



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

**RICARDO JERÔNIMO VENTURA**

**EFEITOS DO USO DE FLOCULANTE E COAGULANTE NA  
SEDIMENTAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

**ARAXÁ/MG**

**2018**

**RICARDO JERÔNIMO VENTURA**

**EFEITOS DO USO DE FLOCULANTE E COAGULANTE NA  
SEDIMENTAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

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. Tamíris Fonseca de Souza

Coorientador: Esp. João Victor Silva Alves

**ARAXÁ/MG**

**2018**

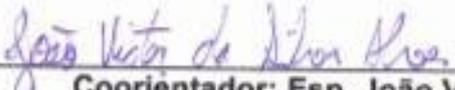
RICADO JERONIMO VENTURA

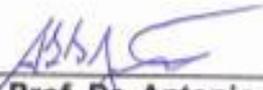
**EFEITOS DO USO DE FLOCULANTE E COAGULANTE NA  
SEDIMENTAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

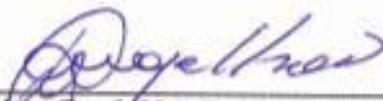
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia de  
Minas do Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais -  
CEFET/MG, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Minas.

Araxá, 7 de dezembro de 2018.

  
\_\_\_\_\_  
**Presidente e Orientadora: Prof. