação dessa curva demanda compreensão dos fundamentos teóricos da sedimentação de suspensões concentradas. Conforme discutido por Concha (2014) e Bürger (2000), o trecho inicial aproximadamente linear da curva corresponde predominantemente ao regime de sedimentação impedida, no qual as partículas sedimentam coletivamente e a velocidade da interface pode ser considerada aproximadamente constante dentro de determinada faixa de concentração. Nessa região, a inclinação da curva representa a velocidade média de deslocamento da interface, parâmetro frequentemente utilizado como indicador cinético do comportamento da polpa.

À medida que o ensaio evolui, observa-se redução progressiva da inclinação da curva, indicando alteração no mecanismo físico dominante. Essa transição está associada ao início do regime de compressão do leito, no qual as partículas entram em contato contínuo e a drenagem do fluido intersticial passa a governar o processo. Segundo Concha (2014), nesse estágio a taxa de deslocamento da interface deixa de refletir apenas o movimento coletivo das partículas e passa a depender da resistência mecânica do leito consolidado e de sua permeabilidade.

A identificação do ponto de transição entre os regimes de sedimentação impedida e compressão constitui etapa fundamental na análise dos ensaios laboratoriais. Diversas abordagens são descritas na literatura para estimar esse instante, frequentemente denominado tempo crítico. Entre os procedimentos relatados destacam-se: a análise da variação da inclinação instantânea da curva, a identificação de mudança de concavidade e a construção gráfica de retas representativas dos diferentes regimes.

O método gráfico proposto por Talmadge e Fitch (1955) tornou-se um dos procedimentos mais difundidos para essa finalidade. A abordagem consiste no traçado de uma reta ajustada ao trecho linear inicial da curva e de uma reta tangente à região de transição associada ao início da compressão do leito. O ponto de interseção entre essas duas retas define o tempo crítico da sedimentação. Embora originalmente aplicado ao dimensionamento de espessadores, o procedimento apresenta robustez conceitual e pode ser empregado como ferramenta de análise cinética comparativa, conforme discutido por Chaves (2013) e Concha (2014).

Do ponto de vista matemático, a inclinação do trecho linear corresponde à derivada da altura em relação ao tempo, representando a velocidade média da interface. Essa grandeza pode ser convertida em velocidade de sedimentação em unidades industriais, possibilitando análises comparativas entre diferentes condições experimentais. Entretanto, conforme ressalta Concha (2014), a extrapolação direta desses resultados para escala industrial deve ser realizada com cautela, pois o ensaio em batelada não reproduz integralmente as condições hidrodinâmicas presentes em espessadores contínuos, caracterizados por alimentação constante, escoamento radial e distribuição espacial de concentrações.

A floculação exerce influência decisiva nos ensaios laboratoriais aplicados ao espessamento, especialmente em polpas contendo elevada fração de partículas finas. Conforme descrito por Chaves (2013) e Svarovsky (2001), a adição de floclulantes promove agregação das partículas por mecanismos como ponteamento polimérico, aumentando o diâmetro efetivo dos sólidos e alterando a cinética de sedimentação. A presença de flocos modifica significativamente a forma da curva de sedimentação, afetando tanto a inclinação do trecho linear quanto a posição do ponto de transição para compressão.

A condução adequada dos ensaios de floculação requer controle rigoroso de variáveis como tipo de floclulante, dosagem, tempo de condicionamento e intensidade de cisalhamento. Segundo Chaves (2013), energia de mistura insuficiente pode resultar em dispersão incompleta do reagente, enquanto cisalhamento excessivo pode promover ruptura dos flocos formados, alterando a função velocidade-concentração que governa a sedimentação impedida. Dessa forma, a reprodutibilidade dos ensaios depende da padronização dos procedimentos experimentais.

Além da velocidade de sedimentação e do tempo crítico, os ensaios laboratoriais permitem estimar parâmetros adicionais relevantes, como a concentração final do leito sedimentado e a evolução da compactação ao longo do tempo. Esses parâmetros fornecem subsídios para análise comparativa do desempenho de diferentes condições operacionais e para avaliação da sensibilidade do sistema a variações de concentração inicial, granulometria ou presença de recirculação.

Entretanto, a literatura enfatiza as limitações inerentes aos ensaios em batelada. Concha (2014) destaca que a ausência de alimentação contínua impede a reprodução de efeitos dinâmicos presentes em espessadores industriais, como flutuações de vazão e realimentações internas. Além disso, a escala reduzida pode intensificar efeitos de parede e alterar a distribuição de tensões no interior do leito, reduzindo a representatividade do campo de tensões observado em equipamentos industriais de grande porte.

Em sistemas sujeitos à recirculação de polpa, essas limitações tornam-se particularmente relevantes. A recirculação pode modificar progressivamente as

propriedades físicas e reológicas da suspensão, alterando a relação entre velocidade de sedimentação e concentração descrita pela teoria de Kynch (BÜRGER, 2000). Ensaios conduzidos com amostras não representativas das condições reais de operação podem, portanto, fornecer parâmetros que não refletem adequadamente o comportamento do sistema sob regime dinâmico.

Guimarães (2010) e Schneider *et al.* (2018) ressaltam que a confiabilidade das análises derivadas de ensaios laboratoriais depende da representatividade das amostras coletadas e da consistência dos critérios de interpretação adotados. A utilização de polpas obtidas sob condições reais de operação tende a aumentar a aderência entre resultados experimentais e comportamento industrial.

Dessa forma, os ensaios laboratoriais aplicados ao espessamento não devem ser compreendidos apenas como procedimento experimental simplificado, mas como instrumento de modelagem física controlada do processo de sedimentação. Sua interpretação exige integração entre fundamentos teóricos da mecânica das suspensões, análise crítica das premissas envolvidas e compreensão das limitações associadas à escala e às condições experimentais.

3.7 TIPOS DE ESPESSADORES E CONFIGURAÇÕES INDUSTRIAIS

Os espessadores utilizados na indústria mineral evoluíram significativamente ao longo das últimas décadas, acompanhando o aprofundamento do conhecimento sobre sedimentação, floculação e compressão do leito de sólidos. A necessidade de processar maiores vazões, obter *underflows* com maior teor de sólidos e maximizar a recuperação hídrica impulsionou o desenvolvimento de configurações construtivas diferenciadas, cada uma com características hidrodinâmicas e limitações específicas.

Embora o princípio físico fundamental permaneça o mesmo, sedimentação gravitacional associada à descarga controlada do leito, as variações geométricas e operacionais modificam de forma significativa o regime interno do equipamento. A seleção do tipo de espessador deve considerar não apenas a vazão e o teor de sólidos da alimentação, mas também a granulometria, a reologia da polpa, a sensibilidade à floculação e as condições dinâmicas do circuito no qual está inserido.

3.7.1 Tipologias de espessadores e fundamentos técnicos

Os espessadores empregados na indústria mineral podem ser classificados segundo sua configuração geométrica, capacidade de processamento e concentração de sólidos no *underflow* produzido. Essa classificação não se limita a diferenças construtivas, mas reflete distintas estratégias de controle do equilíbrio entre sedimentação impedida, compressão do leito e estabilidade hidrodinâmica do equipamento.

Os espessadores convencionais representam a configuração historicamente mais difundida. Caracterizam-se por grandes áreas superficiais, profundidade moderada e baixas taxas superficiais de alimentação. Nesses equipamentos, o dimensionamento baseia-se predominantemente na capacidade de sedimentação impedida da polpa, assumindo que o regime dominante no interior do tanque corresponde ao deslocamento coletivo das partículas sob influência gravitacional. A ampla área disponível reduz a velocidade ascensional do líquido clarificado, favorecendo a estabilidade da interface sólido-líquido e proporcionando maior tolerância a variações moderadas de alimentação. Conforme discutido por Chaves (2013), essa configuração apresenta robustez operacional e simplicidade construtiva, sendo adequada para polpas com comportamento de sedimentação relativamente previsível e menor fração de partículas ultrafinas.

Entretanto, o aumento progressivo das vazões processadas nas plantas modernas impôs limitações à aplicação exclusiva de espessadores convencionais, sobretudo em função da necessidade de grandes áreas físicas. Nesse contexto, desenvolveram-se configurações voltadas à intensificação do processo, com destaque para os espessadores de alta taxa. Nesses equipamentos, a inovação central reside no sistema de alimentação, especialmente no projeto do *feedwell*, responsável por promover mistura eficiente entre polpa e floculante e por dissipar a energia cinética da corrente de entrada. Svarovsky (2001) destaca que a otimização da hidrodinâmica na região de alimentação permite elevar significativamente a taxa superficial admissível, reduzindo a área necessária para determinada carga de

sólidos. A intensificação da floculação gera agregados maiores e mais densos, capazes de sedimentar sob maiores cargas hidráulicas.

Contudo, essa maior capacidade vem acompanhada de maior sensibilidade operacional. Alterações na dosagem de floculante, na granulometria ou no teor de sólidos da alimentação podem comprometer rapidamente a eficiência de clarificação. Concha (2014) observa que, em espessadores de alta taxa, o equilíbrio entre sedimentação impedida e clarificação torna-se mais delicado, exigindo controle rigoroso da hidrodinâmica interna. Modelagens apresentadas por Nguyen *et al.* (2014) demonstram que pequenas variações no padrão de escoamento no *feedwell* podem modificar a distribuição radial de sólidos e afetar diretamente a estabilidade da zona de sedimentação.

Quando o objetivo operacional passa a ser a obtenção de *underflow* com maior teor de sólidos, surgem os espessadores de alta densidade. Nessa configuração, a profundidade do tanque é ampliada e o mecanismo de arraste é dimensionado para suportar maiores esforços mecânicos, uma vez que o regime de compressão do leito passa a desempenhar papel dominante. Diferentemente dos espessadores convencionais, nos quais a limitação principal está associada à capacidade de sedimentação, nos equipamentos de alta densidade a taxa de drenagem do fluido intersticial e a resistência à compressão do leito tornam-se fatores críticos. Conforme Concha (2014), a permeabilidade do leito consolidado exerce influência direta sobre a capacidade de adensamento, especialmente em polpas com elevada fração de finos, nas quais a compressibilidade aumenta e a drenagem se torna mais lenta.

A evolução mais recente dessa tipologia corresponde aos espessadores de pasta, projetados para operar em regime próximo ao limite reológico da suspensão. Nesses equipamentos, o *underflow* apresenta comportamento viscoplástico, com tensão de escoamento significativa e baixa quantidade de água livre. Dahlstrom (2011) destaca que a aplicação dessa tecnologia está fortemente associada a estratégias de disposição de rejeitos com redução de riscos ambientais, uma vez que a elevada concentração de sólidos diminui a necessidade de armazenamento de água. Do ponto de vista físico, a operação aproxima-se de um regime dominado quase integralmente pela compressão e pela deformação do leito, exigindo análise detalhada das

propriedades reológicas da polpa e do torque necessário para mobilização do material.

Embora essas configurações apresentem diferenças geométricas evidentes, o aspecto mais relevante reside na alteração do regime predominante no interior do equipamento. Espessadores convencionais operam majoritariamente sob sedimentação impedida; espessadores de alta taxa dependem fortemente da eficiência de floculação e da estabilidade hidrodinâmica; espessadores de alta densidade e de pasta são governados principalmente pela compressão do leito e pela resistência mecânica associada ao escoamento do *underflow*. Assim, a tipologia adotada define não apenas a capacidade de processamento, mas também a natureza dos fenômenos físicos que limitam o desempenho do sistema.

No contexto de plantas polimetálicas, como discutido por Torquato (2014), a coexistência de correntes com diferentes características granulométricas e reológicas pode demandar configurações distintas para cada aplicação. A presença de recirculação de polpa adiciona complexidade adicional, uma vez que altera simultaneamente o teor de sólidos, a fração de finos e o comportamento reológico da alimentação, deslocando o equilíbrio entre sedimentação e compressão. Dessa forma, a análise das tipologias de espessadores deve ser realizada de maneira integrada, considerando não apenas parâmetros médios de projeto, mas também as condições dinâmicas reais de operação.

3.7.2 Sensibilidade operacional e integração ao circuito de processo

A análise de espessadores industriais deve considerar sua integração ao circuito de beneficiamento, uma vez que seu desempenho resulta do equilíbrio dinâmico entre alimentação, regime interno de sedimentação e condições impostas pelas etapas a montante e a jusante. Nesse contexto, a sensibilidade operacional torna-se um fator crítico, especialmente em sistemas sujeitos à recirculação de polpa.

Pequenas variações na alimentação podem provocar deslocamentos nas zonas de sedimentação, afetando a estabilidade do processo e resultando em alterações na qualidade do overflow, na densidade do underflow e no esforço mecânico do equipamento. Isso ocorre porque, em suspensões concentradas, a velocidade de

sedimentação depende da concentração local de sólidos, de modo que perturbações se propagam ao longo do espessador, modificando sua dinâmica interna (CONCHA, 2014; BÜRGER, 2000).

A sensibilidade operacional varia conforme o tipo de equipamento. Espessadores convencionais tendem a ser mais tolerantes a variações de vazão e concentração devido à menor carga hidráulica, enquanto espessadores de alta taxa operam com menor margem de segurança, sendo mais suscetíveis a mudanças na granulometria, na dosagem de reagentes e nas condições de mistura. Em sistemas de alta densidade, essa sensibilidade está fortemente associada ao regime de compressão, no qual alterações na viscosidade ou na fração de finos podem reduzir a permeabilidade do leito, aumentando a resistência ao escoamento e o torque do equipamento.

A integração ao circuito amplia essa complexidade, uma vez que o overflow e o underflow influenciam diretamente operações subsequentes. Dessa forma, instabilidades no espessador podem se propagar ao longo do processo, especialmente em plantas com múltiplos equipamentos interconectados. A recirculação de polpa intensifica esse efeito ao elevar a carga hidráulica, modificar as propriedades reológicas e reduzir a margem operacional do sistema, exigindo maior controle de variáveis como torque, nível de interface e densidade de descarga (GUIMARÃES, 2010; SCHNEIDER et al., 2018).

Sob essa perspectiva, a sensibilidade operacional deve ser compreendida como um reflexo da integração do espessador ao circuito. Quanto maior a interdependência entre correntes e menor a margem hidráulica disponível, maior a necessidade de controle operacional. No contexto deste estudo, essa abordagem é fundamental para interpretar os efeitos da recirculação sobre o espessador de concentrado de chumbo e para avaliar seus limites operacionais e eficiência ao longo do tempo.

3.8 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESPESSADORES

O dimensionamento de espessadores constitui etapa central no projeto de sistemas de separação sólido-líquido na indústria mineral, uma vez que define a área

superficial e as dimensões geométricas necessárias para garantir a sedimentação adequada dos sólidos, a clarificação do *overflow* e a produção de *underflow* com concentração compatível com as exigências do processo subsequente. Diferentemente de operações regidas por modelos unifásicos simples, o espessamento envolve fenômenos multifásicos governados pela interação entre sedimentação impedida, compressão do leito e comportamento reológico da suspensão, o que impõe desafios significativos à formulação de critérios universais de projeto.

Segundo Concha (2014), os métodos de dimensionamento evoluíram historicamente de abordagens empíricas baseadas em extrapolação direta de ensaios laboratoriais para modelos fundamentados em princípios teóricos derivados da mecânica dos meios contínuos e da teoria da sedimentação. Essa evolução reflete o aprofundamento do entendimento físico dos regimes de sedimentação e a necessidade de maior confiabilidade no projeto de equipamentos operando sob condições industriais variáveis.

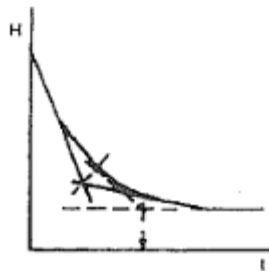
As primeiras abordagens sistematizadas são atribuídas a Coe e Clevenger (1916), que propuseram método baseado na determinação da taxa máxima admissível de sedimentação para determinada concentração de sólidos. O procedimento considera que a velocidade crítica obtida experimentalmente não deve ser excedida no espessador contínuo, sendo a área requerida calculada a partir da razão entre a vazão volumétrica alimentada e essa velocidade limite. Embora inovador para a época, esse método pressupõe comportamento relativamente simples da suspensão e desconsidera explicitamente o regime de compressão do leito. Conforme analisado por Guimarães (2010), sua aplicação torna-se limitada em sistemas com elevada fração de finos ou comportamento reológico complexo, nos quais a sedimentação não é o único fenômeno governante.

O avanço conceitual mais relevante ocorreu com a consolidação do método de Talmadge e Fitch (1955), amplamente adotado na indústria mineral até os dias atuais. Esse método utiliza a curva de sedimentação em batelada, altura da interface sólido-líquido em função do tempo, como base para determinação gráfica da área unitária necessária ao espessamento. Diferentemente do método de Coe e Clevenger,

Talmadge e Fitch incorporaram explicitamente a análise da transição entre sedimentação impedida e compressão do leito, reconhecendo que o regime limitante pode variar conforme a concentração da suspensão.

De acordo com Concha (2014), o procedimento gráfico consiste na construção de tangentes à curva experimental, identificando a condição crítica correspondente à máxima taxa admissível de transporte de sólidos, como apresentado na Figura 3. A área requerida é então determinada a partir da razão entre a vazão mássica de sólidos e a taxa crítica obtida. Essa abordagem integra de forma prática os efeitos cinéticos observados experimentalmente, razão pela qual permanece amplamente empregada em projetos industriais e estudos acadêmicos.

Figura 3 - Determinação gráfica do tempo crítico (t_c) pelo método de Talmadge & Fitch.



Fonte: Chaves (2004).

Entretanto, o método de Talmadge e Fitch pressupõe que as condições do ensaio em batelada sejam representativas da operação contínua. Essa hipótese implica considerar que a função velocidade de sedimentação versus concentração, implícita na curva experimental, permanece válida sob condições industriais. Conforme discutido por Concha (2014) e Bürger (2000), essa premissa pode ser comprometida quando ocorrem variações significativas na composição granulométrica ou no comportamento reológico da polpa, como em sistemas sujeitos à recirculação persistente.

O aprofundamento teórico da sedimentação consolidada por Kynch (1952), posteriormente expandido por Bürger (2000) e Concha e Bürger (2001), introduziu base matemática mais rigorosa ao problema. A teoria estabelece que a velocidade de sedimentação é função exclusiva da concentração local de sólidos, permitindo descrever a evolução espacial e temporal da suspensão por meio de equações

diferenciais de conservação de massa. A partir dessa estrutura conceitual, tornou-se possível modelar a propagação de frentes de concentração e a formação do leito consolidado em espessadores contínuos.

Modelos derivados dessa abordagem permitem estimar, com maior fidelidade, a capacidade de transporte de sólidos e a dinâmica do leito sob diferentes condições operacionais. Contudo, conforme ressalta Concha (2014), a aplicação prática desses modelos requer determinação experimental de funções constitutivas específicas, como a relação entre velocidade de sedimentação e concentração, além da caracterização da compressibilidade do leito e de sua permeabilidade. A obtenção desses parâmetros envolve ensaios adicionais e maior complexidade experimental, o que limita sua utilização rotineira em ambientes industriais.

Em sistemas nos quais o regime de compressão é predominante, como espessadores de alta densidade e de pasta, a consideração exclusiva da sedimentação impedida pode conduzir a subdimensionamento. Concha (2014) demonstra que, nessas condições, a taxa de drenagem do fluido intersticial passa a depender da resistência mecânica do leito consolidado, sendo governada por relações entre tensão efetiva e concentração de sólidos. Métodos que desconsideram essa etapa podem superestimar a capacidade de adensamento do equipamento.

Nas últimas décadas, abordagens mais recentes passaram a integrar modelagem computacional e simulação dinâmica ao dimensionamento. Schneider *et al.* (2018) destacam que ferramentas baseadas em balanços de massa acoplados a modelos hidrodinâmicos e reológicos permitem avaliar o comportamento do espessador sob diferentes cenários de vazão, teor de sólidos e condições de operação. Tais modelos ampliam a capacidade preditiva, mas continuam dependentes da qualidade e representatividade dos dados experimentais utilizados como entrada.

A literatura converge no entendimento de que nenhum método de dimensionamento é universalmente aplicável a todas as situações industriais (GUIMARÃES, 2010; CONCHA, 2014). A escolha da metodologia deve considerar o regime predominante no equipamento, a natureza da polpa e as condições dinâmicas do circuito. Em plantas onde a recirculação de polpa é recorrente, as condições reais

de alimentação podem divergir significativamente daquelas consideradas no projeto original, alterando simultaneamente vazão efetiva, concentração de sólidos e comportamento reológico.

Nessas circunstâncias, a aplicação direta de métodos clássicos, particularmente aqueles baseados exclusivamente em ensaios sob condições ideais, pode conduzir a estimativas imprecisas da área requerida. A representatividade dos parâmetros cinéticos, como velocidade de sedimentação no regime linear e tempo crítico associado à transição para compressão, torna-se elemento central para garantir confiabilidade do dimensionamento.

Dessa forma, o dimensionamento de espessadores deve ser compreendido como processo integrado entre experimentação e fundamentação teórica. A interpretação adequada das curvas de sedimentação, a consideração explícita do regime de compressão e a análise das condições operacionais reais constituem etapas indispensáveis para evitar subdimensionamento funcional ou superdimensionamento economicamente ineficiente. No contexto deste estudo, a aplicação do método de Talmadge e Fitch (1955), associada à análise dos fundamentos da teoria de Kynch conforme discutido por Bürger (2000) e Concha (2014), fornece a base conceitual para avaliar criticamente o impacto das condições operacionais observadas no espessador de concentrado de chumbo sobre os critérios de dimensionamento adotados.

3.9 RECIRCULAÇÃO DE POLPA, EFICIÊNCIA OPERACIONAL E IMPLICAÇÕES NO DIMENSIONAMENTO

A recirculação de polpa em plantas de beneficiamento mineral constitui fenômeno estrutural em circuitos industriais complexos, resultante tanto de decisões de projeto quanto de ajustes operacionais adotados para assegurar continuidade produtiva e estabilidade do processo. Embora frequentemente interpretada como variável contingencial, sua influência sobre o desempenho de espessadores é sistêmica, pois modifica simultaneamente o balanço de massa, a carga hidráulica, a distribuição granulométrica e a estrutura reológica da suspensão alimentada.

Sob a perspectiva da teoria clássica do espessamento, o funcionamento do equipamento depende do equilíbrio entre o fluxo descendente de sólidos e o fluxo

ascendente de líquido clarificado. Concha (2014) descreve o espessador como sistema contínuo governado por esse balanço dinâmico, no qual a capacidade hidráulica está associada à área superficial disponível para sedimentação. A introdução de correntes recirculadas eleva a vazão volumétrica efetiva alimentada ao equipamento sem que haja aumento correspondente da área de seção transversal. Como consequência, a velocidade ascensional do fluido clarificado tende a aumentar, intensificando o risco de arraste hidráulico de partículas finas para o *overflow*, especialmente quando o espessador opera próximo à sua capacidade nominal.

Contudo, os efeitos da recirculação não se restringem ao aumento de carga hidráulica. Do ponto de vista granulométrico, a recirculação tende a promover acúmulo progressivo de partículas finas no sistema. Svarovsky (2001) enfatiza que partículas de pequeno diâmetro apresentam velocidades de sedimentação significativamente inferiores às das partículas grossas e elevada susceptibilidade à estabilização coloidal. Mesmo quando representam fração reduzida em massa, sua influência sobre o comportamento global da suspensão é desproporcional. O aumento da fração de finos reduz a velocidade média de sedimentação coletiva e altera a forma da curva altura versus tempo obtida em ensaios de batelada.

Sob a ótica da teoria de Kynch, segundo a qual a velocidade de sedimentação é função exclusiva da concentração volumétrica de sólidos, qualquer modificação na composição granulométrica altera implicitamente a função velocidade–concentração que governa o transporte de sólidos (BÜRGER, 2000; CONCHA, 2014). A recirculação, ao modificar a estrutura interna da suspensão, pode deslocar o ponto correspondente à máxima capacidade de transporte sólido, parâmetro crítico na análise de desempenho e em procedimentos clássicos de dimensionamento. Dessa forma, não se trata apenas de aumento de vazão, mas de alteração constitutiva do comportamento do sistema particulado.

Além dos efeitos cinéticos, a recirculação influencia o regime de compressão do leito. Em concentrações elevadas, o processo de adensamento passa a ser governado pela drenagem do fluido intersticial através de um meio poroso deformável. A permeabilidade desse leito depende fortemente da distribuição granulométrica e da fração de finos presentes. Concha (2014) demonstra que o aumento de finos reduz a

permeabilidade hidráulica e eleva a resistência à compressão, podendo tornar a consolidação o regime limitante do espessamento. Em tais condições, o controle do processo deixa de ser predominantemente hidrodinâmico e passa a depender da relação constitutiva entre tensão efetiva e concentração volumétrica, conforme discutido por Bürger (2000).

Do ponto de vista reológico, a recirculação tende a modificar a microestrutura da polpa. Suspensões concentradas desenvolvem redes estruturais que conferem comportamento não newtoniano, frequentemente caracterizado por tensão de escoamento e viscosidade aparente dependente da taxa de deformação. Boger (2009) destaca que a história de cisalhamento exerce papel determinante na organização estrutural dessas suspensões. Correntes recirculadas já submetidas a esforços mecânicos podem apresentar degradação de flocos previamente formados, alteração na distribuição de tamanhos efetivos e reorganização das redes estruturais. Essa modificação influencia simultaneamente a sedimentação impedida e a resistência mecânica do leito consolidado.

A interação entre recirculação e floculação constitui aspecto particularmente sensível. A eficiência da floculação depende do equilíbrio entre formação e ruptura de flocos sob determinadas condições hidrodinâmicas. Em sistemas com recirculação, os flocos podem ser submetidos a múltiplos ciclos de cisalhamento, promovendo fragmentação progressiva. A redução do tamanho efetivo dos flocos implica diminuição da velocidade de sedimentação e aumento da fração de partículas finas livres, elevando a turbidez do *overflow* e exigindo ajustes na dosagem de floclulantes. Guimarães (2010) e Schneider *et al.* (2018) observam que, nessas condições, a dosagem ótima deixa de ser parâmetro fixo e passa a depender do estado estrutural instantâneo da suspensão.

A eficiência operacional do espessador deve, portanto, ser interpretada como resultado da interação entre fenômenos hidráulicos, cinéticos e mecânicos. Indicadores tradicionais, como densidade do *underflow* e claridade do *overflow*, não capturam integralmente a estabilidade do processo. A recirculação introduz realimentações que ampliam a variabilidade operacional, alterando a posição das zonas internas de sedimentação e compressão e podendo intensificar oscilações no

torque do mecanismo de arraste.

No que se refere às implicações para avaliação técnica do comportamento do espessamento, a principal consequência da recirculação reside na representatividade dos parâmetros experimentais utilizados como base para análise e dimensionamento. Métodos clássicos, como o de Talmadge e Fitch (1955), partem do pressuposto de que as curvas de sedimentação obtidas em batelada refletem adequadamente as condições industriais. Entretanto, se a polpa industrial apresenta alterações estruturais decorrentes de recirculação persistente, a função velocidade–concentração e o comportamento compressivo do leito podem diferir substancialmente daqueles observados sob condições laboratoriais idealizadas.

Schneider *et al.* (2018) ressaltam que discrepâncias entre condições experimentais e operacionais constituem uma das principais fontes de superestimação da capacidade operacional do espessador. Guimarães (2010) complementa que margens de segurança adotadas em projeto nem sempre são suficientes para absorver efeitos sistêmicos associados à recirculação contínua. Assim, a incorporação explícita da recirculação na análise experimental torna-se requisito para obtenção de parâmetros representativos.

A literatura converge, portanto, ao indicar que a recirculação de polpa não deve ser tratada apenas como incremento de vazão, mas como fenômeno que altera profundamente a estrutura física, cinética e reológica da suspensão. Seus efeitos repercutem na sedimentação impedida, na compressão do leito, na eficiência da floculação e na estabilidade hidráulica do equipamento.

No contexto deste trabalho, essa fundamentação teórica sustenta a necessidade de avaliar experimentalmente o comportamento da polpa sob condições com e sem recirculação, de modo a identificar alterações na resposta cinética e estrutural do sistema. A análise comparativa desses comportamentos permitirá discutir, à luz dos fundamentos estabelecidos por Concha (2014), Bürger (2000) e Svarovsky (2001), as implicações da recirculação sobre a eficiência operacional do espessamento e sobre a confiabilidade dos parâmetros utilizados na avaliação técnica do equipamento estudado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve os procedimentos experimentais e analíticos adotados para avaliar o comportamento do espessamento de polpa sob diferentes condições operacionais.

A abordagem experimental baseou-se na realização de ensaios de sedimentação em batelada, conduzidos em condição base e sob simulação laboratorial de recirculação de polpa. A partir das curvas altura versus tempo obtidas experimentalmente, foram determinados parâmetros cinéticos associados ao processo de espessamento, com ênfase na identificação do tempo crítico por meio do método gráfico de Talmadge e Fitch.

Além dos ensaios de sedimentação, foram realizadas determinações físico-químicas essenciais à caracterização da polpa, incluindo densidade aparente e porcentagem de sólidos, bem como ensaios de floculação sob condições controladas de dosagem e mistura. A integração desses procedimentos permitiu estabelecer base experimental consistente para a análise comparativa do desempenho do sistema.

4.1 MATERIAIS

Esta seção apresenta os materiais empregados na condução dos ensaios experimentais, incluindo a amostra de polpa mineral analisada, os reagentes utilizados nos testes de floculação e os equipamentos laboratoriais necessários à obtenção dos parâmetros físico-químicos e cinéticos do sistema.

A seleção e preparação dos materiais foram realizadas de modo a garantir representatividade das condições operacionais avaliadas, especialmente no que se refere à comparação entre situação base e condição com simulação de recirculação.

4.1.1 Caracterização da amostra

Foram utilizadas amostras de concentrado de chumbo provenientes da etapa *Rougher* de flotação de uma planta de beneficiamento mineral localizada no município de Aripuanã – MT. O fluxo amostrado corresponde à alimentação do espessador de

concentrado de chumbo em operação industrial.

A coleta foi realizada diretamente na linha de descarga do amostrador metalúrgico, utilizando recipiente plástico com capacidade nominal de 10 L, mantido parcialmente preenchido para permitir homogeneização prévia dos ensaios. O volume coletado foi considerado suficiente para execução dos testes previstos, mas não garantindo repetibilidade experimental.

A amostra representa a condição operacional base do espessador, sem influência de recirculação industrial no momento da coleta. Após a coleta, o material foi mantido em repouso por um tempo até a realização dos testes.

Antes da execução dos testes, a polpa foi homogeneizada cuidadosamente através de agitação mecânica por 20 minutos para assegurar uniformidade de concentração e distribuição granulométrica, reduzindo possíveis efeitos de segregação.

Para fins de cálculo da concentração volumétrica de sólidos e dos parâmetros cinéticos associados ao espessamento, adotou-se densidade específica do sólido igual a $3,97 \text{ g/cm}^3$, conforme densidade histórica do concentrado de Pb. Não foi realizada análise granulométrica detalhada da amostra, uma vez que o estudo possui caráter exploratório entre condições operacionais do mesmo fluxo, assumindo-se constância da composição mineralógica e da distribuição granulométrica entre os ensaios realizados.

4.1.2 Reagentes

Foi utilizado floculante polimérico compatível com aquele empregado na operação industrial da planta, visando reproduzir as condições reais de espessamento. O reagente corresponde a polímero sintético de alto peso molecular, aplicado industrialmente no espessador de concentrado de chumbo.

A solução de floculante foi coletada diretamente do tanque de preparação da planta na concentração de 0,11% (p/v). A utilização da solução já preparada industrialmente teve como objetivo garantir compatibilidade química e estrutural com

o sistema operacional, bem como assegurar representatividade das condições de dosagem utilizadas em campo.

Antes da aplicação nos ensaios, a solução foi mantida sob leve agitação manual para evitar segregação ou degradação do polímero, assegurando homogeneidade durante a dosagem.

4.1.3 Equipamentos

Os ensaios experimentais foram conduzidos com os seguintes equipamentos:

- Proveta graduada transparente de 1000 mL, utilizada para os ensaios de sedimentação em batelada;
- Béqueres de vidro para preparo e mistura das amostras;
- Agitador mecânico com controle de velocidade para homogeneização da polpa e dispersão do floculante;
- Balança digital com resolução de 0,01 g para determinação de massa e cálculo de densidade;
- Cronômetro digital para registro do tempo durante os ensaios de sedimentação;
- Seringas graduadas para dosagem controlada do floculante.

Todos os equipamentos foram utilizados em condições adequadas de limpeza e calibração, de modo a reduzir incertezas experimentais e garantir confiabilidade na obtenção dos dados.

4.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DA POLPA

A densidade de polpa foi determinada experimentalmente pesando a proveta com volume conhecido (1000 ml) preenchida com polpa na balança digital. O procedimento foi realizado após homogeneização mecânica da amostra, a fim de minimizar efeitos de sedimentação diferencial e garantir representatividade do volume analisado.

Figura 4 - Agitador mecânico digital utilizado na homogeneização da polpa.



Fonte: Autoria própria (2025).

Inicialmente, determinou-se a massa da proveta vazia (tara), obtendo-se valor de 260 g. Em seguida, a proveta foi preenchida com volume conhecido de polpa previamente homogeneizada. A massa total do conjunto (proveta + polpa) foi então determinada em balança digital, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Determinação da densidade da polpa em proveta graduada de 1000 mL.



Fonte: Autoria própria (2025).

A massa líquida da polpa foi calculada pela diferença entre a massa total medida e a massa da proveta vazia, conforme a Equação 1:

$$m_p = m_{total} - m_{tara} \quad (1)$$

onde:

m_p = massa da polpa (g)

m_{total} = massa medida (g)

m_{tara} = massa da proveta vazia (g)

A densidade da polpa foi obtida pela razão entre a massa líquida e o volume correspondente, conforme a Equação 2:

$$\rho = \frac{m_p}{V} \quad (2)$$

onde:

ρ = densidade da polpa (g/ml = g/cm³)

V = volume da proveta (ml = cm³)

Os valores obtidos foram utilizados posteriormente no cálculo da porcentagem de sólidos e na determinação da concentração volumétrica da suspensão. Para esse fim, adotou-se densidade específica do sólido igual a 3,97 g/cm³, conforme informação técnica fornecida pela planta industrial, valor compatível com concentrados de chumbo.

4.3 DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM DE SÓLIDOS

A porcentagem mássica de sólidos da polpa foi determinada a partir da densidade experimentalmente obtida, considerando-se a densidade do líquido e a densidade específica do sólido mineral. O cálculo foi realizado com base na relação entre massa, volume e densidades das fases constituintes, conforme a Equação 3:

$$\%S = 100 \times \left(\frac{\rho - \rho_L}{\rho} \right) \times \left(\frac{\rho_S}{\rho_S - \rho_L} \right) \quad (3)$$

onde:

ρ = densidade da polpa (g/cm³);

ρ_L = densidade do líquido (g/cm³);

ρ_S = densidade do sólido (g/cm³).

A densidade do líquido foi considerada igual a 1,0 g/cm³, assumindo-se meio aquoso em condições ambiente.

A determinação da porcentagem de sólidos é etapa essencial para caracterização da suspensão, uma vez que a concentração influencia diretamente a cinética de sedimentação e a transição para compressão do leito, conforme discutido nos fundamentos teóricos do espessamento. Os valores obtidos foram utilizados como parâmetro de controle entre os ensaios realizados nas diferentes condições operacionais avaliadas.

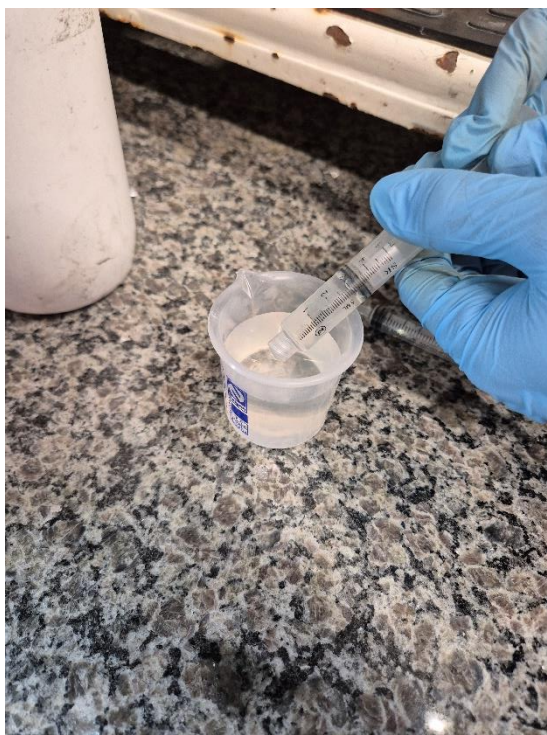
4.4 ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO

Os ensaios de floculação foram realizados com o objetivo de avaliar a resposta da polpa à adição de floculante polimérico e estabelecer uma faixa de dosagem

adequada para os ensaios subsequentes de sedimentação em batelada.

Para o teste, foram transferidos 500 mL de polpa previamente homogeneizada para proveta graduada. O floculante foi adicionado de forma controlada, utilizando seringa graduada, assim como é mostrado na Figura 6, seguido de homogeneização manual padronizada, buscando reproduzir condição de mistura compatível com prática industrial em escala laboratorial.

Figura 6 - Dosagem volumétrica da solução de floculante utilizando seringa graduada.



Fonte: Autoria própria (2025).

Após a adição do reagente, registrou-se o tempo necessário para que a interface sólido-líquido atingisse a marca correspondente a 200 mL na proveta. Esse critério foi adotado como indicador comparativo da eficiência inicial de sedimentação sob diferentes dosagens.

Além da avaliação temporal, foi realizada análise qualitativa da formação dos flocos, observando-se tamanho aparente, velocidade de agregação e estabilidade estrutural ao longo da sedimentação. A dosagem que apresentou melhor desempenho combinado, menor tempo de sedimentação inicial e formação de flocos visualmente estáveis, foi selecionada como referência para os ensaios de sedimentação utilizados

na determinação do tempo crítico.

Os ensaios foram conduzidos sob condições controladas, mantendo-se constantes o volume de polpa, a temperatura ambiente e o procedimento de homogeneização, a fim de garantir reprodutibilidade e consistência entre as repetições.

4.5 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO EM BATELADA

Os ensaios de sedimentação em batelada foram conduzidos com o objetivo de avaliar o comportamento cinético da polpa e identificar a resposta do sistema à dosagem de floculante, bem como caracterizar o regime linear associado à sedimentação impedida.

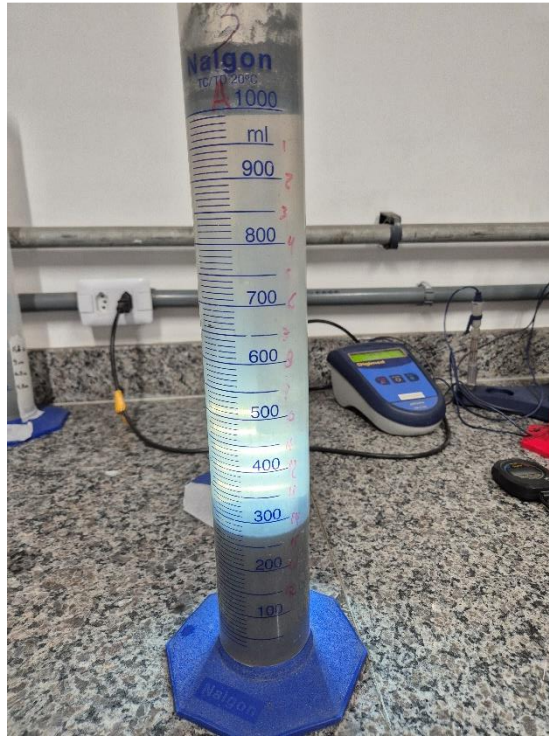
Inicialmente, a polpa de concentrado de chumbo foi transferida para proveta graduada de 1000 mL, sendo previamente homogeneizada por agitação mecânica.

A dosagem de floculante foi realizada de forma progressiva, em incrementos equivalentes a 2 g/t, com mistura subsequente por meio de inversão controlada da proveta (quatro inversões completas), garantindo dispersão homogênea do polímero na suspensão. Após cada adição, iniciou-se o registro do tempo de sedimentação.

Durante o ensaio, a posição da interface sólido-líquido foi monitorada em intervalos correspondentes às marcações graduadas da proveta, com leituras realizadas a cada 50 mL de variação volumétrica. Os valores registrados foram posteriormente convertidos para altura (m), considerando a relação geométrica da proveta, permitindo a construção das curvas de altura da interface (H) em função do tempo (t).

Além da evolução temporal da interface, foram observados qualitativamente o aspecto do sobrenadante (turbidez visual) e o volume final de sedimento formado, como indicadores complementares da eficiência de floculação e da capacidade de compactação do sistema, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Ensaio de sedimentação em batelada evidenciando a interface sólido-líquido ao final do teste



Fonte: Autoria própria (2025).

Os dados obtidos constituíram a base para determinação da velocidade média no regime linear de sedimentação e posterior identificação do tempo crítico pelo método gráfico.

4.6 SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA RECIRCULAÇÃO

A condição de recirculação foi simulada em escala laboratorial por meio da mistura controlada entre fração da polpa previamente sedimentada e fração de alimentação fresca na proporção de 4 : 1 em massa de polpa, reproduzindo de forma simplificada prática operacional observada em circuitos industriais, na qual parte do material adensado retorna ao sistema.

A fração sedimentada utilizada na simulação foi obtida a partir do ensaio de sedimentação prévio com presença de floculante, sendo cuidadosamente reincorporada à polpa fresca em proporção previamente definida após permanecer sedimentando de um dia para o outro. Após a recomposição da suspensão, procedeu-

se à homogeneização manual padronizada, buscando assegurar uniformidade da mistura e representatividade da condição simulada.

A partir dessa nova condição, foram repetidos os ensaios de floculação e sedimentação em batelada, conforme metodologia descrita nas Seções 4.4 e 4.5, mantendo-se constantes o volume de polpa, o procedimento de mistura e os critérios de leitura da interface. Essa padronização permitiu comparação direta entre a condição base e a condição com recirculação simulada.

4.7 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE SEDIMENTAÇÃO

A velocidade média de sedimentação no regime linear foi determinada a partir do trecho aproximadamente retilíneo da curva altura versus tempo, correspondente à fase de sedimentação impedida.

A velocidade foi calculada pela razão entre a variação de altura da interface no trecho linear e o intervalo de tempo correspondente, conforme a Equação 4:

$$v = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (4)$$

onde:

v = velocidade média de sedimentação (m/min);

ΔH = variação de altura no trecho linear (m);

Δt = intervalo de tempo correspondente (min).

A seleção do trecho linear foi realizada com base na inspeção gráfica da curva experimental, considerando o intervalo no qual a inclinação se manteve aproximadamente constante. Esse procedimento está em consonância com os fundamentos da sedimentação impedida discutidos no Capítulo 3, nos quais a velocidade de sedimentação pode ser considerada aproximadamente uniforme para determinada faixa de concentração.

Os valores de velocidade obtidos foram utilizados para análise comparativa entre as condições avaliadas e para interpretação do comportamento cinético da suspensão.

4.8 DETERMINAÇÃO DO TEMPO CRÍTICO PELO MÉTODO GRÁFICO

A determinação do tempo crítico (t_c) foi realizada por meio do método gráfico proposto por Talmadge e Fitch, conforme sistematizado por Chaves (2004) para aplicação em estudos de espessamento a partir de ensaios de sedimentação em batelada.

O procedimento baseou-se na construção da curva experimental de altura da interface sólido-líquido (H) em função do tempo (t), obtida conforme descrito na Seção 4.5. A partir dessa curva, identificaram-se os diferentes regimes de sedimentação, com especial atenção ao trecho aproximadamente linear correspondente ao regime de sedimentação impedida e à região subsequente associada ao início da compressão do leito.

O método gráfico consiste no traçado de retas auxiliares diretamente sobre a curva experimental, com o objetivo de identificar o ponto que representa a transição entre sedimentação impedida e compressão. Inicialmente, traça-se a reta tangente ao trecho linear da curva, representando a velocidade média de sedimentação coletiva. Em seguida, constrói-se a reta tangente à porção curva correspondente à fase de compressão do leito.

O ponto de interseção entre essas construções gráficas define o tempo crítico (t_c), correspondente ao instante em que o regime dominante deixa de ser controlado predominantemente pela sedimentação impedida e passa a ser influenciado pela resistência à compressão do leito consolidado.

