



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

VALÉRIA APARECIDA BANANAL

**EFEITO DO EMPREGO DE FLOCULANTE, VARIAÇÃO DO pH E
PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NA SEDIMENTAÇÃO DE MATERIAL COM
FAIXA GRANULOMÉTRICA ABAIXO DE 74 μm .**

ARAXÁ/MG

2017

VALÉRIA APARECIDA BANANAL

**EFEITO DO EMPREGO DE FLOCULANTE E VARIAÇÃO DO pH e
PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NA SEDIMENTAÇÃO DE MATERIAL COM
FAIXA GRANULOMÉTRICA ABAIXO DE 74 μm .**

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

Orientador: Prof. Me. Leandro Henrique dos Santos.

ARAXÁ/MG

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

VALÉRIA APARECIDA BANANAL

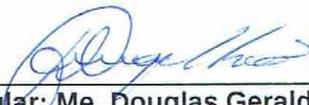
EFEITO DO EMPREGO DE FLOCULANTE E VARIAÇÃO DO pH e
PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NA SEDIMENTAÇÃO DE
MATERIAL COM FAIXA GRANULOMÉTRICA ABAIXO DE 74 μm .

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

Araxá, 20 de Junho de 2017.



Presidente e Orientador: Me. Leandro Henrique dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG –
Unidade Araxá



Membro Titular: Me. Douglas Geraldo Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG –
Unidade Araxá



Membro Titular: Esp. Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG –
Unidade Araxá

AGRADECIMENTOS

Nenhuma batalha é vencida sozinha. No decorrer desta luta algumas pessoas estiveram ao meu lado e percorreram este caminho como verdadeiros soldados, estimulando para que eu buscasse a minha vitória e conquistasse o meu sonho.

Agradeço primeiramente a minha mãe Aparecida Sebastiana Bananal, aos meus padrinhos Silene de Souza Accácio e Domingos Accácio Filho por sempre me apoiarem em meus estudos. Tudo que consegui até hoje devo a vocês.

Aos meus irmãos, Emerson Moura Bananal e Vanessa Cristina Bananal por serem meus exemplos.

Ao Luiz Cláudio Pereira minha imensa gratidão pela parceria e apoio incondicional nos meus melhores e piores momentos. Por sempre ter acreditado mais em mim do que eu mesma, devo grande parte dessa conquista a você.

Ao Professor Me. Leandro Henrique Santos, meu orientador, pelo tempo dedicado no desenvolvimento deste trabalho, pela paciência em se dispor diante as minhas dúvidas e conceder gentilmente seu conhecimento e profissionalismo, indispensáveis para a minha formação profissional.

A todos os meus professores que dedicaram a transmitir umas das maiores virtudes que se pode ter: o conhecimento. Suas atitudes, ensinamentos, exemplos e incentivos colaboraram para que eu fosse além dos meus limites e medos. Hoje, sei que os melhores mestres não são aqueles que nos ensinaram as respostas, mas sim aqueles que nos ensinaram a questionar, a duvidar, a pensar e a sonhar.

As minhas companheiras Bianca Alves, Mariana Menezes e Rafaela Santos, por estarem comigo desde o começo e por serem meu principal apoio nesta jornada.

Por fim, a cada um que fez parte deste pedaço da minha história, minha eterna gratidão.

RESUMO

Testes de sedimentação em bancada a partir de amostras de minério com granulometria inferior a 74 μ m foram investigados nesse trabalho. O principal objetivo foi identificar o melhor conjunto de parâmetros operacionais em ensaios que fossem capazes de otimizar a sedimentação em batelada. Os testes foram realizados de maneira a confrontar resultados práticos em escala de bancada. As variáveis analisadas foram porcentagem de sólidos da polpa (entre 5%, 10%, 15%, 20% e 25%), pH do meio (variando entre 3,0, 5,0, 7,0, 9,0 e 11,0) e a adição de floculante (dosagem de 25g/t). A partir dos resultados obtidos, nos quais foram analisados velocidade de sedimentação (cm/s), altura da camada de espuma (cm) e porcentagem de sólidos no clarificado, foi identificado que as melhores condições foram obtidas para porcentagem de sólidos igual a 15%, pH do meio igual a 5,0 com adição de floculante. Porém, foi possível perceber que as variáveis porcentagem de sólidos e pH do meio não se apresentaram como os parâmetros mais relevantes para os dois cenários testados, o que realmente interferiu nos testes foi o acréscimo do reagente. Através dos testes foi possível concluir que a adição de reagente floculante interfere na velocidade de sedimentação, já que passa a existir a formação de flocos maiores que sedimentam com mais facilidade devido à ação da gravidade.

Palavras chaves: Sedimentação. Espessamento. Floculante. Granulometria fina.

ABSTRACT

In this study, a sedimentation bench tests from ore samplings with particle size less than 74 μ m were investigated. The main objective was to identify the best set of operational parameters in trials that could optimize batch sedimentation. The variables analyzed were percentage of pulp solids (between 5%, 10%, 15%, 20% and 25%), pH of the medium (ranging from 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 and 11.0) and addition of flocculant (dosage of 25g / t). From the results obtained, in which the sedimentation velocity (cm / s), height of the foam layer (cm) and percentage of solids in the clarified were analyzed, it was identified that the best conditions were obtained for percentage of solids equal to 15%, PH of the medium equal to 5.0 with addition of flocculant. However, it was possible to notice that the variables solids percentage and pH of the medium were not presented as the most relevant parameters for the two scenarios tested, what actually interfered in the tests was the addition of reagent. Through the tests, it was possible to conclude that the addition of flocculating reagent interferes with sedimentation velocity, since the formation of larger flocs that sediment more easily due to the action of gravity occurs.

Keywords: Sedimentation. Thickening. Flocculant. Fine particle size.

Lista de Ilustrações

Figura 1: Localização da jazida.....	4
Figura 2: Etapas do ensaio de proveta (a) e curva de sedimentação resultante do ensaio (b).....	8
Figura 3: Etapas de um teste de proveta.	9
Figura 4: Esquema operacional de um espessador contínuo convencional.	12
Figura 5: Esquema operacional de um espessador de lamelas.	13
Figura 6: Mecanismo de formação de flocos por meio de pontes com molécula do polímero.	15
Figura 7: Teste de Sedimentação em proveta sem adição de floculante.	20
Figura 8: Exemplos de papéis filtrantes depois das filtragens dos clarificados.	21
Figura 9: Teste de sedimentação em proveta com adição de floculante.	23
Figura 10: Curva de decantação.....	24
Figura 11: Curvas de Sedimentação com a variação de pH - Sem adição de Floculante. (a) 5% de sólidos, (b) 10% de sólidos, (c) 15% de sólidos, (d) 20% de sólidos e (e) 25% de sólidos.....	26
Figura 12: Altura da camada de espuma (cm) x Porcentagem de Sólidos, com variação de pH -Sem adição de floculante.....	28
Figura 13: % de Sólidos no Clarificado x % de Sólidos, com variação de pH - sem adição de floculante.	29
Figura 14: Curvas de sedimentação com variação de pH - Com adição de floculante. (a) 5% Sólidos, (b) 10% Sólidos, (c) 15% Sólidos, (d) 20% Sólidos e (e) 25% Sólidos.	31
Figura 15: Altura da camada de espuma (cm) x % Sólidos, com variação de pH - Com adição de floculante.	33
Figura 16: % Sólidos no Clarificado x % Sólidos, com variação de pH - Com adição de floculante.....	33
Figura 17: Comparativo entre os dados obtidos como melhores para cada cenário, com e sem floculante. (a) Curva de sedimentação para 5% sólidos em pH 5,0 sem adição de floculante 15% sólidos em pH 5,0 com adição de floculante, (b) Altura da camada de espuma (cm) para 5% sólidos em pH 5,0 sem adição de floculante e 15% sólidos em pH 5,0 com adição de floculante e (c) % sólidos no clarificado para 5% sólidos em pH 5,0 sem adição de floculante e 15% sólidos em pH 5,0 com adição de floculante.....	36

Lista de tabelas e quadros

Tabela 1 :Velocidades de sedimentação de acordo com a modulação de porcentagem de sólidos e pH's. - Sem adição de floculante.....	27
Tabela 2 : Comparativo entre valores encontrados para 5%, 10% e 15% de sólidos. ..	29
Tabela 3 : Velocidade de sedimentação de acordo com a modulação de porcentagem de sólidos e pH's. - Com adição de floculante.....	32
Tabela 4 : Comparativo entre valores encontrados para 15% e 20% de sólidos.....	34
Tabela 5 : Comparativo entre os parâmetros ótimos com e sem adição de floculante.	35

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1. Complexo Carbonatítico do Barreiro	4
2.2. Separação Sólido-Líquido.....	4
2.3. Sedimentação.....	6
2.3.1. Distribuição de tamanhos e formas das partículas	6
2.3.2. Aglomeração das partículas (coagulação e floculação).....	7
2.3.3. Concentração de sólidos da polpa.....	7
2.4. Testes de proveta.....	8
2.5. Espessadores.....	11
2.5.1. Espessador contínuo convencional.....	11
2.5.2. Espessador de alta capacidade (super espessadores).....	12
2.5.3. Espessador de lamelas.....	13
2.6. Floculação	13
2.6.1. Mecanismos de floculação	15
2.6.1.1. Ligações de hidrogênio.....	16
2.6.1.2. Interações hidrofóbicas	16
2.6.1.3. Interações eletrostáticas	16
2.6.1.4. Ligações químicas	16
2.6.1.5. Ligações coordenadas.....	17
2.7. Efeito do pH do meio.....	17
3. Metodologia	18
3.1. Testes de sedimentação em proveta	18
3.1.1. Cenário 1: amostras sem adição de floculante.....	18
3.1.2. Cenário 2: amostras com adição de floculante.....	21
4. Resultados e discussões	25
4.1. Cenário 1: sem adição de floculante.....	25
4.2. Cenário 2 – com adição de floculante.	30
4.3. Análise comparativa entre os testes com e sem adição de floculante. ..	34
5. Conclusão	38
6. Sugestões de Trabalhos Futuros.....	39
7. Referências	40

1. Introdução

A separação sólido-líquido é uma das mais importantes operações de Beneficiamento mineral, visando alcançar a adequação de porcentagem de sólidos da polpa mineral e proporcionando uma redução de custos operacionais. Além disso, a água retirada pode ser reutilizada em etapas anteriores do processo de beneficiamento de minérios. A operação se dá, em geral, pela separação de sólidos suspensos na água através da sedimentação, nos chamados espessadores ou tanques de sedimentação (FRANÇA E MASSARANI, 2004).

O projeto de um equipamento para realização da separação das fases sólida e líquida depende das necessidades específicas do processo, bem como as características da alimentação. Quando se trabalha com polpas minerais, é importante que a operação de separação sólido-líquido seja escolhida mediante a observação das características da polpa, como a porcentagem de sólidos. As polpas diluídas, com baixas concentrações de sólidos, geralmente requerem algum tipo de pré-tratamento antes da etapa de desaguamento, já as com maior concentração podem ser processadas diretamente nos equipamentos de desaguamento propriamente ditos.

Quando se fala em concentração de sólidos na polpa, torna-se importante atentar-se à quantidade de partículas finas presentes na mesma. Quando a polpa de minérios a ser tratada contém grande quantidade de partículas finas ou ultrafinas, a atenção dedicada à medida da área superficial específica ganha destaque, passando a ser mais significativa (FRANÇA E MASSARANI, 2010).

Deve-se levar em consideração o fato de que, quanto mais finas as partículas da polpa a ser tratada, menor será a capacidade e a eficiência de separação. Ainda deve ser considerado que a distribuição de tamanho de partículas com faixa estreita de partículas ultrafinas é mais fácil de ser tratada do que as que apresentam distribuição mais ampla (FRANÇA E MASSARANI, 2010). No que diz respeito à forma, quanto mais as partículas se distanciam da forma esférica, mais elas vão afetar o processo de separação sólido-líquido.

Quando se trata da sedimentação de partículas de menor granulometria, torna-se interessante o uso de coagulantes e floculantes para aumentar a eficiência da operação, já que a formação de coágulos ou flocos podem aumentar a velocidade de sedimentação dos particulados.

Assim como existe a necessidade do uso de coagulantes e floculantes para acelerar a velocidade de sedimentação, o controle da porcentagem de sólidos também é responsável pela sua variação.

Suspensões com altas porcentagens de sólidos apresentam características diferentes daquelas em que uma única partícula se encontra em suspensão. Isso ocorre devido ao fenômeno de sedimentação impedida, fazendo com que a taxa de sedimentação das partículas deixe de ser constante e se torne decrescente (FRANÇA E MASSARANI, 2004).

Tratando-se de sedimentação de partículas com granulometria abaixo de $74\mu\text{m}$, o valor de pH influencia diretamente nos mecanismos de floculação. De acordo com Baltar (2010, p. 577) “a influência do pH está relacionada principalmente à ionização da molécula do polímero e à carga elétrica da superfície mineral”. Além disso, deve ser levada em consideração a porcentagem de sólidos, que interfere diretamente na operação de espessamento do material, já que existe maior necessidade de aglomeração de partículas. Dessa forma, se torna possível otimizar o processo de espessamento desse tipo de material, tornando-o mais eficiente com a adição de reagentes e modificando esses parâmetros.

Um dos meios de otimizar o espessamento de material com faixa granulométrica fina seria a adição de floculante. Essa adição de floculante ajudaria na operação de sedimentação, além de determinar parâmetros ótimos de pH e porcentagem de sólidos, para que a operação de espessamento apresente máxima eficiência possível, evitando desgaste do equipamento e proporcionando maior produção de material adensado.

O presente trabalho tem como objetivo verificar o comportamento do material fino (abaixo de $74\mu\text{m}$) quanto à velocidade de sedimentação e qualidade do clarificado. Para isso serão executados testes de sedimentação em amostras de material com faixa granulométrica abaixo de $74\mu\text{m}$.

Depois de discutido de forma clara os processos de sedimentação, suas variáveis e como influenciam na etapa de espessamento do tratamento de

minérios, os testes realizados consistem em análises de velocidade de sedimentação e quantidade de sólidos perdidos no clarificado quando há ou não adição de floculante na polpa e variação de pH e porcentagem de sólidos. Serão realizados testes em dois cenários, sendo estes, empregando a variação da porcentagem de sólidos total da polpa e mantendo a porcentagem de sólidos constante. Através das análises das curvas de sedimentação encontradas, altura da camada de espuma formada e porcentagem de sólidos contidos no clarificado, pretende-se chegar a uma condição ótima entre essas variáveis analisadas para que a operação de espessamento de material com essas especificações granulométricas apresente maior eficiência.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Complexo Carbonatítico do Barreiro

O Complexo Carbonatítico de Araxá, possui estrutura dômica, de forma aproximadamente circular, com um diâmetro de 4,5 quilômetros. Encaixado em xistos e quartzitos, rochas do Grupo Araxá. Localizado a 6 km a sul da cidade de Araxá. Trata-se de um dos mais importantes complexos alcalino-carbonatíticos do mundo, hospedando a maior reserva de nióbio do mundo. O intemperismo químico, devido ao clima da região, resultou no desenvolvimento de uma cobertura de solo espessa no complexo, favorecendo a concentração do fosfato e nióbio explorados na região.

A Figura 1 mostra a localização da região.

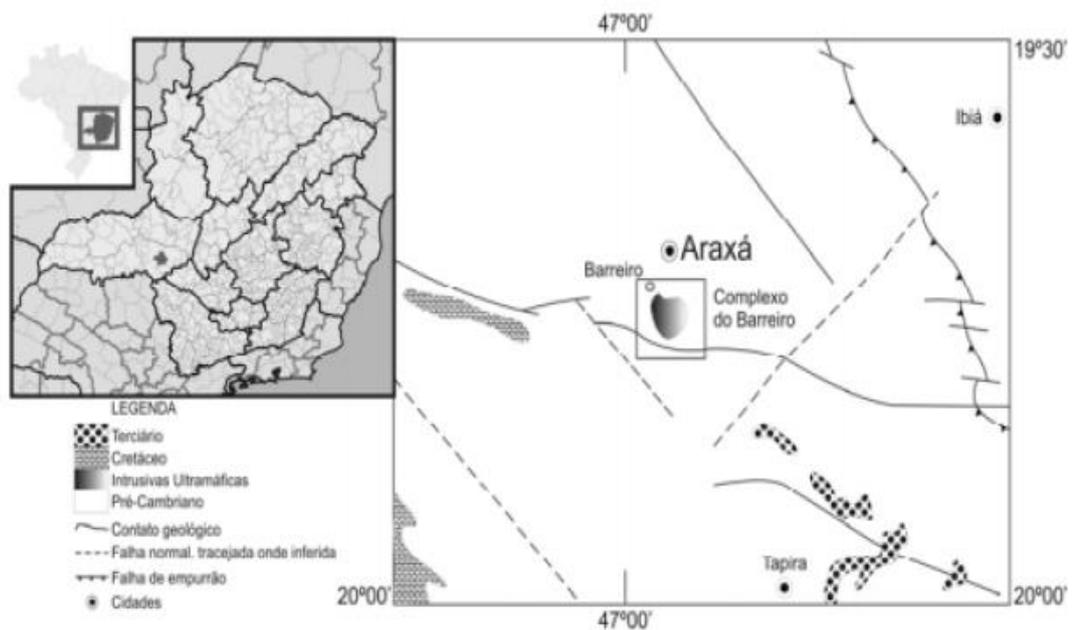


Figura 1: Localização da jazida.

Fonte: RAPOSO e PEREIRA, 2013.

2.2. Separação Sólido-Líquido

Existem diversos processos/operações na indústria mineral, que necessitam, em alguma etapa do processo de beneficiamento, de uma ou mais operações de separação sólido-líquido. Essas são consideradas etapas cruciais de uma planta de tratamento de minérios, já que o projeto de um equipamento para realização separação das fases sólido e líquida depende das necessidades específicas do processo, assim como as características da alimentação.

A separação sólido-líquido têm como objetivos a recuperação/recirculação de água; a preparação de polpas com porcentagem de sólidos adequada a etapas subsequentes; o desaguamento final de concentrados e; a preparação de rejeitos para o descarte. (VALADÃO, 2007)

Diversos fatores podem influenciar no projeto e na operação de sistemas de separação sólido-líquido. Dentre elas, podem ser destacados: a distribuição granulométrica do sólido; área superficial do sólido; forma da partícula; características de superfície do sólido; forma da partícula; características de superfície do sólido; porcentagem de sólidos na polpa; e viscosidade do líquido. Maior proporção de materiais em faixas granulométricas mais finas pode representar uma redução na eficiência de separação e um maior consumo de reagentes agregantes. (VALADÃO, 2007)

No caso de suspensões/polpas minerais contendo partículas menores que $10\mu\text{m}$, especialmente na fração argila ($<2\mu\text{m}$), a operação de separação sólido-líquido é extremamente afetada pelo efeito de dispersão das partículas, causado pelo movimento browniano característico dos colóides, o qual dificulta a sedimentação. Nestes casos, deve-se avaliar a necessidade de aglomeração prévia das partículas (coagulação/floculação) antes de submetê-las à operação de separação propriamente dita. A presença de partículas ultrafinas tem efeito na eficiência de espessamento, reduz as taxas de filtração e podem acumular mais umidade do que a desejada nas tortas oriundas da filtração (FRANÇA *et al.*, 2010).

2.3. Sedimentação

A Sedimentação é uma das operações de separação sólido-líquido baseadas na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão. A remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional, o que oferece ao processo as características de baixo custo e grande simplicidade operacional. A larga utilização industrial dos sedimentadores promove um crescente interesse no conhecimento do dimensionamento e operação desses equipamentos, com a finalidade de melhorar a sua utilização e eficiência no atendimento aos objetivos operacionais. (FRANÇA *et al.*, 2010)

São diversos fatores que podem afetar a sedimentação de uma suspensão aquosa de partículas. Dentre elas, a natureza das partículas (tamanho, distribuição, forma, densidade específica, etc.), porcentagem de sólidos na suspensão, pré-tratamento da suspensão (para auxiliar na sedimentação) e dimensionamento do tanque de suspensão (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

Distribuição de tamanhos e formas das partículas A distribuição granulométrica é uma das variáveis mais importantes na determinação da eficiência e custo das operações de separação sólido-líquido. Atentando-se para a consideração de que quanto mais finas forem as partículas presentes na polpa a ser tratada, menor será a eficiência de separação.

Ainda deve ser avaliado que a classificação de tamanho de partículas com faixa estreita de partículas ultrafinas é mais fácil de ser tratada do que as que apresentam distribuição mais ampla (FRANÇA E MASSARANI, 2010). No que diz respeito a forma, quanto mais as partículas se distanciam da forma esférica, mais elas vão influenciar no processo de separação sólido-líquido.

2.3.1. Aglomeração das partículas (coagulação e floculação)

Os processos de aglomeração de partículas, que têm papel importante na melhoria da eficiência das operações de separação sólido-líquido, são convencionalmente descritos pelos mecanismos de coagulação e floculação. O uso de agentes aglomerantes no processo de sedimentação pode ser de fundamental ajuda, principalmente quando se trata de sedimentação de partículas finas, já que a formação de coágulos ou flocos podem aumentar a velocidade de sedimentação do processo.

Segundo França e Massarani (2004), as suspensões floculadas apresentam diversas características diferentes da suspensão de partículas. Uma delas corresponde à taxa de sedimentação, consideravelmente maior em relação à suspensão original. Isto ocorre devido à grande quantidade de água contida no floco, especificamente em seus interstícios. Assim, características como forma e densidade são muito pouco relacionadas com as características das partículas originais. Para a previsão de novas taxas de sedimentação, sendo esta inferência de extrema complexidade, faz-se necessário o conhecimento de um novo fator de forma e densidade, que ainda são determinados por métodos empíricos.

2.3.2. Concentração de sólidos da polpa

A porcentagem de sólidos influencia na velocidade de sedimentação, no desempenho da filtração e na floculação (influência sobre as características dos flocos formados).

Suspensões com altas porcentagens de sólidos apresentam características diferentes daquelas em que uma única partícula se encontra em suspensão. Isso ocorre devido ao fenômeno de sedimentação impedida, que faz com que a taxa de sedimentação das partículas deixe de ser constante e se torne decrescente (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

Segundo França e Casqueira (2007), quando há várias partículas sedimentando no meio fluido, existe a probabilidade de mais de uma partícula ter a mesma trajetória. Assim, há também partículas de diferentes tamanhos e/ou densidades sedimentando ao mesmo tempo, com velocidades terminais diferentes. Dessa forma, quanto maior a porcentagem de sólidos em uma

suspensão, menor será a velocidade de sedimentação dessas partículas sólidas (efeito população), pois a taxa de sedimentação deixa de ser constante para tornar-se decrescente.

2.4. Testes de proveta

Segundo França e Massarani (2010), a operação de sedimentação é baseada em fenômenos de transporte, em que a partícula sólida em suspensão está sujeita a ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento. O mecanismo de sedimentação descontínua auxilia na descrição do mecanismo contínuo, com o uso do teste de proveta, que é baseado no deslocamento da interface superior da suspensão com o tempo (Figura 2). Durante esse teste pode ser observada a co-existência de três regiões distintas. Sendo estas, a região de líquido clarificado, de sedimentação livre e de compactação. Algumas considerações físicas devem ser estabelecidas, a fim de caracterizar cada região:

- Na região de líquido clarificado, as partículas estão distantes uma das outras devido à alta diluição de polpa, podendo sedimentar praticamente sem interferências mútuas;
- Na região de sedimentação livre, as partículas sólidas sedimentam sem que haja interação entre elas; a velocidade de sedimentação e a concentração de sólidos são consideradas constantes;
- Na região de compactação, as partículas já começam a interagir entre si; é notada a variação da concentração de sólidos ao longo dessa região, devido à desaceleração sofrida por essas partículas.

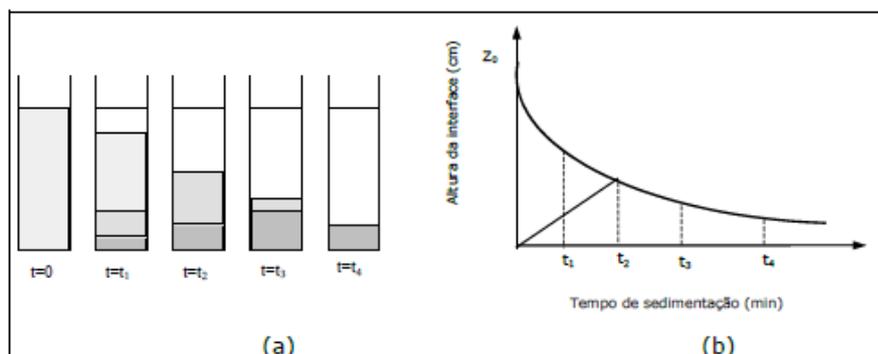


Figura 2: Etapas do ensaio de proveta (a) e curva de sedimentação resultante do ensaio (b).

Fonte: FRANÇA E CASQUEIRA, 2007.

Uma amostra previamente homogeneizada da suspensão é colocada em um tubo graduado de seção constante (proveta) e deixada em repouso (Figura 3). Pode-se verificar que, após certo tempo, as partículas mais grossas depositam no fundo do tubo e as partículas mais finas continuam em suspensão, enquanto as intermediárias ficam distribuídas em diversas alturas de acordo com a sua granulometria (CHAVES *et al.*, 1996).

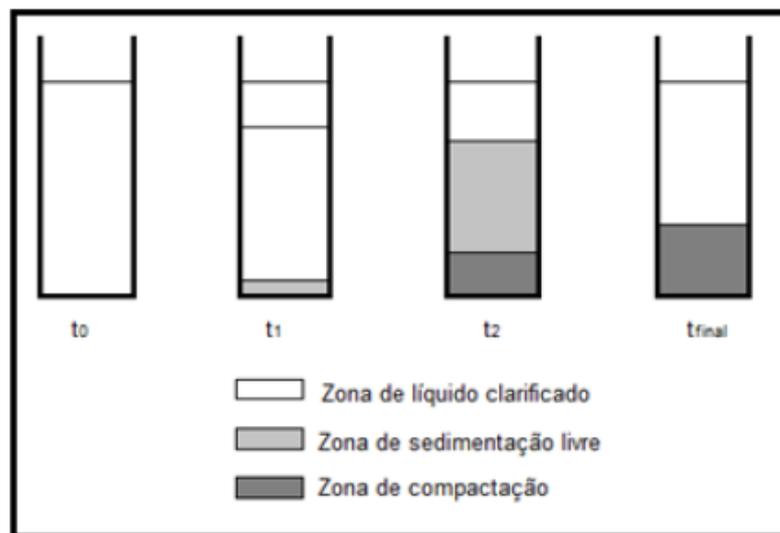


Figura 3: Etapas de um teste de proveta.
Fonte: FRANÇA E MASSARANI, 2004.

Em outros casos, ocorre uma situação especial, em que as partículas (ou flocos), mesmo sendo heterogêneas, se unem umas às outras e formam uma estrutura que afunda em conjunto, aprisionando outras partículas durante o percurso descendente. Todas as partículas, então, sedimentam juntas (mesma velocidade de sedimentação) e forma-se uma interface nítida entre a fase de sedimentante e sobrenadante, esse regime é chamado de sedimentação por fase. Nessa etapa, o líquido em torno das partículas (ou flocos) é empurrado para cima pelo movimento descendente delas, quase como se estivesse ocorrendo uma filtração da água através do leito descendente de partículas. (CHAVES *et al.*, 2013)

O regime de sedimentação por fase ocorre em partículas floculadas. Pode ocorrer também quando a porcentagem de sólidos, ou seja, a concentração de partículas na polpa aumenta e é atingida uma condição em que as partículas ficam tão próximas umas das outras que elas sedimentam em conjunto, aprisionando as demais nessa estrutura e fazendo-as afundar com a

mesma velocidade. Então, é formada uma interface nítida entre a polpa em sedimentação e o líquido sobrenadante.

Segundo Oliveira *et al.*, (2004), o teste fundamenta-se na movimentação da interface superior da suspensão que se desloca em relação ao tempo. Geralmente estes testes são realizados em provetas de 1000 mL ou 2000 mL. Em função do gradiente da altura desta interface em relação ao tempo, pode-se inferir sobre a operação de sedimentação das partículas em suspensão nesta polpa.

A princípio a polpa é mantida sempre em agitação, mantendo as partículas em suspensão e a porcentagem de sólidos uniforme dentro da proveta. Logo após o fim da agitação, as partículas mais grossas passam a sedimentar se depositando no fundo da proveta formando uma camada de sólidos, no decorrer do tempo as partículas de granulometria mais fina passam a sedimentar sem interação entre si. Desde o início da sedimentação das partículas, pode ser observado o surgimento de uma região de líquido livre de partículas sólidas na parte superior da proveta, região conhecida como zona de clarificação.

Com o decorrer do teste, são observadas variações na altura das regiões. As regiões de líquido clarificado e de compactação tornam-se maiores devido ao desaparecimento da região de sedimentação livre. Em seguida é atingido um ponto onde existe apenas uma região de sólidos (compactação) e uma região de líquido clarificado. A partir desse ponto o processo de sedimentação consiste numa compressão lenta dos sólidos, que expulsa o líquido existente entre essas partículas para a região de líquido clarificado. A expulsão do líquido promove a acomodação das partículas sólidas, que pode ser observada por meio de uma pequena variação na altura da região de compactação.

Segundo França e Casqueira (2007), a movimentação descendente das partículas ou flocos em uma polpa, num ensaio de proveta, deverá ser apenas função do tempo e da concentração dos sólidos.

O regime de compressão ocorre quando há uma grande densidade de polpa ou elevada tendência de formação de agregados. As estruturas que se formam são capazes de suportar mecanicamente as camadas superiores devido à sua rigidez (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

O ensaio de teste de proveta, apesar de parecer muito simples, serve como base não só para o dimensionamento de espessadores de qualquer tamanho, mas também para o estabelecimento das condições ótimas de aplicação de pH, dosagem de floculante e porcentagem de sólidos (CHAVES *et al.*, 1996).

2.5. Espessadores

Espessamento é uma operação de separação sólido-líquido de polpas, por sedimentação em grande escala. Essa operação é feita num tanque denominado espessador. O propósito seria receber uma polpa diluída (entre 5% e 10% de sólidos) e obter um produto adensado (*underflow*) tão quanto seja possível bombear ou obter (grosseiramente, entre 50% e 75% de sólidos (CHAVES *et al.*, 2013).

Segundo Chaves *et al.* (2013), a função principal de um espessador é adensar o material alimentado até um valor conveniente para a operação subsequente (bombeamento, filtragem, condicionamento, etc.). Outra função – cada vez mais importante, em decorrência da crescente preocupação ambiental – seria permitir a recirculação imediata de toda ou, pelo menos, de parte da água de processo.

Os tipos de espessadores variam em função da geometria ou forma da alimentação do equipamento. Basicamente são tanques cilíndrico-cônicos construídos em concreto armado ou aço, equipados com um mecanismo de raspagem, para carrear o material sedimentado até o ponto de retirada, o que corresponde ao maior custo do equipamento. Os braços raspadores (*rakes*), também chamados de ancinhos ou rastelos, são acoplados à estrutura de sustentação do tubo central de alimentação da suspensão e devem ser projetados com base no torque aplicado ao motor. Devem também ter flexibilidade para suportar diferentes volumes e tipos de cargas impostas (FRANÇA E MASSARANI, 2010).

2.5.1. Espessador contínuo convencional

O espessador contínuo convencional consiste em um tanque provido de um sistema de alimentação de suspensão e outro de retirada do espessado (raspadores), dispositivos para descarga do *overflow* e do *underflow* (Figura 4).

Esse tipo de espessador contínuo corresponde ao representante mais utilizado industrialmente (FRANÇA E MASSARANI, 2010).

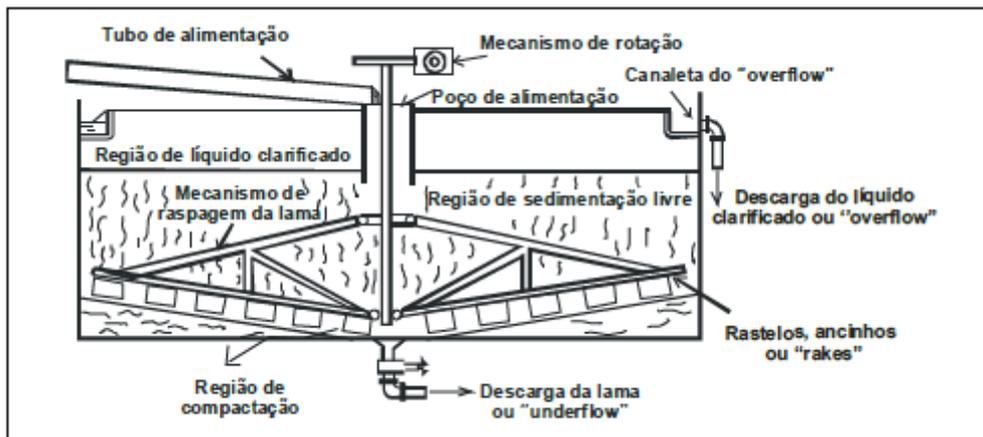


Figura 4: Esquema operacional de um espessador contínuo convencional.
Fonte: FRANÇA E MASSARANI, 2010.

O espessador contínuo apresenta constituição simples e custo de operação reduzido. Em compensação, o custo de implantação se apresenta elevado. Os primeiros espessadores convencionais foram projetados para promover a operação de espessamento sem adição de reagente (CHAVES *et al.*, 1996).

2.5.2. Espessador de alta capacidade (super espessadores)

O superespessador tem, como premissa básica, operar com uso de floculante. Tal fato proporcionou algumas mudanças de projeto e o equipamento resultante difere muito do espessador convencional, especialmente na sua altura aumentada e na sua área reduzida (CHAVES *et al.*, 2013).

O mecanismo de espessamento, então, corresponde à sedimentação por fase, obtida mediante ao uso de floculantes. O princípio de funcionamento dos superespessadores é, portanto, diferente do verificado nos espessadores convencionais. O fato de a alimentação ser feita a meia altura implica que o volume destinado à clarificação do sobrenadante é maior que no espessador convencional e a clarificação do *overflow* é melhor. (CHAVES, *et al.*, 2013).

2.5.3. Espessador de lamelas

O espessador de lamelas é um conceito novo e que reduz consideravelmente a área demandada. De acordo com CHAVES *et al.* (2013), no espessador convencional, a partícula, para espessar, tem de percorrer todo o percurso entre o feedwell e o fundo do tanque. No espessador de lamelas (Figura 5), o princípio operacional é totalmente diferente. O volume de polpa é dividido por meio de placas inclinadas. A partícula sedimenta até encontrar a superfície de uma placa e, a partir daí, passa a escorregar sobre ela. Superpondo um grande número de placas, dispostas umas sobre as outras, as partículas sólidas passam a depositar-se sobre essas placas, o percurso que cada partícula percorre diminui e a eficiência do uso do volume disponível aumenta consideravelmente, até mesmo a clarificação é melhorada.

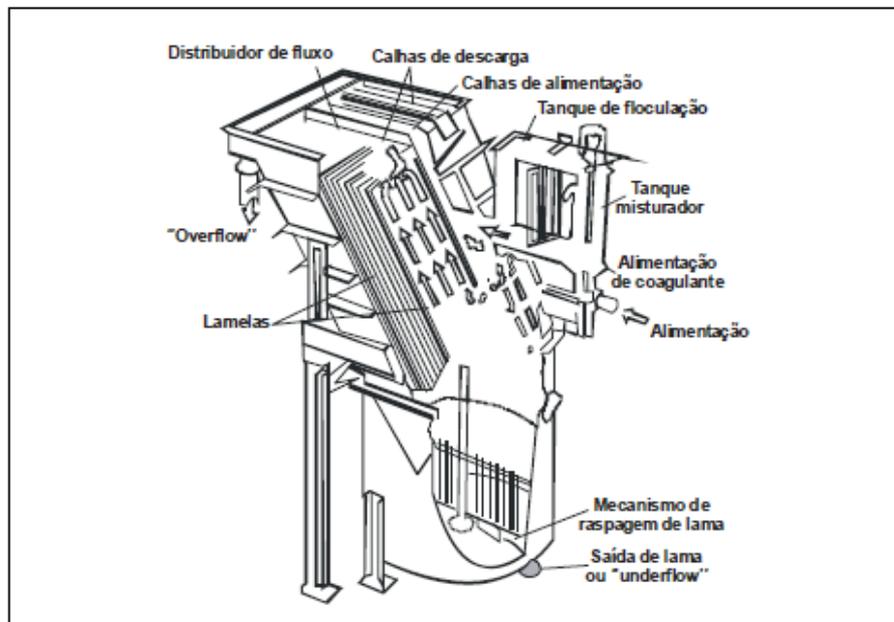


Figura 5: Esquema operacional de um espessador de lamelas.
Fonte: França e Massarani (2010, p. 654).