Esse procedimento está de acordo com a abordagem descrita por Chaves (2004), que ressalta que o tempo crítico representa parâmetro fundamental na análise do comportamento cinético de suspensões minerais concentradas, uma vez que delimita a condição limite para transporte eficiente de sólidos antes que a compressão se torne fator controlante.

A determinação de t_c foi realizada exclusivamente por construção gráfica, não sendo empregado ajuste matemático ou modelagem analítica da curva experimental. Todas as retas foram traçadas diretamente sobre os gráficos obtidos a partir dos

dados experimentais, garantindo coerência com o método clássico adotado na literatura.

4.9 DETERMINAÇÃO DA RAZÃO DE ESPESSAMENTO

A razão de espessamento (R) foi utilizada como parâmetro comparativo para avaliação do desempenho da suspensão nas diferentes condições experimentais analisadas.

Conforme apresentado por Chaves (2004), a razão de espessamento pode ser expressa através da Equação (5):

$$R = \frac{tc}{CA \cdot HA} \quad (5)$$

em que:

R = razão de espessamento ($m^2/(t/h)$);

tc = tempo crítico determinado pelo método gráfico (h);

CA = concentração de sólidos na alimentação (t/m^3);

HA = altura inicial da suspensão na proveta (m).

A razão de espessamento relaciona o tempo necessário para transição ao regime de compressão com a carga inicial de sólidos presente na coluna de sedimentação. Dessa forma, o parâmetro integra simultaneamente aspectos cinéticos e estruturais da suspensão, permitindo comparar condições experimentais distintas sob mesma base conceitual.

A concentração inicial CA foi obtida a partir da percentagem mássica de sólidos determinada conforme descrito na Seção 4.3, convertida para base volumétrica quando necessário. A altura inicial HA corresponde à altura da coluna de polpa imediatamente após homogeneização e início do ensaio.

A utilização da razão de espessamento, em substituição à estimativa direta de área de espessador, permite análise comparativa entre diferentes condições operacionais sem extrapolação para escala industrial. Dessa forma, o parâmetro foi

empregado exclusivamente como critério técnico de comparação entre as situações avaliadas neste estudo.

4.10 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Os procedimentos experimentais adotados neste estudo foram conduzidos em escala laboratorial, utilizando proveta graduada de 1000 mL para os ensaios de sedimentação em batelada. Embora essa abordagem seja amplamente empregada para análise preliminar do comportamento cinético de suspensões minerais, reconhece-se que tal configuração não reproduz integralmente as condições hidrodinâmicas presentes em espessadores industriais de operação contínua.

Em ensaios de batelada, não há alimentação constante, escoamento radial, gradientes internos de velocidade nem redistribuição dinâmica de sólidos, fenômenos característicos de equipamentos industriais. Dessa forma, os resultados obtidos representam o comportamento da suspensão sob regime estático controlado, constituindo aproximação simplificada do processo real.

A simulação da recirculação foi realizada por meio da mistura controlada entre fração sedimentada e alimentação fresca, reproduzindo de forma simplificada a prática operacional observada na planta industrial. Entretanto, essa metodologia não contempla efeitos cumulativos de múltiplos ciclos de recirculação, tampouco reproduz integralmente o histórico de cisalhamento ao qual a polpa está submetida no circuito industrial.

A densidade específica do sólido ($3,97 \text{ g/cm}^3$) foi adotada com base em dados técnicos fornecidos pela planta estudada, não tendo sido realizada verificação laboratorial independente desse parâmetro. Adicionalmente, não foi conduzida análise granulométrica da amostra, o que limita a avaliação quantitativa da influência da distribuição de tamanhos de partículas sobre a cinética de sedimentação e a compressibilidade do leito.

A avaliação da claridade do sobrenadante foi realizada por inspeção visual, não sendo empregados instrumentos de medição de turbidez. Embora suficiente para análise comparativa entre condições experimentais, tal procedimento não permite

quantificação precisa da eficiência de clarificação.

Por fim, ressalta-se que os parâmetros determinados neste estudo destinam-se à comparação entre condições experimentais específicas, não sendo aplicados diretamente à estimativa de dimensões industriais. A utilização da razão de espessamento como critério comparativo busca reduzir incertezas associadas à extrapolação de escala, mantendo a análise restrita ao comportamento cinético observado em laboratório.

Essas limitações não invalidam os resultados obtidos, mas delimitam o escopo de interpretação, reforçando o caráter comparativo e experimental do estudo desenvolvido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios de sedimentação em batelada realizados com concentrado de chumbo, em condição base e sob condição simulada de recirculação de polpa.

A análise contempla a identificação dos regimes de sedimentação, a determinação do tempo crítico, a avaliação da velocidade média no trecho de sedimentação livre e as implicações no dimensionamento de espessadores pelo método de Talmadge & Fitch.

5.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DA POLPA DE CONCENTRADO DE CHUMBO

A polpa de concentrado de chumbo coletada na alimentação do espessador apresentou comportamento típico de suspensão mineral fina, com tendência à sedimentação impedida em concentrações moderadas de sólidos.

A determinação do teor de sólidos em 27,6% permitiu estabelecer a condição inicial para os ensaios subsequentes. A polpa apresentou estabilidade temporária quando mantida em repouso, porém com sedimentação lenta na ausência de floculante, evidenciando a necessidade de condicionamento químico para melhoria da eficiência do processo de espessamento.

Observou-se que, sem adição de floculante, a interface sólido-líquido apresentou descida gradual e pouco definida, indicando predominância de sedimentação impedida, conforme descrito por Concha (2014). Esse comportamento está associado à elevada interação entre partículas finas, característica comum em concentrados metálicos.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO

Os ensaios de floculação foram conduzidos com o objetivo de avaliar a influência da dosagem de floculante na formação de agregados e na resposta cinética inicial da sedimentação do concentrado de chumbo. A análise foi realizada considerando o tempo necessário para que a interface sólido-líquido atingisse a marca

correspondente a 200 mL na proveta graduada, parâmetro adotado como indicador comparativo da eficiência inicial do processo.

Os tempos registrados para cada dosagem encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempo de sedimentação em segundos até a altura de 200mL para diferentes dosagens de floculante.

Altura (mL) / Dosagem (g/t)	4,00 (g/t)	6,00 (g/t)	8,00 (g/t)
200	41,63	36,85	45,84

Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se que a dosagem de 6 g/t apresentou o menor tempo para atingir a altura analisada, indicando maior eficiência na formação de flocos e maior taxa de sedimentação inicial. A redução do tempo em relação à dosagem de 4 g/t evidencia que o aumento da concentração de polímero favoreceu o mecanismo de agregação por ponteamento, ampliando o diâmetro hidrodinâmico efetivo das partículas e reduzindo a resistência ao deslocamento gravitacional.

A dosagem de 4 g/t mostrou-se relativamente menos eficiente, sugerindo que a quantidade de polímero disponível pode não ter sido suficiente para promover a formação de uma rede de flocos estruturalmente estável em toda a suspensão. Em contrapartida, o aumento da dosagem para 8 g/t não resultou em melhoria adicional da cinética de sedimentação, sendo observado inclusive aumento do tempo necessário para atingir a altura de referência.

Esse comportamento é coerente com o mecanismo de floculação por ponteamento polimérico descrito por Svarovsky (2001), no qual cadeias macromoleculares adsorvidas parcialmente sobre as superfícies minerais promovem a ligação entre partículas adjacentes. Quando a dosagem é insuficiente, o número de pontos de ligação é limitado; quando excessiva, pode ocorrer saturação superficial e redução da eficiência de formação de pontes interparticulares.

A ausência de ganho significativo para a dosagem de 8 g/t está em concordância com o fenômeno de superdosagem discutido por Chaves (2013), no qual o excesso

de polímero pode provocar estabilização parcial da suspensão ou formação de estruturas menos densas e mais suscetíveis à ruptura sob cisalhamento.

Durante os ensaios, observou-se qualitativamente que a dosagem de 6 g/t proporcionou melhor definição da interface sólido-líquido e maior clareza do sobrenadante nas etapas iniciais do processo, indicando formação de agregados mais consistentes e sedimentação mais uniforme.

Com base nesses resultados, a dosagem de 6 g/t foi adotada como referência para os ensaios subsequentes de sedimentação em batelada e para a determinação do tempo crítico pelo método gráfico.

5.3 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO - CONDIÇÃO BASE

Os ensaios de sedimentação em batelada foram conduzidos com o objetivo de caracterizar o comportamento cinético do concentrado de chumbo na condição base (sem recirculação), identificar o regime de sedimentação impedida, determinar a velocidade média no trecho linear de sedimentação e estabelecer o tempo crítico (t_c) pelo método gráfico de Talmadge & Fitch.

A polpa utilizada apresentou concentração inicial de aproximadamente 27,6% de sólidos em massa e altura inicial de 0,36 m, correspondente a 1000 mL na proveta graduada. Foram avaliadas as dosagens de 4 g/t, 6 g/t e 8 g/t de floculante, mantendo-se constantes as demais condições experimentais.

A Figura 8 apresenta os valores de altura da interface sólido-líquido em função do tempo acumulado para as três dosagens avaliadas.

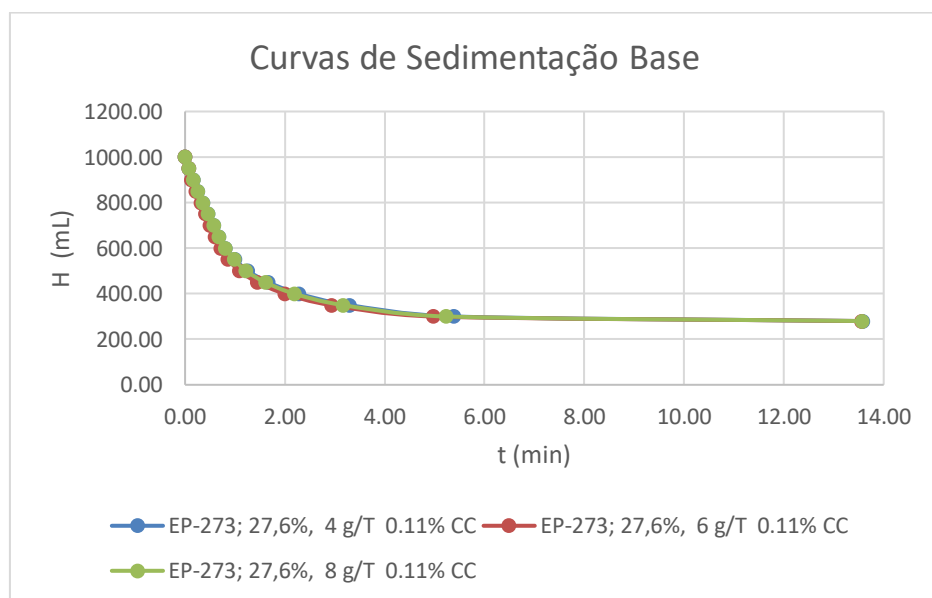
Figura 8- Altura da interface sólido-líquido (H) em função do tempo (t) para a sedimentação base

Altura/ Amostra		EP-273; 27,6%, 4 g/T 0.11%CC		EP-273; 27,6%, 6 g/T 0.11%CC		EP-273; 27,6%, 8 g/T 0.11%CC	
H(mL)	m	t(min)	t(h)	t(min)	t(h)	t(min)	t(h)
1000,00	0,356	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000
950,00	0,339	0,08	0,001	0,07	0,001	0,08	0,001
900,00	0,322	0,16	0,003	0,13	0,002	0,16	0,003
850,00	0,305	0,25	0,004	0,22	0,004	0,26	0,004
800,00	0,288	0,36	0,006	0,32	0,005	0,36	0,006
750,00	0,271	0,46	0,008	0,41	0,007	0,46	0,008
700,00	0,254	0,57	0,010	0,50	0,008	0,57	0,010
650,00	0,236	0,68	0,011	0,60	0,010	0,68	0,011
600,00	0,219	0,81	0,014	0,71	0,012	0,80	0,013
550,00	0,202	1,00	0,017	0,86	0,014	0,98	0,016
500,00	0,185	1,26	0,021	1,09	0,018	1,22	0,020
450,00	0,168	1,67	0,028	1,45	0,024	1,61	0,027
400,00	0,151	2,28	0,038	2,00	0,033	2,19	0,037
350,00	0,135	3,30	0,055	2,93	0,049	3,17	0,053
300,00	0,118	5,38	0,090	4,97	0,083	5,23	0,087
280,00	0,110	13,58	0,226	13,56	0,226	13,57	0,226
200,00	0,083						
150,00	0,065						
100,00	0,048						

Fonte: Autoria própria (2026).

A partir desses dados, foram construídas as curvas de sedimentação apresentadas na Figura 9.

Figura 9 - Curvas de sedimentação do concentrado de chumbo (27,6% sólidos) para diferentes dosagens de flocculante



Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se que as três curvas apresentam comportamento típico de sedimentação em suspensões concentradas, caracterizado por trecho inicial aproximadamente linear, seguido de redução progressiva da inclinação até estabilização associada ao regime de compressão do leito.

Esse comportamento é consistente com a teoria de Kynch (BÜRGER, 2000; CONCHA, 2014), segundo a qual a velocidade de sedimentação em suspensões concentradas depende da concentração local de sólidos. No trecho linear predomina a sedimentação impedida; posteriormente, o processo passa a ser governado pela drenagem do fluido intersticial através do leito consolidado.

5.3.1 Identificação do regime linear e determinação da velocidade média

A análise gráfica das curvas permitiu identificar comportamento aproximadamente linear entre as alturas de 0,36 m e 0,22 m, intervalo adotado como representativo do regime de sedimentação impedida.

A partir desse intervalo, foi determinada a velocidade média de sedimentação no trecho linear para cada dosagem, considerando a razão entre a variação de altura e o intervalo de tempo correspondente.

Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Velocidade média de sedimentação no regime linear

Dosagem de floculante (g/t)	Velocidade (m/h)
4	6,67
6	7,21
8	6,48

Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados indicam que a dosagem de 6 g/t apresentou a maior velocidade média no regime linear tal qual o teste de floculação, indicando maior eficiência de agregação e melhor resposta cinética inicial. A dosagem de 4 g/t apresentou

velocidade inferior, sugerindo floculação insuficiente, enquanto a dosagem de 8 g/t não resultou em aumento proporcional da velocidade, indicando possível proximidade de condição de superdosagem.

O comportamento observado confirma a existência de faixa ótima de dosagem, na qual o mecanismo de ponteamento polimérico atua de forma mais eficiente (CHAVES, 2013; SVAROVSKY, 2001).

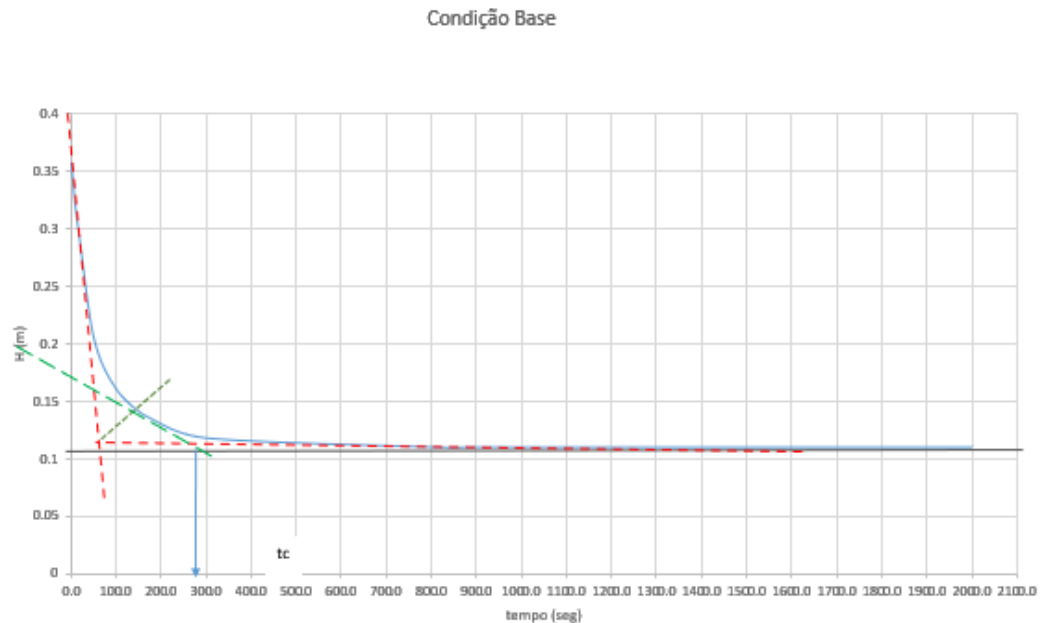
5.3.2 Determinação do tempo crítico pelo método gráfico

O tempo crítico (t_c) foi determinado exclusivamente para a dosagem ótima de 6 g/t, utilizando o método gráfico da bissetriz conforme descrito na metodologia.

O procedimento consistiu no traçado manual de duas retas tangentes à curva experimental: a primeira correspondente ao trecho linear do regime de sedimentação impedida e a segunda ajustada ao trecho representativo do regime de compressão do leito. A partir da interseção dessas retas, traçou-se uma terceira reta bissetriz e no ponto de interseção com a curva de sedimentação traçou-se a tangente à curva de sedimentação. O ponto em que essa reta intercepta a linha horizontal correspondente à altura do leito consolidado foi adotado como o tempo crítico (t_c), conforme preconizado no método da Bissetriz descrito por Chaves (2004).

O ponto de interseção dessas retas foi adotado como tempo crítico do sistema conforme a Figura 10.

Figura 10 - Determinação gráfica do tempo crítico (t_c) para a condição base (6 g/t)



Fonte: Autoria própria (2026).

O valor obtido para a condição base foi de 288 s, correspondente a 0,08 h.

O tempo crítico representa o instante associado à transição cinética entre sedimentação impedida e compressão do leito, constituindo parâmetro fundamental para análises comparativas entre condições operacionais distintas.

5.4.3 Determinação da razão de espessamento – Condição base

A razão de espessamento (R) foi determinada a partir do tempo crítico obtido pelo método gráfico da Bissetriz, considerando-se a altura inicial da coluna de polpa (H_a) igual a 0,356 m e a concentração de sólidos da alimentação (C_a) igual a 0,348 t/m³, conforme metodologia descrita previamente.

Para a condição base, com tempo crítico de 0,08 h, obteve-se um valor de R igual a $R = 0,65 \text{ m}^2/(\text{t/h})$.

Conforme discutido na literatura (CHAVES, 2004), a razão de espessamento está associada à relação entre a concentração da alimentação e a resposta cinética do

sistema. Valores mais elevados de R indicam maior área relativa requerida para o adensamento, estando associados, portanto, a menor eficiência relativa do processo sob aquela condição.

5.3.4 Síntese técnica da condição base

Os resultados obtidos na condição base, com teor de sólido inicial de 27,58%, evidenciam comportamento cinético característico de suspensão moderadamente concentrada, na qual o regime de sedimentação impedida predomina durante parcela significativa do ensaio.

A dosagem de 6 g/t apresentou velocidade média de sedimentação de 7,21 m/h no regime linear, indicando resposta favorável à ação do floculante e adequada formação de agregados. O tempo crítico determinado pelo método gráfico foi de 0,08 h, refletindo transição relativamente rápida para o regime de compressão do leito.

Entretanto, a razão de espessamento obtida ($R = 0,65 \text{ m}^2/(\text{t/h})$) indica, segundo o critério adotado, menor eficiência relativa do processo sob essa condição. Valores mais elevados de R estão associados a maior área relativa requerida para o espessamento, sugerindo que, apesar da resposta cinética favorável no regime linear, o desempenho global do sistema deve ser interpretado com cautela.

Do ponto de vista reológico, a menor concentração de sólidos implica menor viscosidade aparente e menor desenvolvimento de estrutura interna da suspensão, favorecendo a mobilidade das partículas no regime impedido. Contudo, mesmo sob essa condição, a interação entre concentração da alimentação e comportamento cinético resultou em valor de R que indica eficiência relativa limitada segundo esse parâmetro.

Dessa forma, a condição base apresentou cinética rápida de sedimentação, porém razão de espessamento elevada, evidenciando que a avaliação do desempenho deve considerar múltiplos critérios simultaneamente.

5.4 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO _ RECIRCULAÇÃO DE POLPA

Os ensaios de sedimentação em batelada sob condição simulada de recirculação foram conduzidos com o objetivo de avaliar as alterações na cinética de sedimentação decorrentes do aumento da concentração de sólidos e da modificação estrutural da polpa.

A polpa apresentou concentração inicial de aproximadamente 46,87% de sólidos em massa, valor significativamente superior ao observado na condição base (27,6%). A altura inicial da coluna permaneceu em 0,36 m (1000 mL na proveta graduada). Foram avaliadas as dosagens de 6 g/t, 8 g/t e 10 g/t de flocculante.

A Figura 11 apresenta os valores experimentais de altura da interface sólido-líquido (H) em função do tempo (t) para as três dosagens avaliadas sob condição de recirculação.