2.6. Floculação

Os minerais em faixas granulométricas finas (menores que $74\mu\text{m}$) usualmente respondem mal às operações tradicionais de separação sólido-líquido. A agregação de partículas, empregada visando melhorar o desempenho desta operação na indústria, pode ser realizada com o uso de coagulantes ou floculantes. Nestas faixas granulométricas, o fenômeno da dupla camada elétrica e forças intermoleculares controlam a interação entre as partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Os floculantes são adicionados nas polpas com objetivo de aumentar as forças atrativas e diminuir o efeito das forças repulsivas. Estes reagentes favorecem a interação entre as partículas, provocando formação de flocos grandes e aumentando a velocidade de sedimentação. Logo, o emprego destes reagentes torna possível uma maior velocidade de sedimentação das partículas, além de melhor visualização das interfaces e uma boa clarificação do líquido (SOUSA, 2012).

Em relação à dosagem de floculante a ser adicionada em polpas minerais, torna-se necessário que exista um limite prático para este parâmetro. Se o floculante for adicionado em excesso relação ao limite prático, as partículas ficarão recobertas pelo polímero. Como resultado, sua ação será anulada e o mesmo passará atuar como dispersante, tendo assim, efeito contraditório ao esperado (FERREIRA, 2012).

A escolha do reagente deve levar em conta o tamanho da cadeia molecular, natureza iônica do polímero, densidade iônica e características químicas dos grupos ativos da molécula. O tipo de floco desejado irá influenciar na escolha do reagente. Durante a operação de espessamento torna-se importante a presença de flocos grandes, na filtração os flocos devem ser compactos, com o mínimo de água no seu interior. A forma de adição do floculante influi no seu desempenho. A solução diluída do floculante deve ser adicionada à polpa sob forte agitação, reduzindo o tempo de homogeneização completa. Após o início de ruptura da molécula do polímero, a agitação deve ser reduzida ao máximo (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Os floculantes atuam em um nível molecular na superfície das partículas reduzindo as forças repulsivas e aumentando as forças atrativas. Assim, favorecem a formação de agregados de partículas muito finas que, conforme elevem as respectivas massas, atingem uma velocidade de sedimentação maior.

Polímeros sintéticos utilizados para promover a formação de flocos são denominados floculantes. Em geral, se apresentam como polímeros sintéticos que podem ser neutros ou iônicos.

São polímeros solúveis em água, que na maioria das vezes, apresentam peso molecular elevado. Um polímero é uma macromolécula formada por vários segmentos unitários denominados monômeros. No geral, polímeros podem ser

neutros ou apresentar grupamentos ionizáveis. Nesse caso, são denominados polieletrólitos que de forma mais específica são identificados como catiônicos ou aniônicos (BALTAR, 2010).

De forma geral entende-se que os floculantes mais eficientes para o processo de espessamento são os aniônicos, por apresentar cadeias com alto peso molecular (BALTAR, 2010).

2.6.1. Mecanismos de floculação

A floculação pode ocorrer por dois mecanismos principais: formação de pontes ou floculação por reversão de carga localizada.

A floculação por formação de pontes ocorre quando são utilizados polímeros de alto peso molecular, não iônicos ou com carga elétrica de mesmo sinal em relação à superfície do mineral. Somente uma parte da molécula interage diretamente com o sólido, sendo que o restante da cadeia estende-se em forma de braços que poderá fazer contato com outras partículas (Figura 6). Assim, os flocos formados podem se unir aos outros formando agregados maiores. Os flocos produzidos a partir da floculação por pontes apresentam estruturas abertas, onde as partículas não se tocam e a ligação ocorre por meio da macromolécula floculante. O crescimento dos flocos ocorre de maneira rápida, formando flocos grandes e flexíveis, de forma helicoidal, retendo quantidade expressiva de água. Apesar da presença de água acarretar uma redução na densidade média do floco, a velocidade de sedimentação seria compensada pelo grande tamanho do mesmo (BARREDA, 2008).

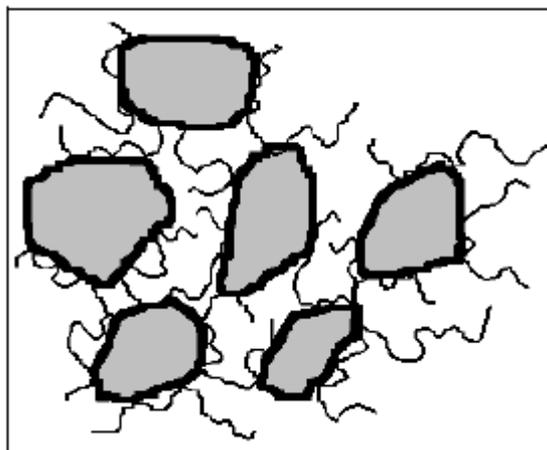


Figura 6: Mecanismo de formação de flocos por meio de pontes com molécula do polímero.
Fonte: Baltar (2010, p. 581).

A floculação por reversão de carga acontece quando o polímero usado (polímero de baixa ou média massa molecular) possui carga contrária à superfície da partícula. Assim, o polímero se dispersa na polpa mineral, sendo capaz de reverter a carga elétrica na adsorção, resultando em uma superfície com cargas heterogêneas (REIS, 2010).

Os polímeros podem adsorver na superfície do mineral de várias formas, entre elas podem ser destacadas as ligações de hidrogênio, interações hidrofóbicas, interações eletrostáticas, ligações químicas e ligações coordenadas.

2.6.1.1. Ligações de hidrogênio

Apresenta-se como o principal mecanismo de adsorção dos polímeros na superfície mineral. O átomo de hidrogênio por possuir pequeno tamanho tem tendência a tornar-se polarizado positivamente. Em razão dessas características, pode interagir com átomos vizinhos eletronegativos, promovendo ligação (BALTAR, 2010).

2.6.1.2. Interações hidrofóbicas

A adsorção por interações hidrofóbicas só acontece através das cadeias hidrocarbônicas do polímero, sendo sempre possível nos casos em que a superfície mineral é naturalmente hidrofóbica ou foi hidrofobizada. Nos sistemas onde prevalece esse tipo de interação, a densidade de adsorção do polímero aumenta com a hidrofobização da superfície (BALTAR, 2010)

2.6.1.3. Interações eletrostáticas

São caracterizadas por serem o tipo de interações principais que ocorrem com floculantes catiônicos, acontecem sempre que cargas opostas entre o polímero e a superfície do mineral (BALTAR, 2010).

2.6.1.4. Ligações químicas

A adsorção vai ser formada por meio de ligações covalentes ou iônicas, formando uma adsorção específica que pode contribuir para uma floculação seletiva (BALTAR, 2010).

2.6.1.5. Ligações coordenadas

Complexos ou quelatos são formados graças a adsorção do polímero na superfície do mineral, resultado de ligações coordenadas (BALTA, 2010).

2.7. Efeito do pH do meio

Segundo Baltar (2010), a influência do pH está relacionada principalmente à ionização da molécula do polímero e à carga elétrica da superfície mineral. Além disso, o pH tem grande influência no estabelecimento de ligações de hidrogênio, principal mecanismo de adsorção de polímeros.

Além dos cuidados que devem ser tomados em relação à variável floculante, torna-se necessário atentar ao controle de pH da polpa mineral. Geralmente, os depósitos são formados em condições de pH neutro ou levemente ácido (FIGUEIREDO, 2000). O controle do mesmo no decorrer dos testes acontece com auxílio de um pHmetro, sendo que a solução a ser adicionada para a adequação do pH na polpa varia de acordo com a exigência estabelecida.

3. Metodologia

As amostras utilizadas nos testes de sedimentação foram cedidas por uma empresa de mineração de Araxá (MG). Foram cedidos 5Kg de amostra seca, já na granulometria adequada aos experimentos (abaixo de 74 μ m) e com densidade de sólido já especificada (3,6g/cm³).

Toda a preparação da amostra e os testes foram realizados nas instalações da empresa que cedeu as amostras para os testes.

Após a obtenção da amostra, foi realizado o peneiramento desta para verificação da distribuição granulométrica da mesma. Foi utilizada uma peneira (A Bronzinox, telas metálicas e sintéticas) com abertura de 200#, para confirmação que todo material seria passante.

3.1. Testes de sedimentação em proveta

Os testes de sedimentação em proveta foram divididos em dois cenários. O primeiro seria na ausência de floculante, e o segundo, com adição de floculante

3.1.1. Cenário 1: amostras sem adição de floculante.

Para a adequação de pH das polpas que foram preparadas para os testes, foram utilizadas soluções ácidas e básicas para adequação e um pHmetro (Digimed, pHmetro digital) para leitura. Os valores de pH das polpas a serem empregadas nos testes foram ajustados em 3,0; 5,0; 7,0; 9,0 e 11,0, com o auxílio de ácido fluorssilícico (18%) e solução alcalina (10%).

As polpas foram preparadas com variação de porcentagem de sólidos, variando entre 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Esses valores foram determinados a partir da literatura. Segundo Chaves et al (2013), o propósito de um espessador seria receber uma polpa diluída (entre 5% e 10% de sólidos) e obter um produto adensado (*underflow*) tão adensado quanto seja possível bombear ou obter (grosseiramente entre 50% e 75% de sólidos).

A variação da porcentagem de sólidos foi feita a partir da equação 1, através da qual será determinada a densidade da polpa.

$$\% \text{ sol} = \frac{ds}{dp} \left(\frac{dp-1}{ds-1} \right) \quad (1)$$

Foi mantido um volume de polpa constante (2 litros, correspondente ao volume da proveta utilizada) para o cálculo da massa de polpa, utilizando a densidade da polpa encontrada, através da equação 2.

$$mp = dp * vp \quad (2)$$

Finalmente, calculou-se a massa de sólidos através da equação 3

$$\% sol = \frac{ms}{mp} \quad (3)$$

De posse da massa de sólidos que deveria ser adicionada para se obter uma polpa com volume de 2L de cada porcentagem de sólidos predeterminada, foi executada a adequação de pH de cada proveta. Pois foi julgado mais eficiente fazer adequação de pH de volumes menores, devido a maior facilidade de adequação do mesmo com o auxílio de um pHmetro.

Para o primeiro cenário de testes (sem adição de floculante) foram preparadas 25 polpas dentro das variações de porcentagem de sólidos e pH citados anteriormente.

Após a preparação das polpas foram realizados os referidos testes de sedimentação, sem adição de floculante. A realização dos testes consistiu em fixar um pedaço de fita crepe no lado externo da proveta que fosse suficiente para cobrir a altura que a polpa alcançava. Por observação do comportamento da sedimentação da polpa foi determinado que a altura da camada compactada seria medida a cada 5 minutos (300 segundos). Com o uso de um cronômetro, o tempo foi registrado, juntamente com a variação da altura da camada compactada marcada na fita que havia sido fixada na proveta inicialmente (Figura 7). O fim do teste foi determinado assim que a variação da altura da camada se tornou tão pequena que foi possível considerar que não havia mais sedimentação.



Figura 7: Teste de Sedimentação em proveta sem adição de floculante.

Os testes de sedimentação em proveta para o primeiro cenário teve duração total de 40 minutos (2400 segundos).

Ao final de cada teste de sedimentação em proveta, foi coletada uma determinada quantidade do clarificado para que pudesse ser pesado, com a finalidade de se obter a massa de polpa e, posteriormente, passar por um processo de filtragem. Assim, após o teste realizado, seria possível determinar a massa de sólidos presente no clarificado através de pesagem (Figura 8) e, a partir de então, calcular a porcentagem de sólidos do mesmo com auxílio da equação 3.