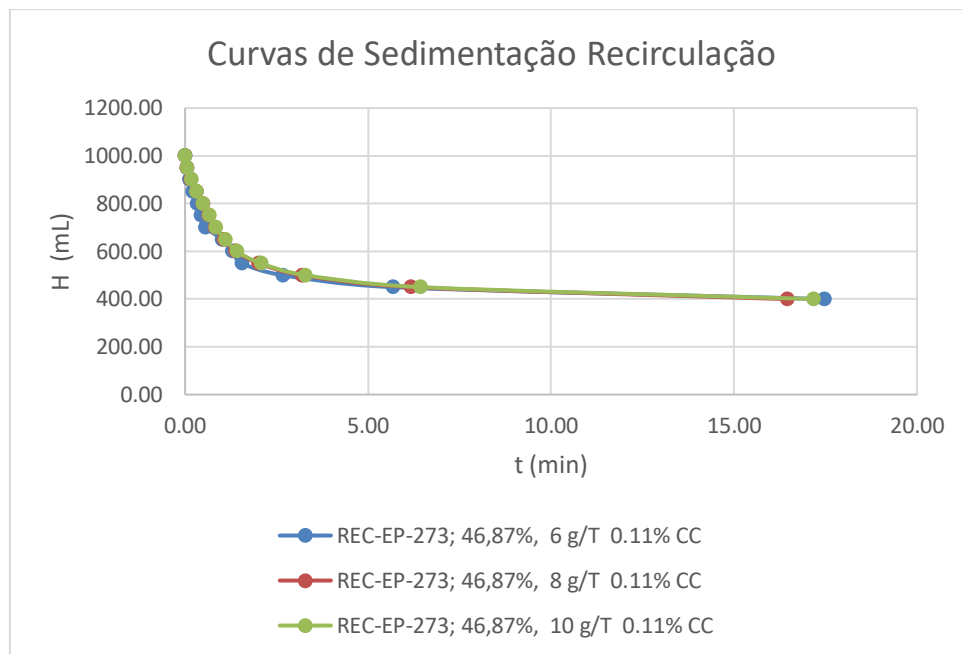
Figura 11 - Altura da interface sólido-líquido (H) em função do tempo (t) para a condição com recirculação (46,87% de sólidos)

Altura/ Amostra		REC-EP-273; 46,87%, 6 g/T 0.11%CC		REC-EP-273; 46,87%, 8 g/T 0.11%CC		REC-EP-273; 46,87%, 10 g/T 0.11%CC	
H(mL)	m	t(min)	t(h)	t(min)	t(h)	t(min)	t(h)
1000,00	0,36	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000
950,00	0,34	0,05	0,001	0,05	0,001	0,06	0,001
900,00	0,32	0,12	0,002	0,16	0,003	0,17	0,003
850,00	0,31	0,21	0,003	0,31	0,005	0,32	0,005
800,00	0,29	0,33	0,006	0,48	0,008	0,49	0,008
750,00	0,27	0,43	0,007	0,64	0,011	0,66	0,011
700,00	0,25	0,56	0,009	0,82	0,014	0,84	0,014
650,00	0,24	1,01	0,017	1,07	0,018	1,10	0,018
600,00	0,22	1,28	0,021	1,38	0,023	1,42	0,024
550,00	0,20	1,55	0,026	2,02	0,034	2,07	0,035
500,00	0,19	2,67	0,044	3,19	0,053	3,29	0,055
450,00	0,17	5,67	0,095	6,18	0,103	6,43	0,107
400,00	0,15	17,47	0,291	16,46	0,274	17,18	0,286
350,00	0,14						
300,00	0,12						
250,00	0,10						
200,00	0,08						
150,00	0,07						
100,00	0,05						

Fonte: Autoria própria (2026).

A partir desses dados, foram construídas as curvas de sedimentação apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Curvas de sedimentação do concentrado de chumbo sob condição de recirculação (46,87% de sólidos)



Fonte: Autoria própria (2026).

Para a condição com recirculação foram utilizadas as dosagens de 6 g/t, 8 g/t e 10 g/t. Essa dosagem de 6 g/t inferior foi definida, pois, no teste prévio de sedimentação já determinou-se que a dosagem base de floculante será de 6g/t. As curvas apresentam comportamento compatível com suspensões mais concentradas, evidenciando redução da inclinação inicial quando comparadas à condição base. O aumento da concentração de sólidos intensifica as interações hidrodinâmicas e eleva a resistência interna do meio particulado, reduzindo a velocidade de sedimentação no regime impedido.

Esse comportamento é consistente com a formulação de Kynch (BÜRGER, 2000; CONCHA, 2014), segundo a qual a velocidade de sedimentação é função decrescente da concentração volumétrica de sólidos.

5.4.1 Identificação do regime linear e determinação da velocidade média

A análise gráfica permitiu identificar o trecho aproximadamente linear entre as alturas de 0,36 m e aproximadamente 0,24 m, intervalo adotado como representativo do regime de sedimentação impedida sob condição de recirculação.

A velocidade média de sedimentação livre foi determinada considerando esse intervalo para cada dosagem avaliada. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Velocidade média de sedimentação no regime linear sob condição de recirculação

Dosagem de flocculante (g/t)	Velocidade (m/h)
6	5,82
8	5,41
10	5,18

Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se que, mesmo na condição com maior dosagem de flocculante, as velocidades médias obtidas foram inferiores às registradas na condição base. Esse resultado evidencia que o aumento da concentração de sólidos exerce influência predominante sobre a cinética de sedimentação, reduzindo a taxa de deslocamento da interface sólido-líquido.

A dosagem de 6 g/t apresentou o melhor desempenho cinético também sob recirculação, sugerindo que a faixa ótima de floculação permaneceu semelhante, ainda que o comportamento global da suspensão tenha sido alterado pelo aumento da fração sólida.

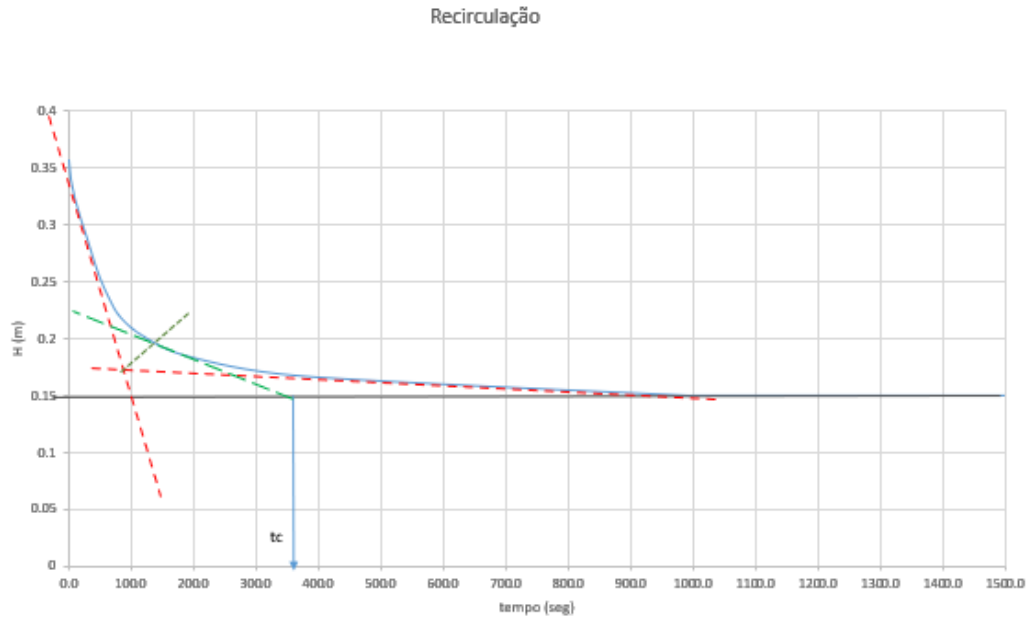
5.4.2 Determinação do tempo crítico pelo método gráfico

O tempo crítico (t_c) foi determinado para a dosagem de 6 g/t, considerada a mais representativa da condição operacional avaliada.

A determinação foi realizada pelo método gráfico da Bissetriz, mediante traçado das retas tangentes aos trechos correspondentes aos regimes de sedimentação

impedida e compressão do leito, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Determinação gráfica do tempo crítico (t_c) para a condição com recirculação (6 g/t).



Fonte: Autoria própria (2026).

O valor obtido para a condição de recirculação foi de 360s, correspondente a 0,10h.

Comparativamente à condição base (0,08 h), observa-se aumento do tempo crítico sob recirculação, indicando maior tempo necessário para que a suspensão atinja a transição para o regime de compressão.

Esse resultado é coerente com o aumento da concentração de sólidos e com a intensificação das interações estruturais no interior da suspensão, que tendem a retardar o adensamento inicial.

5.4.3 Determinação da razão de espessamento – Condição com recirculação

Considerando a altura inicial da coluna de polpa (H_a) igual a 0,356 m e a concentração de sólidos da alimentação (C_a) igual a 0,722 t/m³. Para a condição de recirculação, com tempo crítico de 0,10 h, obteve-se um valor de R igual a 0,39

$m^2/(t/h)$.

O valor inferior de R indica, segundo esse critério, melhor eficiência relativa do processo de espessamento sob maior concentração de sólidos.

Esse resultado evidencia que a razão de espessamento não responde de forma isolada apenas à velocidade no regime linear ou ao tempo crítico, mas sim à combinação entre concentração da alimentação e comportamento cinético do sistema.

5.4.4 Síntese técnica da condição com recirculação

Na condição simulada de recirculação, com concentração inicial de 46,87% de sólidos em massa, observou-se comportamento cinético distinto, compatível com suspensão mais concentrada e estruturalmente mais resistente ao escoamento.

A velocidade média no regime linear foi de 5,82 m/h para a dosagem de 6 g/t, enquanto o tempo crítico determinado foi de 0,10 h, indicando processo de sedimentação mais lento quando analisado sob o ponto de vista exclusivamente cinético.

A razão de espessamento calculada ($R = 0,39 m^2/(t/h)$), entretanto, foi inferior à obtida na condição base. Considerando que valores menores de R indicam maior eficiência relativa segundo o critério adotado, essa condição apresenta desempenho mais favorável sob essa métrica.

O aumento da concentração de sólidos implica modificações reológicas relevantes, como elevação da viscosidade aparente e maior desenvolvimento de estrutura interna da suspensão. Essas alterações reduzem a mobilidade das partículas no regime linear e aumentam a resistência à drenagem do fluido intersticial, influenciando diretamente os parâmetros cinéticos observados.

Assim, embora a condição com recirculação apresente sedimentação mais lenta sob a ótica da velocidade e do tempo crítico, a razão de espessamento indica eficiência relativa superior segundo esse critério específico. Esse comportamento evidencia a complexidade da análise do espessamento em sistemas concentrados, nos quais diferentes parâmetros podem refletir aspectos distintos do desempenho

global.

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SEDIMENTAÇÃO BASE E CONDIÇÃO DE RECIRCULAÇÃO

A análise comparativa entre a condição base (27,58% de sólidos) e a condição com recirculação simulada (46,87% de sólidos) evidencia que a alteração do teor de sólidos exerce influência direta sobre todos os parâmetros cinéticos e estruturais avaliados no processo de espessamento.

Conforme sintetizado na Tabela 4, que apresenta o quadro comparativo entre as duas condições experimentais para a dosagem ótima de 6 g/t, observa-se que a velocidade média de sedimentação no regime linear foi superior na condição base (7,21 m/h) em relação à condição com recirculação (5,82 m/h).

Tabela 4 - Comparação dos parâmetros cinéticos e estruturais para a dosagem de 6 g/t

Parâmetro	Condição Base	Condição com Recirculação
% Sólidos (m/m)	27,58	46,87
Velocidade média no regime linear (m/h)	7,21	5,82
Tempo crítico – t_c (h)	0,08	0,10
Razão de espessamento – R m²/(t/h)	0,65	0,39

Fonte: Autoria própria (2026).

A diferença observada na velocidade de sedimentação está associada ao aumento da concentração de sólidos e aos efeitos do reingresso de floculante residual no sistema. Com a elevação da fração volumétrica de sólidos, intensificam-se as interações partícula-partícula e partícula-fluido, aumentando a resistência ao movimento e reduzindo a função velocidade-concentração descrita pela teoria de

Kynch.

Além disso, o reingresso de floculante residual pode modificar a estrutura dos flocos e a microestrutura da suspensão, influenciando a forma como as partículas se agregam e sedimentam. Esse efeito combinado contribui para a redução da velocidade média de sedimentação observada na condição com recirculação.

O aumento da concentração também se refletiu no tempo crítico. A condição base apresentou t_c de 0,08 h, enquanto a condição com recirculação apresentou t_c de 0,10 h. O maior tempo necessário para atingir a transição ao regime de compressão indica que a suspensão mais concentrada, aliada à presença de floculante residual, apresenta maior resistência estrutural interna e menor mobilidade coletiva das partículas no regime impedido.

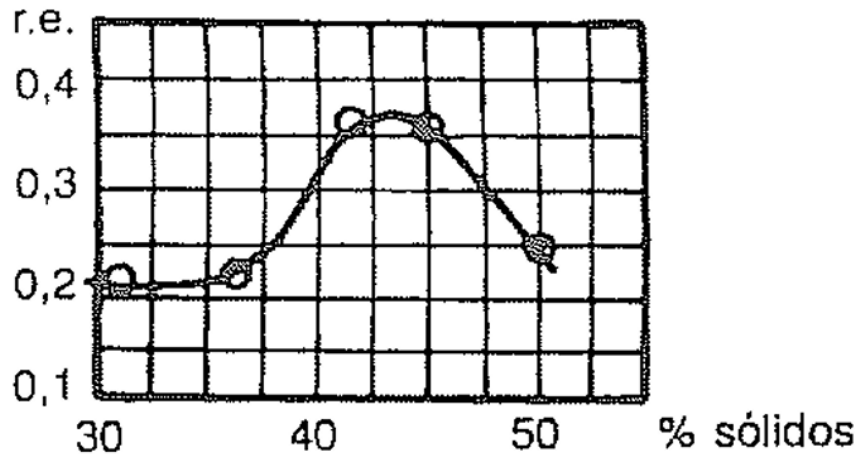
Sob a perspectiva reológica, esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da viscosidade aparente e ao desenvolvimento de uma estrutura interna mais pronunciada na suspensão. Suspensões concentradas tendem a apresentar comportamento não newtoniano mais acentuado, com maior resistência ao escoamento e possível incremento da tensão de escoamento. Adicionalmente, o reingresso de floculante pode intensificar a formação de estruturas mais complexas, reforçando a resistência ao escoamento. Essas características reduzem a velocidade relativa entre as fases sólida e líquida e influenciam diretamente a cinética de sedimentação.

Entretanto, a análise da razão de espessamento (R) conduz a uma interpretação distinta. O valor de R foi de $0,65 \text{ m}^2/(\text{t/h})$ para a condição base e $0,39 \text{ m}^2/(\text{t/h})$ para a condição com recirculação. Considerando que a razão de espessamento é inversamente proporcional à concentração de sólidos e diretamente proporcional ao tempo crítico, observa-se que, embora o aumento do tempo crítico tenda a reduzir R , o aumento expressivo da concentração de sólidos exerce influência predominante. Dessa forma, a diminuição de R na condição com recirculação indica maior eficiência de adensamento, ou seja, maior capacidade do sistema em remover água da polpa.

Esse comportamento torna-se mais evidente quando analisado à luz da relação entre razão de espessamento e teor de sólidos apresentada por Chaves (2004),

ilustrada na Figura 14, que demonstra a tendência geral de variação de R em função da concentração da alimentação.

Figura 14 – Gráfico r.e. x % de sólidos.



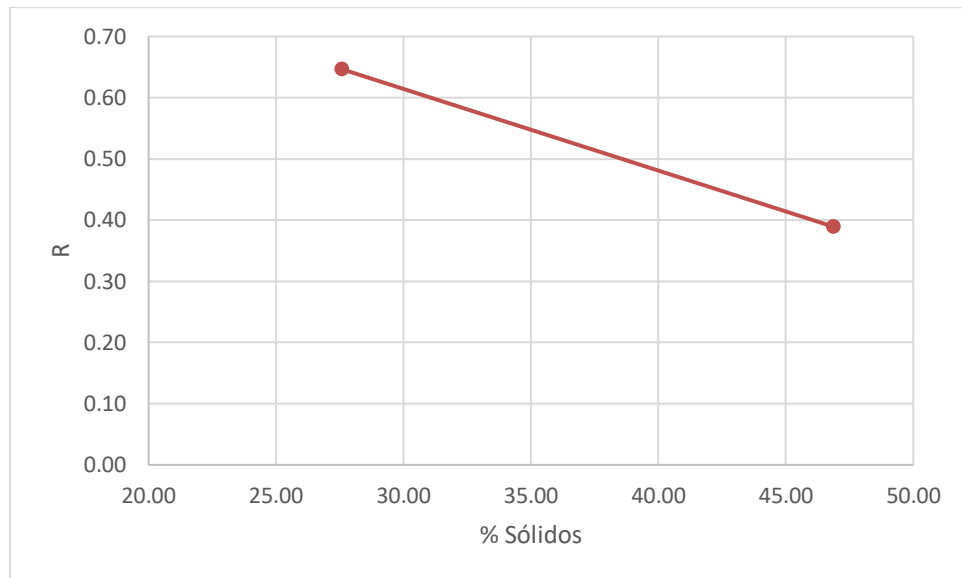
Fonte: Chaves (2004).

A equação da razão de espessamento é influenciada de forma inversa pela porcentagem de sólidos e diretamente pelo tempo crítico (t_c). Dessa forma, o aumento da concentração de sólidos tende a reduzir o valor de R, enquanto o aumento do tempo crítico tende a elevá-lo. Com isso, observa-se a curva conceitual apresentada por Chaves na literatura o qual não temos um comportamento linear e, sim, uma curva. Inicialmente, à medida que a porcentagem de sólidos aumenta, a razão de espessamento tende a se manter aproximadamente constante, o que pode ser atribuído ao aumento proporcional do tempo crítico. Em uma etapa posterior, mesmo com o contínuo aumento da concentração de sólidos, verifica-se um incremento em R, indicando que o crescimento do tempo crítico passa a exercer maior influência relativa sobre a equação. Por fim, a razão de espessamento volta a diminuir, sugerindo uma estabilização ou um aumento menos significativo do tempo crítico em comparação ao avanço da porcentagem de sólidos.

Com base nos dados experimentais obtidos neste estudo, foi construída a curva correspondente ao sistema avaliado, apresentada na Figura 15, na qual são plotados os valores de R em função do teor de sólidos para as duas condições investigadas. E

embora o número de pontos seja limitado observa-se, uma tendência de variação da razão de espessamento com a concentração de sólidos.

Figura 15 - Relação experimental entre razão de espessamento (R) e % de sólidos para o concentrado de chumbo avaliado



Fonte: Autoria própria (2026).

A relação observada indica que a razão de espessamento não depende exclusivamente da velocidade de sedimentação livre, mas do comportamento global do sistema, especialmente durante a transição para o regime compressivo. Nesse contexto, o aumento da concentração de sólidos desloca o ponto crítico na curva de sedimentação e altera a relação entre o transporte de sólidos e a capacidade de adensamento.

Adicionalmente, a recirculação introduz efeitos associados ao reingresso de material previamente processado, o que pode modificar a estrutura da suspensão e influenciar o desempenho do espessamento. Esses efeitos se manifestam de forma integrada, afetando simultaneamente a cinética de sedimentação, o tempo de transição entre regimes e os parâmetros derivados utilizados na análise do processo.

Dessa forma, a comparação entre as condições evidencia que diferentes indicadores capturam aspectos distintos do fenômeno: enquanto a velocidade média de sedimentação e o tempo crítico estão mais diretamente relacionados à mobilidade das partículas no regime impedido, a razão de espessamento reflete o efeito

combinado da concentração de sólidos e da dinâmica global do sistema.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sendo assim, considerando que o objetivo deste estudo foi avaliar os impactos da recirculação de polpa no processo de espessamento, os resultados indicam que a recirculação influencia diretamente o comportamento do sistema. O aumento da concentração de sólidos promove alterações no comportamento reológico da suspensão, reduzindo a mobilidade das partículas.

Adicionalmente, o possível reingresso de floculante residual associado à recirculação pode modificar a estrutura dos flocos e a organização interna da suspensão. Como consequência, observam-se alterações tanto nos parâmetros cinéticos quanto nos parâmetros estruturais da sedimentação.

Os resultados evidenciam ainda que diferentes indicadores podem apresentar tendências distintas, reforçando a necessidade de uma análise integrada para a correta interpretação do desempenho do espessamento. Nesse contexto, a escolha dos parâmetros de avaliação deve considerar o objetivo operacional do processo, seja a obtenção de maiores velocidades de sedimentação ou de um material mais adensado.

Por fim, recomenda-se a construção de uma curva experimental mais abrangente da razão de espessamento em função do teor de sólidos, com maior número de pontos experimentais. Essa abordagem pode contribuir para o aprofundamento do entendimento do fenômeno e para a determinação da faixa de concentração de sólidos mais adequada para operação do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOGER, D. V. Rheology of suspensions and slurries. *Chemical Engineering Science*, v. 64, n. 22, p. 4525–4536, 2009.

BÜRGER, R. Phenomenological foundation and mathematical theory of sedimentation–consolidation processes. *Chemical Engineering Journal*, v. 80, n. 1–3, p. 177–188, 2000.

BÜRGER, R.; CONCHA, F. Mathematical model and numerical simulation of the settling of flocculated suspensions. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 24, n. 6, p. 1005–1026, 1998.

CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. São Paulo: Signus Editora, 2004.

CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios: desaguamento, espessamento e filtragem. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. v. 2.

COE, H. S.; CLEVINGER, G. H. Methods for determining the capacities of settling tanks. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 8, n. 9, p. 768–777, 1916.

CONCHA, F. Solid–liquid separation in the mining industry. Dordrecht: Springer, 2014.

CONCHA, F.; BÜRGER, R. A century of research in sedimentation and thickening. *KONA Powder and Particle Journal*, n. 19, p. 38–70, 2001.

DAHLSTROM, D. A. Dewatering methods. In: DARLING, P. (ed.). *SME mining engineering handbook*. 3. ed. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011. p. 1391–1412.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (org.). *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 639–694.

GUIMARÃES, F. A. V. Revisão dos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

NGUYEN, T.; HEATH, A.; WITT, P. Population balance – CFD modelling of fluid flow, solids distribution and flocculation in thickener *feedwells*. *Minerals Engineering*, v. 64, p. 10–21, 2014.

SCHNEIDER, C. L.; ALVES, V. K.; GOBBO, O.; GONÇALVES, K. Cálculo de parâmetros de modelo de sedimentação para simulação e escalonamento de espessadores de polpa. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 15, n. 2, p. 166–175, 2018.

SCHNEIDER, C. L.; ALVES, V. K.; GOBBO, O.; GONÇALVES, K. Implementação de um sistema para o escalonamento de espessadores de polpa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2017, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: IBRAM, 2017.

SVAROVSKY, L. *Solid–liquid separation*. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

TALMADGE, W. P.; FITCH, E. B. Determining thickener unit areas. *Industrial & Engineering Chemistry*, v. 47, n. 1, p. 38–41, 1955.

TORQUATO, N. C. Espessadores no beneficiamento de minério de ferro. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 11, n. 2, p. 142–150, 2014.

ZHANG, L. et al. Effect of flocculant dosage on the settling properties and underflow concentration of thickener for flocculated tailing suspensions. *Water Science & Technology*, v. 88, n. 1, p. 304–318, 2023. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2023.191>.