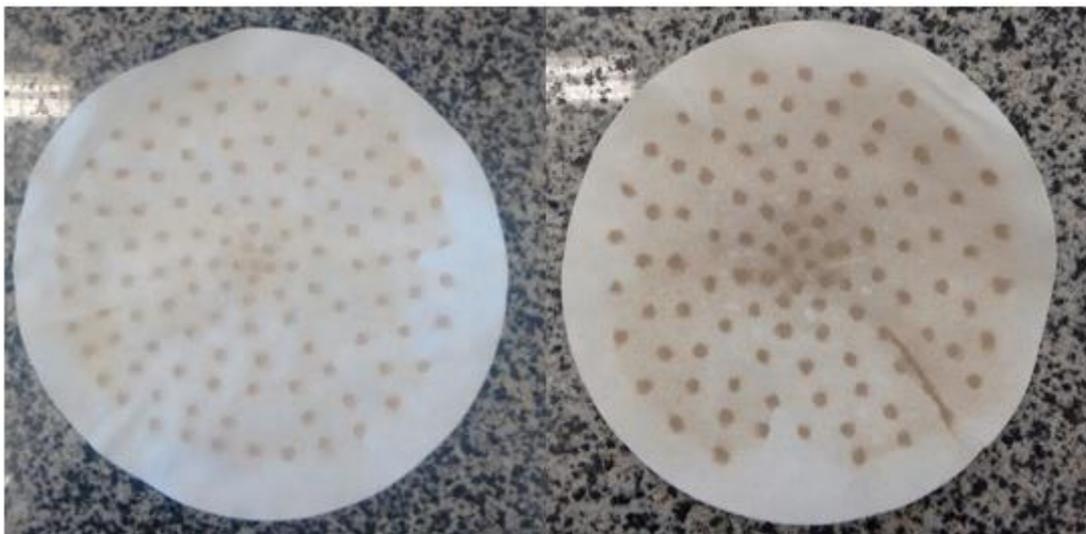


Figura 8: Exemplos de papéis filtrantes depois das filtrações dos clarificados.

3.1.2. Cenário 2: amostras com adição de floculante

Para a preparação das polpas referentes a esse cenário de testes, foi seguida a mesma metodologia descrita para o cenário anterior. De posse das polpas prontas, foi executada a adição de um volume de floculante determinado a partir da massa de sólidos de cada polpa, em função da dosagem a ser estudada em cada ensaio.

Para a realização dos testes de sedimentação em proveta, foi utilizado um Floculante x, disponibilizado pela empresa onde foram realizados os testes. O reagente testado corresponde a um polímero aniônico líquido solúvel em água, com concentração de 0,123%. A escolha desse floculante é justificada pela literatura, segundo BALTAR (2010, p.567). Segundo ele, "os floculantes mais eficientes em operações de espessamento são os polieletrólitos aniônicos com cadeia linear e alto peso molecular".

A dosagem do reagente que deveria ser adicionada a cada polpa foi calculada a partir do valor de massa de sólidos contido nessas. Seria adicionado à polpa uma dosagem de 25g/ton de floculante. Ou seja, para cada tonelada de sólidos presente, seria necessária uma proporção de 25 gramas do floculante. Logo, de acordo com a massa de sólidos presente, obtêm-se a massa de reagente que deverá ser adicionada, cuja concentração é igual a 0,123%, ou seja, 1,23g/L. Dessa forma, é possível determinar a proporção da referida dosagem em volume (ml), como mostrado na equação 4.

$$V_{floc} (ml) = \frac{Massa_{floc} (g)}{1,23} * 1000 \quad (4)$$

Após a adição de floculante, o pH foi verificado novamente (pHmetro) para constatar se não havia sofrido alteração devido a adição do reagente. Quando houve alteração, o pH foi reajustado com o auxílio das soluções ácidas e básicas citadas anteriormente.

Com as polpas preparadas, foram iniciados os testes de sedimentação em proveta para esse cenário, novamente com observação do comportamento de sedimentação da polpa agora com adição de floculante. Sendo assim, foi determinado que a variação da altura da camada compactada seria medida a cada 1 minuto (60 segundos).

Como descrito anteriormente, a variação de altura da camada seguia sendo marcada na fita fixada na parte externa da proveta (Figura 9) até que não houvesse mais variação de altura significativa, o que aconteceu com 12 minutos (720 segundos) de teste. Os dados do teste foram anotados em uma tabela (Tabela 1) semelhante a utilizada para os testes referentes ao cenário 1.

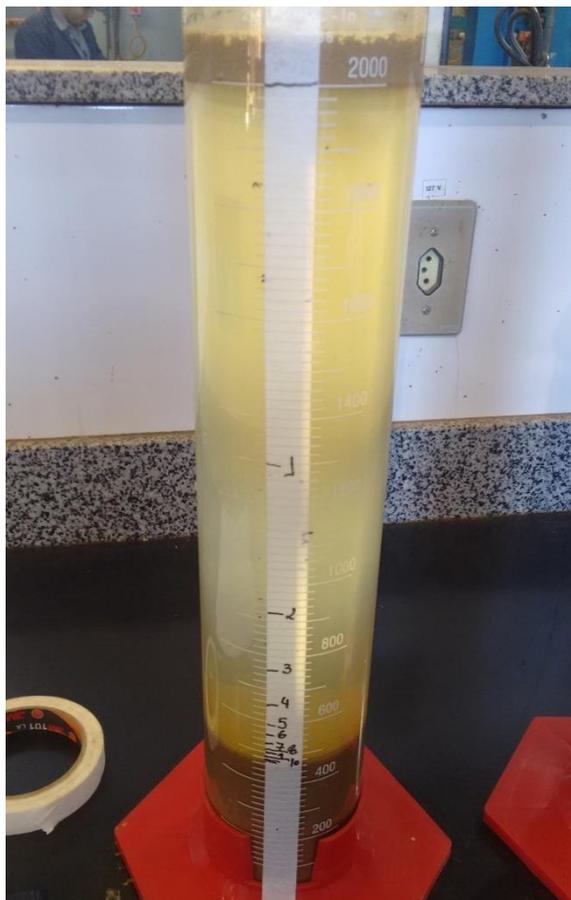


Figura 9: Teste de sedimentação em proveta com adição de floculante.

Assim como já foi descrito para o cenário 1, ao final de cada teste de sedimentação, um determinado volume de clarificado foi filtrado, para posterior cálculo de porcentagem de sólidos no clarificado.

De posse de todos os dados dos 50 testes realizados, foram construídas as curvas de sedimentação, sendo obtidos os valores de altura de camada de espuma, porcentagem de sólidos no clarificado e velocidades de sedimentação para os dois cenários.

A velocidade de sedimentação foi calculada a partir da teoria de Coe e Clevenger (1916), que afirmaram que a razão de espessamento seria função exclusiva da velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre (CHAVES, 2013). A Figura 10, mostra os pontos (altura; tempo) que são utilizados da curva de sedimentação para cálculo da velocidade de sedimentação.

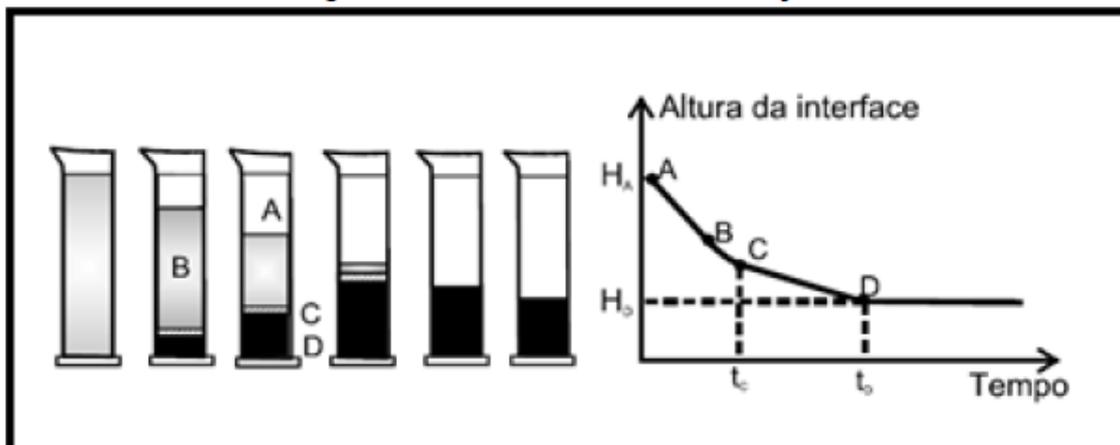


Figura 10: Curva de decantação.
Fonte: OLIVEIRA et al., 2004.

A velocidade de sedimentação é representada pela divisão da diferença de altura pela diferença de tempo dos pontos A e B representados na curva (Figura 10), sendo assim, a velocidade de sedimentação pode ser expressa pela equação 5.

$$V_s = \frac{(H_A - H_B)}{(t_A - t_B)} \quad (5)$$

4. Resultados e discussões

Primeiramente será feita a discussão dos resultados referentes ao cenário 1, em seguida ao cenário 2, e por fim um comparativo entre os dois cenários para verificação de qual e em que condições se apresenta o melhor.

Em todos os testes realizados, a porcentagem de sólidos foi variada em 5, 10, 15, 20 e 25% em massa. Diante disso, e da observação dos testes realizados, pode-se inferir que a porcentagem de sólidos influenciou na velocidade de sedimentação, como esperado. Segundo Coe e Clewenger (1963), para cada concentração inicial de polpa, a velocidade de sedimentação apresenta um valor constante, variando apenas se a concentração de sólidos for alterada. Portanto, verificou-se que a influência direta na variação das velocidades de sedimentação foi causada pela adição ou não de floculante, a variação do pH e a porcentagem de sólidos utilizada.

A influência do pH está relacionada principalmente à ionização da molécula do polímero e à carga elétrica da superfície mineral. Além disso, o pH apresenta grande influência no estabelecimento de ligações de hidrogênio, principal mecanismo de adsorção dos polímeros (DA LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.;FRANÇA,S.C.A., 2010).

Para análise dos testes em ambos cenários foram levados em consideração a velocidade de sedimentação, a altura da camada de espuma e a porcentagem de sólidos contidas no clarificado depois da amostra sedimentada. A partir da análise desses dados, foi possível chegar a uma porcentagem de finos e pH ótimos que apresentem boa velocidade de sedimentação sem apresentar grande perda de sólidos no clarificado.

4.1. Cenário 1: sem adição de floculante

Com os dados obtidos nos testes de sedimentação foram montadas as curvas de sedimentação para cada porcentagem de sólidos em função do pH, apenas (Figura 11).

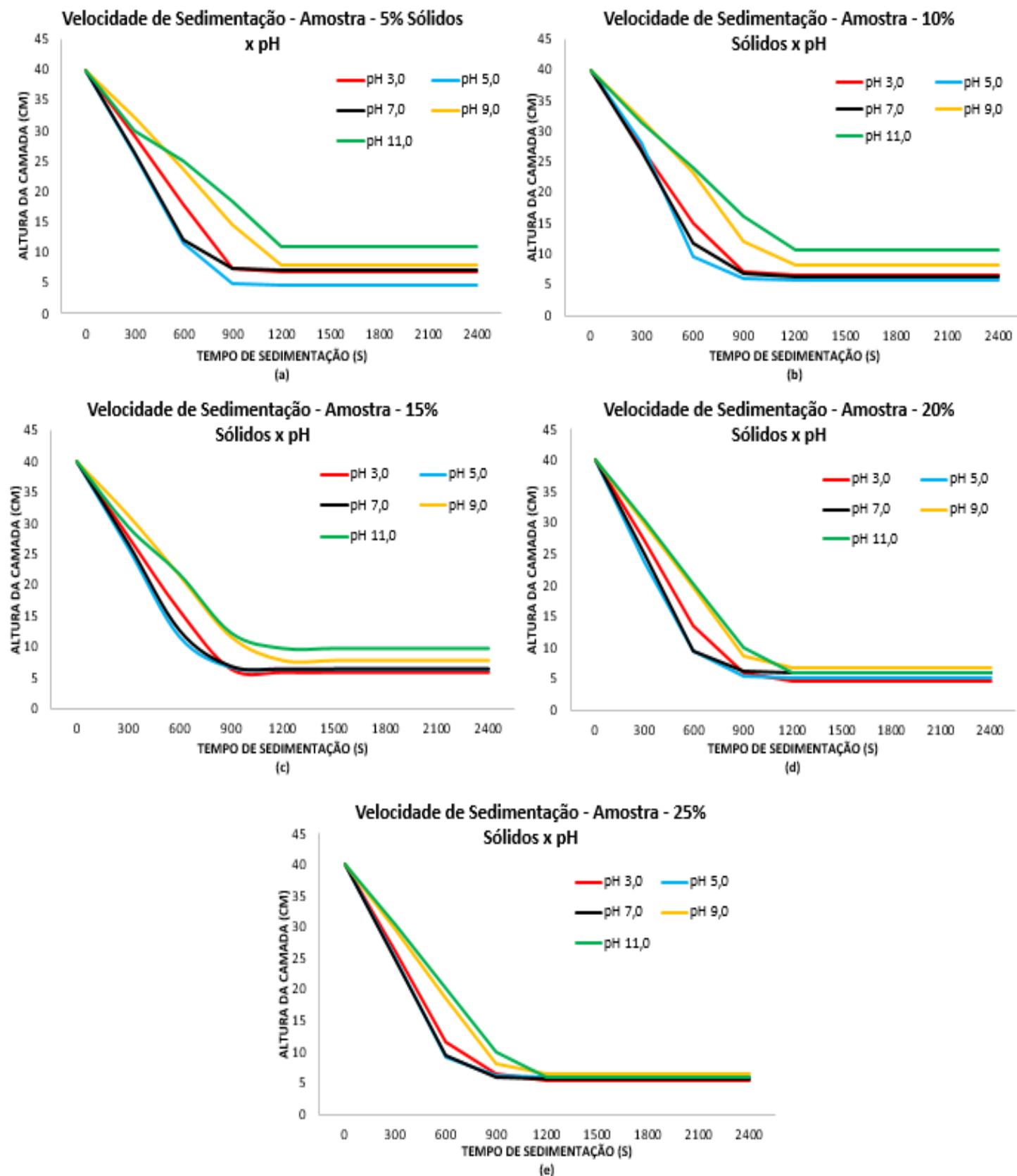


Figura 11: Curvas de Sedimentação com a variação de pH - Sem adição de Floculante. (a) 5% de sólidos, (b) 10% de sólidos, (c) 15% de sólidos, (d) 20% de sólidos e (e) 25% de sólidos.

Com os dados obtidos nos testes de sedimentação, sem adição de floculante, foi possível a determinação da velocidade de sedimentação (cm/s) para cada pH e porcentagem de finos modulados (Tabela 1).

Tabela 1 :Velocidades de sedimentação de acordo com a modulação de porcentagem de sólidos e pH's. - Sem adição de floculante.

Velocidade de Sedimentação (cm/s)		Porcentagem de Sólidos (%)					
		5	10	15	20	25	Média
pH	3	0,024	0,023	0,024	0,024	0,022	0,023
	5	0,039	0,024	0,021	0,020	0,021	0,025
	7	0,021	0,022	0,022	0,021	0,021	0,021
	9	0,020	0,020	0,020	0,016	0,021	0,019
	11	0,016	0,017	0,016	0,019	0,020	0,018
	Média	0,024	0,021	0,021	0,020	0,021	-

A Figura 11 representa os resultados encontrados dos testes de sedimentação, considerando o cenário 1. Cada gráfico representa uma porcentagem de finos, e para cada um deles houve a variação de pH entre 3, 5, 7, 9 e 11, de acordo com o que já foi citado na metodologia descrita.

Nota-se que, com a mudança de pH para cada uma das porcentagens de sólidos apresentada, houve variações não muito significativas nas velocidades de sedimentação. O aumento de velocidade mais relevante, relacionando porcentagem de sólidos e pH, foi para 5% de sólidos em pH 5,0, onde foi obtido uma velocidade de sedimentação de 0,39cm/s.

As condições em que foi usado pH 3,0 com porcentagens de sólidos de 10% a 25% apresentaram velocidades de sedimentação mais elevadas quando comparadas as demais, porém manter um processo de espessamento em pH com acidez elevada requer muitos gastos com modificadores de pH, além de poder ser uma condição prejudicial a etapas seguintes do processo, por poder acarretar desgastes aos equipamentos, tornando-se condições de operação inviáveis. Da mesma forma, as velocidades de sedimentação apresentadas pelas condições de porcentagem de sólidos 10% em pH 5,0 e 7,0 e

porcentagem de sólidos de 15% em pH 7,0, se mostraram mais elevadas também, sendo respectivamente iguais a 0,24cm/s, 0,22cm/s e 0,22cm/s.

De posse dos resultados da análise das curvas de sedimentação, torna-se necessária a comparação desses resultados com os melhores valores para espessura da camada de espuma e porcentagem de sólidos perdido no clarificado. Somente após essa análise, podem ser elencados os valores otimizados de porcentagem de sólidos e pH da polpa ótimos para a operação.

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados referentes à espessura da camada de espuma e porcentagem de sólidos no clarificado para cada porcentagem de sólidos da polpa, em função do pH desta (respectivamente).

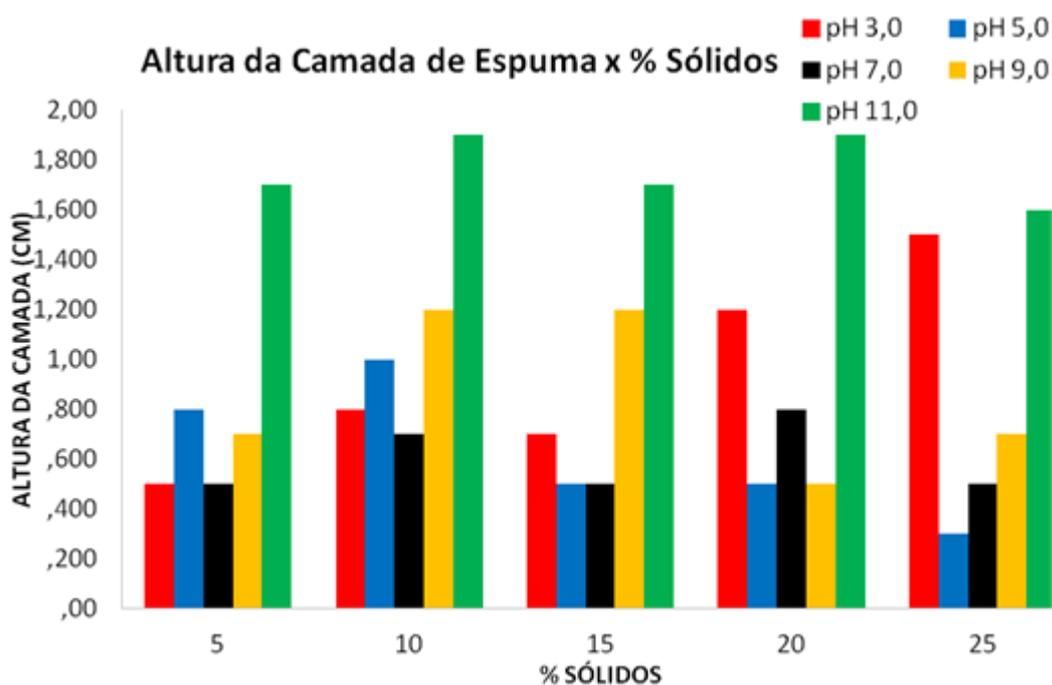


Figura 12: Altura da camada de espuma (cm) x Porcentagem de Sólidos, com variação de pH - Sem adição de flocculante.

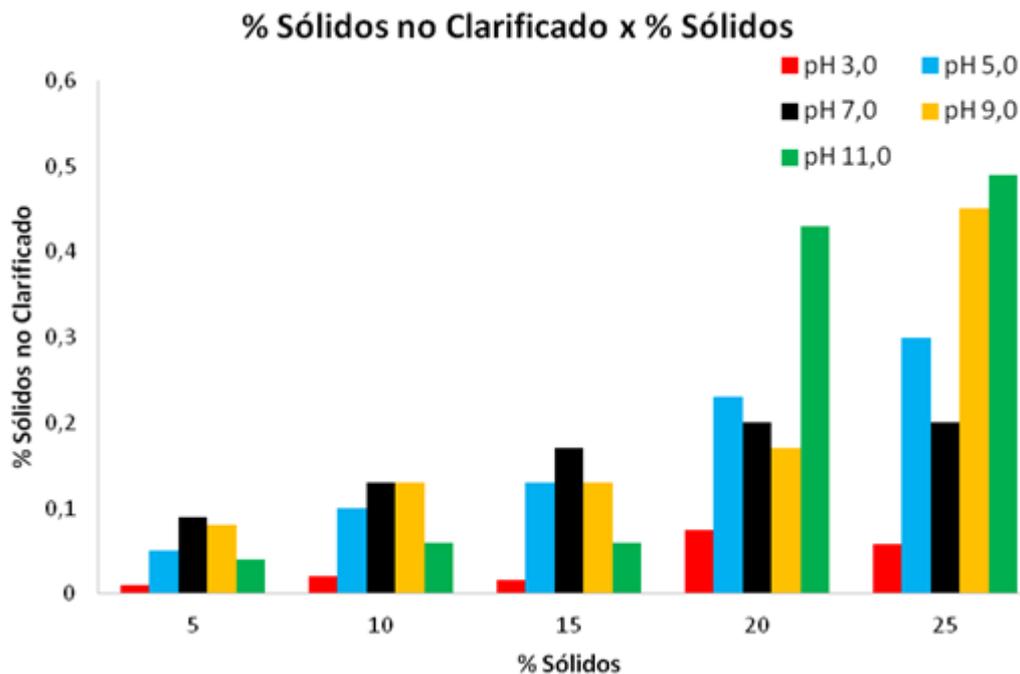


Figura 13: % de Sólidos no Clarificado x % de Sólidos, com variação de pH - sem adição de floculante.

A análise foi feita comparando as combinações dos parâmetros de porcentagem de sólidos e pH encontrados com os melhores valores de velocidade de sedimentação com seus valores correspondentes de altura de camada de espuma e porcentagem de sólidos no clarificado (Tabela 2). Foi possível chegar a uma única combinação de parâmetros (porcentagem de sólidos e pH) que fosse mais eficiente no processo de sedimentação sem adição de floculante.

Tabela 2: Comparativo entre valores encontrados para 5%, 10% e 15% de sólidos.

% Sólidos	pH	Velocidade de Sedimentação (cm/s)	Altura da Camada de Espuma (cm)	% Sólidos no Clarificado
5%	5,0	0,039	0,8	0,13
10%	5,0	0,024	1,0	0,23
	7,0	0,022	0,7	0,20
15%	7,0	0,022	1,5	0,20

Já foi definido anteriormente as combinações de parâmetros que apresentaram os melhores valores de velocidades de sedimentação. Fazendo a comparação da altura da camada de espuma e porcentagem de sólidos para esses mesmos parâmetros pré-determinados, foi observando que a variação presente entre os valores encontrados de porcentagem de sólidos no clarificado pode ser mais relevante que os valores de altura da camada de espuma quando se trata de uma produção em larga escala, portanto seria mais interessante optar pelo conjunto de parâmetros de porcentagem de sólidos e pH que apresentasse menor porcentagem de sólidos no clarificado, o que justificaria menor perda de sólidos. Sendo assim, para o cenário 1, sem adição de flocculante, o melhor conjunto de parâmetros encontrados para acarretar maior eficiência de espessamento seria 5% de sólidos em pH 5,0.

4.2. Cenário 2 – com adição de flocculante.

A mesma sequência de análises descritas anteriormente para o cenário 1 foi realizada para o cenário 2. Como primeira observação, torna-se importante ressaltar a diminuição do tempo de sedimentação quando houve a adição de flocculante na proporção citada na metodologia. Quando comparado ao tempo de sedimentação sem a adição do mesmo, houve uma redução desse tempo em 70%, sendo reduzido de 2400s para 720s.

Primeiramente, foram compilados os dados obtidos durante os testes de sedimentação. A Figura 14 representa a variação da camada compactada para cada porcentagem de sólidos adicionada, de acordo com a variação de pH.

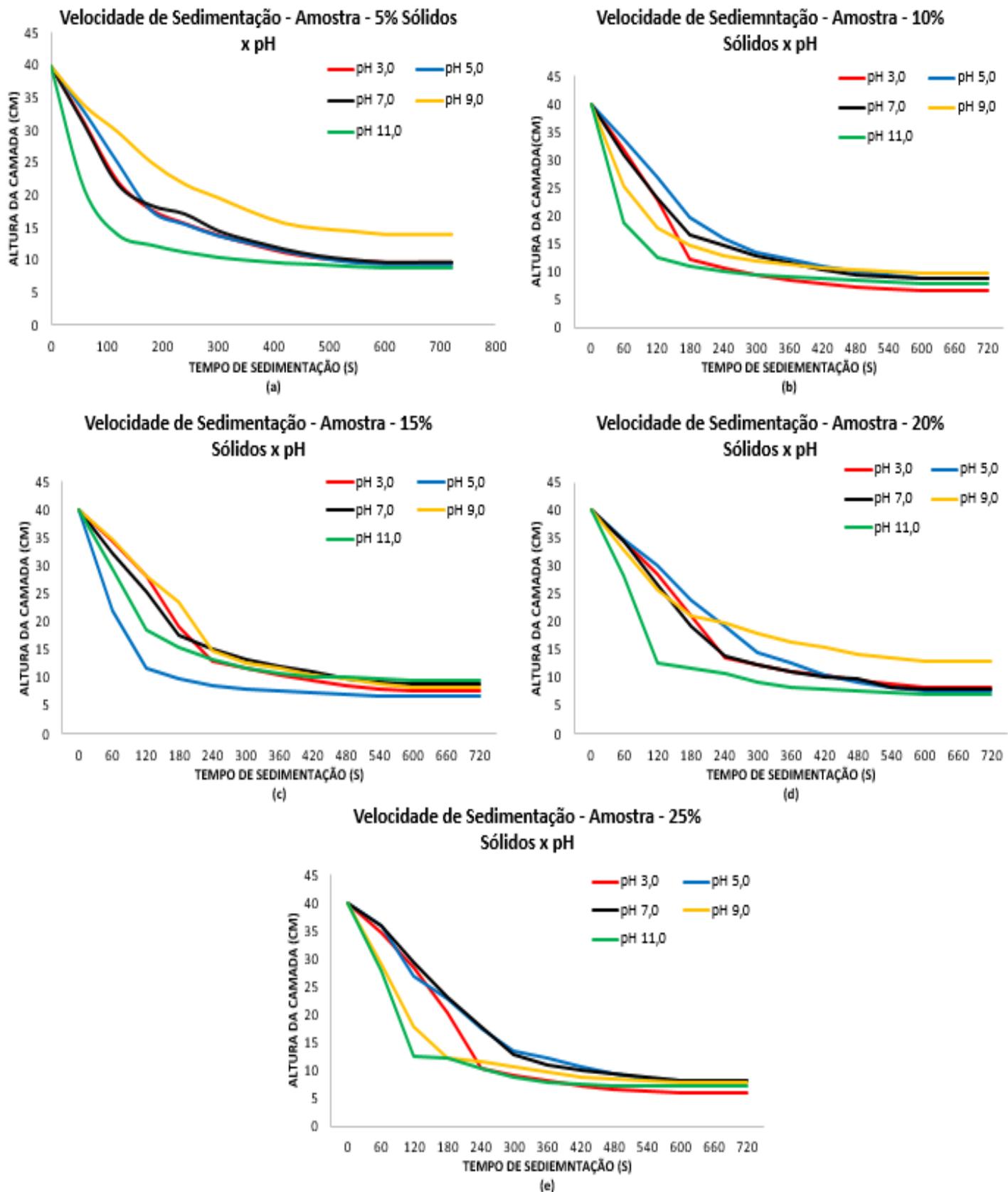


Figura 14: Curvas de sedimentação com variação de pH - Com adição de flocculante. (a) 5% Sólidos, (b) 10% Sólidos, (c) 15% Sólidos, (d) 20% Sólidos e (e) 25% Sólidos.

A partir das curvas de sedimentação e dos dados obtidos nesses testes com adição de floculante, foi possível a determinação da velocidade de sedimentação (cm/s) para cada pH e porcentagem de finos modulados (Tabela 3).

Tabela 3: Velocidade de sedimentação de acordo com a modulação de porcentagem de sólidos e pH's. - Com adição de floculante.

Velocidade de Sedimentação (cm/s)		Porcentagem de Sólidos (%)					
		5	10	15	20	25	Média
pH	3	0,061	0,053	0,065	0,068	0,057	0,061
	5	0,058	0,045	0,090	0,080	0,054	0,065
	7	0,061	0,053	0,057	0,071	0,053	0,059
	9	0,056	0,053	0,053	0,062	0,053	0,056
	11	0,083	0,076	0,071	0,086	0,059	0,075
	Média	0,064	0,056	0,067	0,073	0,055	-

Como pode ser observado na Tabela 4, houve maior ganho em termos de sedimentação quando o sistema operou com 15% de sólidos, nos pH's 5,0 e 11,0 nos quais a velocidade de sedimentação eram 0,090 e 0,071cm/s, em 20% de sólidos em pH's 5,0, 7,0 e 11,0 onde as velocidades de sedimentação foram 0,080, 0,071 e 0,086cm/s e também em 10% de sólidos com pH 11,0 com velocidade de sedimentação de 0,076cm/s, tais valores de velocidade podem ser comprovados nas curvas de sedimentação (Figura 13). Diante dos resultados citados como melhores vale ressaltar que manter uma operação de espessamento em pH 11,0 nesse caso não é viável, por se tratar de um pH de altamente alcalino, ocasionado grandes gastos com reguladores de pH, além de poder causar danos as seguintes operações do tratamento de minérios.

Seguindo os resultados encontrados como mais eficientes de acordo com sedimentação, foi feita a análise para os mesmos quanto à espessura da camada de espuma e porcentagem de sólidos no clarificado (Figuras 15 e 16).

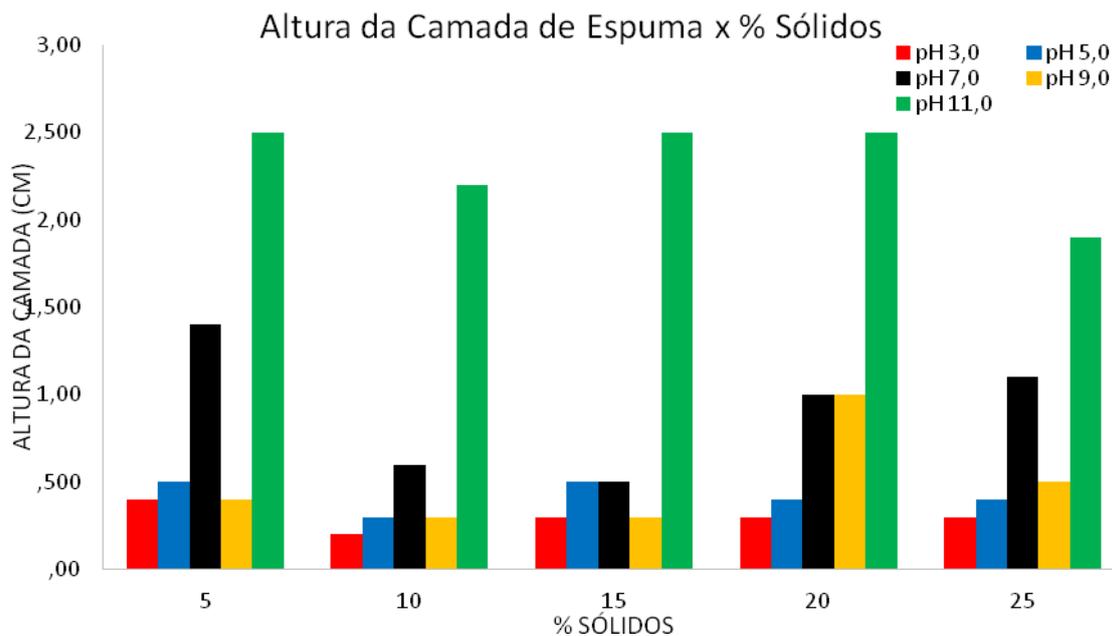


Figura 15: Altura da camada de espuma (cm) x % Sólidos, com variação de pH - Com adição de floculante.

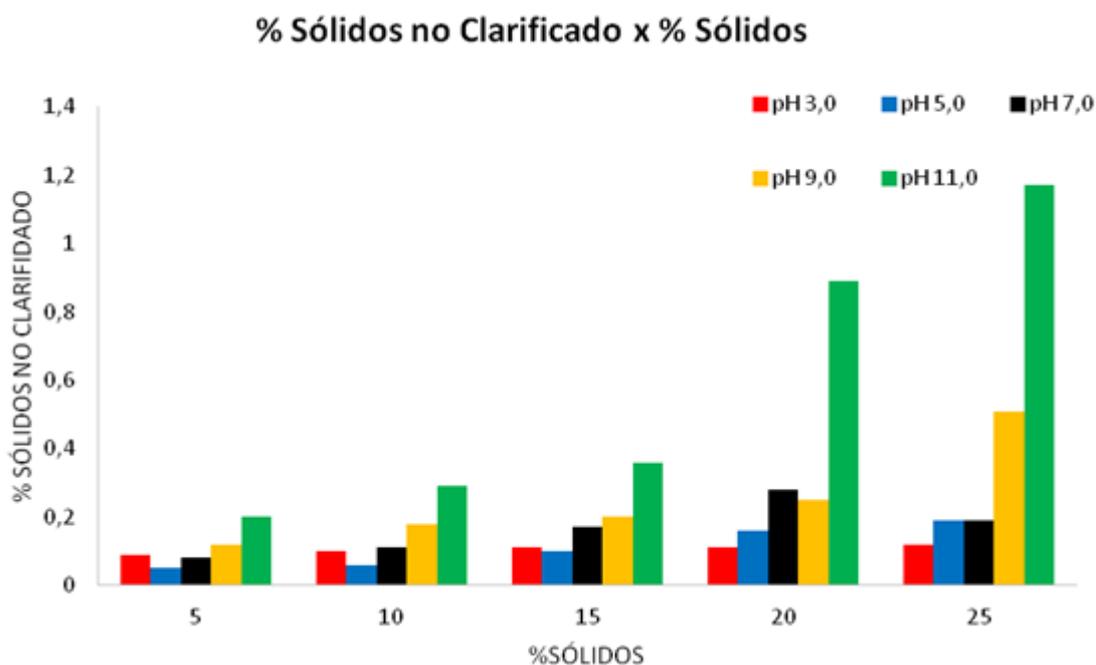


Figura 16: % Sólidos no Clarificado x % Sólidos, com variação de pH - Com adição de floculante.

O mesmo método de análise utilizado para o cenário 1, foi realizado para o cenário 2, com adição de floculante. A partir dos dados coletados durante os testes, e dos conjuntos de parâmetros selecionados por apresentarem

melhores velocidades de sedimentação, foi criada a Tabela 4, para melhor análise de valores e possível seleção dos parâmetros que proporcionam maior eficiência de trabalho de um espessador para material com essa faixa granulométrica.

Tabela 4: Comparativo entre valores encontrados para 15% e 20% de sólidos.

% Sólidos	pH	Velocidade de Sedimentação (cm/s)	Altura da Camada de Espuma (cm)	% Sólidos no Clarificado
15%	5,0	0,090	0,5	0,10
20%	5,0	0,080	0,4	0,16
	7,0	0,071	1,0	0,28

Fazendo a análise dos melhores conjuntos de parâmetros obtidos quanto à velocidade de sedimentação, para altura da camada de espuma e porcentagem de sólidos no clarificado no cenário onde há adição de flocculante, pode-se observar que em 15% de sólidos com pH 5,0 houve significativo ganho em termos de velocidade de sedimentação que se apresentou mais alta que as demais, ao mesmo tempo que apresentou altura da camada de espuma com valor mediano e baixa porcentagem de sólidos no clarificado, o que realmente influenciaria juntamente com a velocidade de sedimentação em uma produção de grande escala, quando comparado aos demais. Portanto, essa seria a melhor condição operacional visando obter maior eficiência do espessamento quando há adição de polímeros (flocculante) seria 15% de sólidos com pH 5,0.

4.3. Análise comparativa entre os testes com e sem adição de flocculante.

De posse dos melhores parâmetros para cada cenário analisado, foi possível realizar a comparação entre ambos. Ou seja, comparação dos resultados que se apresentaram mais eficientes quando não se tem adição de flocculante e quando se tem a adição do polímero (Tabela 6).

Tabela 5: Comparativo entre os parâmetros ótimos com e sem adição de floculante.

	5% de sólidos em pH 5,0 – Sem adição de floculante.	15% de sólidos em pH 5,0 – Com adição de floculante.
Velocidade de Sedimentação (cm/s)	0,039	0,090
Altura da camada de espuma (cm)	0,8	0,5
% Sólidos no Clarificado	0,13	0,10

Diante dos dados da Tabela 5, foi possível montar gráficos comparativos para complementar a visualização dos ganhos apresentados no processo de sedimentação quando houve a adição de floculante. A Figura 17 mostra o comparativo gráfico entre os dados analisados para cada cenário testado.

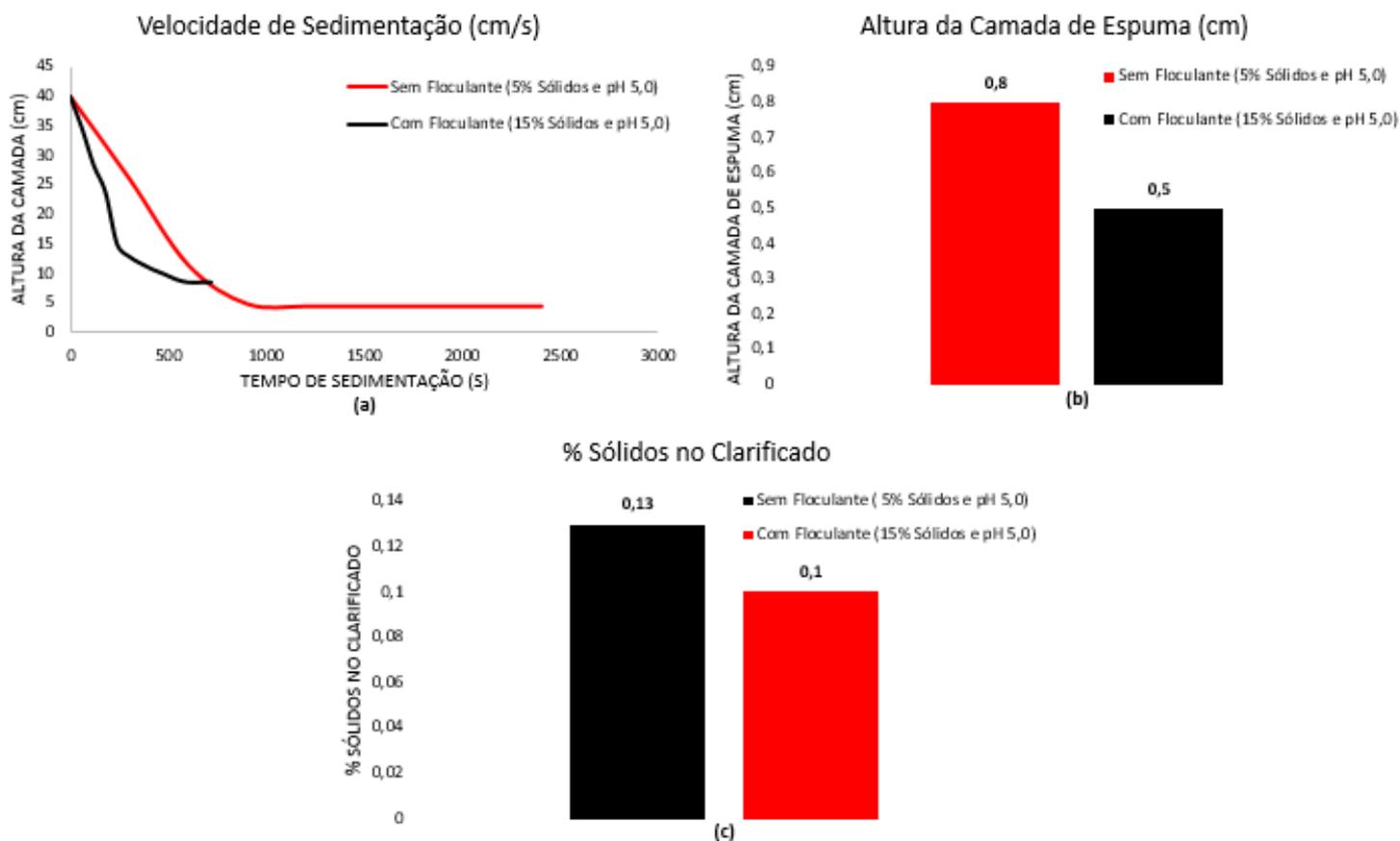


Figura 17: Comparativo entre os dados obtidos como melhores para cada cenário, com e sem flocculante. (a) Curva de sedimentação para 5% sólidos em pH 5,0 sem adição de flocculante e 15% sólidos em pH 5,0 com adição de flocculante, (b) Altura da camada de espuma (cm) para 5% sólidos em pH 5,0 sem adição de flocculante e 15% sólidos em pH 5,0 com adição de flocculante e (c) % sólidos no clarificado para 5% sólidos em pH 5,0 sem adição de flocculante e 15% sólidos em pH 5,0 com adição de flocculante.

Diante das características e da faixa granulométrica fina (abaixo de 74 μ m) do material utilizado nos testes, nota-se que a porcentagem de sólidos se apresentou diferente, com valores de 5% e 15% para os cenários sem e com adição de flocculante respectivamente, sendo cada uma mais adequada as condições em que foram selecionadas.

De forma semelhante ao que aconteceu com a concentração de sólidos, aconteceu para a faixa de pH ideal para o processo de sedimentação com e sem adição do polímero. O sistema em pH 5,0 se mostrou adequado para que houvesse ganho quanto a velocidade de sedimentação e redução da porcentagem de sólidos perdida no clarificado. Apesar de ser um pH ácido, não causa prejuízos ou processo de beneficiamento desse material especificamente. De acordo com a literatura e informações cedidas pela empresa onde foram realizados os testes, etapas anteriores ao espessamento

acontecem de forma mais eficiente em pH ácido devido as características que o material apresenta. Sendo assim, os resultados obtidos durante os testes mostraram que manter pH ácido durante a sedimentação das partículas se mostra benéfico à operação. Ou seja, não existe a necessidade de readequação de pH para que a operação de espessamento proceda de forma adequada.

A influência do uso ou não de floculante está relacionada à melhoria da velocidade de sedimentação. Ou seja, o intuito do uso de polímeros seria auxiliar a aglomeração de partículas finas, para que o tempo de sedimentação seja reduzido, acarretando aumento na velocidade de sedimentação e, como consequência, redução na porcentagem de sólidos no clarificado.

Durante a realização dos testes, foi adicionado um floculante aniônico de concentração 0,123% na dosagem de 25g/ton, esse acréscimo acarretou a uma polpa de mesmas condições operacionais (% Sólidos e pH) um aumento totalmente significativo na velocidade de sedimentação. Foi um aumento de aproximadamente 171%, o que comprova a grande redução do tempo de sedimentação. Quanto à altura da camada de espuma houve uma redução de aproximadamente 37,5%, enquanto que a porcentagem de sólidos presente no clarificado, apresentou uma, redução de 23,07% quando houve a adição de floculante. Porém, quando essa pequena redução é aplicada a uma produção de grande escala, pode representar uma redução na perda de sólidos significativa.

Por tanto, pode-se verificar com as análises dos testes de sedimentação realizados, que o melhor cenário de operação que garantiria maior eficiência da operação de espessamento do material em questão (granulometria abaixo de 74 μ m) seria empregando alimentação sob a forma de polpa a porcentagem de 15% de sólidos em pH 5,0 com adição de floculante aniônico.

5. Conclusão

O presente trabalho apresentado lidou com a análise dos parâmetros operacionais em testes de sedimentação de material com granulometria abaixo de $74\mu\text{m}$. As variáveis operacionais em questão correspondem a porcentagem de sólidos, pH da polpa mineral e dosagem de floculante, respectivamente.

Pela análise dos resultados obtidos a partir dos testes de sedimentação, observou-se que, para o parâmetro de porcentagem de sólidos, o melhor resultado obtido correspondeu à polpa mineral apresentando 15% de sólidos. Isso pode ser atribuído a uma porcentagem de sólidos intermediária, a qual não é necessária à introdução de uma etapa prévia de adição de água, além de uma menor perturbação no meio, durante a operação de sedimentação, favorecendo o escoamento das partículas sólidas.

Em relação ao parâmetro pH, obteve-se melhor resultado para o pH 5,0, visto que para pH muito alcalinos não houve boa sedimentação das partículas, ficando muitas partículas sólidas em suspensão. O pH não influenciou diretamente no tempo de sedimentação, mas sim, na quantidade de sólidos que permanecia em suspensão.

Pela análise do efeito do floculante nas suspensões de polpa mineral, conclui-se que a adição de uma dosagem de 25g/ton apresentou um resultado satisfatório quando aplicada na sedimentação de material com granulometria abaixo de $74\mu\text{m}$.

Assim, as análises realizadas, através da utilização do floculante aniônico, durante os ensaios comprovam que é possível a sedimentação de material de granulometria fina, pois o resultado obtido mostrou ganho de eficiência na clarificação do líquido e, uma sedimentação estável e mais rápida da polpa, tornando-a adensada.

6. Sugestões de Trabalhos Futuros

- Análises da eficiência de sedimentação de minério com granulometria abaixo de $74\mu\text{m}$ com o mesmo floculante aniônico, porém em dosagens diferentes;
- Análises da eficiência de sedimentação de minério com granulometria abaixo de $74\mu\text{m}$ com floculantes diferentes.

7. Referências

- [1] BALTAR, C. A. M. Processos de Agregação. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. **Tratamento de Minérios**. 5ª edição. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Cap. 13. P-559-587.
- [2] BARREDA, R. H. O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. 169p.
- [3] CHAVES, A.P.; OLIVEIRA, A.H.; CORDEIRO, R.A.C.; CHIAPPA, R.; MASINI, E.A.; GANIME, J.F.; GUIMARÃES, R.C.; FERNANDES, C. Espessamento. In: CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2ª ed. São Paulo: Signus, 1996. V2, cap.2, p. 49 – 116.
- [4] CHAVES, A.P; OLIVEIRA, A.H; CORDEIRO, A.C; CHIAPPA. R. Espessamento. In: CHAVES, A.P. **Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. 4ª edição. São Paulo: Oficina de textos, 2013. V2. Cap. 2. P.54-158.
- [5] FERREIA, G.G. **Avaliação da Interferência de Reagente Floculante na Flotação de Minério Fosfático Ultrafino**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais- Departamento de Engenharia de Minas, 2012, 32p.
- [6] FIGUEIREDO, B.R. Condições e formações dos depósitos minerais. In: FIGUEIREDO, B.R. **Minérios e ambiente**. São Paulo: Editora Unicamp, 2000. Cap. 2. P-45-55.
- [7] FRANÇA, S.C.A.; MASSARANI, G. Separação Sólido-líquido. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. **Tratamento de minérios**. 4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 14, p. 573 – 609.
- [8] FRANÇA, S.C.A.; CASQUEIRA, R.G. Ensaio de sedimentação. In: SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A., BRAGA, P.F.A. **Tratamento de minérios; Práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 23, p. 391 – 408.
- [9] FRANÇA, S. C. A; MASSARANI, G. Separação Sólido- Líquido. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. **Tratamento de Minérios**. 5ª edição. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Cap. 15. P-637-678.
- [10] NAVARRO, G. R. B.; ZANARDO, A.; CONCEIÇÃO, F. T. **O Grupo Araxá na região sul-sudoeste do Estado de Goiás**. Revista do Instituto de Geociência, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 5-28, Junho, 2013.
- [11] OLIVEIRA, M. L. M; LUZ, J. A. M; LACERDA, C.M.M. Espessamento. In: OLIVEIRA, M. L. M; LUZ, J. A. M; LACERDA, C.M.M. **Espessamento e Filtragem. Ouro Preto**: Escola de Minas Federal de Ouro Preto, 2004. Cap. 3. P. 44-66.
- [12] RAPOSO, D.; PEREIRA, S. **Caracterização litológica e hidrodinâmica do aquífero associado ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro**,

Oeste de Minas Gerais. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 32, n.1, p. 33-50, 2013.

[13] REIS, K.M. **Dimensionamento de espessadores.** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. 40p.

[14] SEER, H. J. *et al.* **Grupo Araxá em sua área tipo: um fragmento de crosta oceânica neoproterozóico na faixa de dobramentos Brasília.** Revista Brasileira de Geociências. V. 31, p. 386-396, Setembro, 2011.

[15] SOUSA, P.A. **Espessamento de polpa.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2012. 59p.

[16] VALADÃO, G.E.S.; ARAÚJO, A.C. Espessamento. In: VALADÃO, G.E.S. **Introdução ao tratamento de minérios.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Cap. 7, p. 142 – 152.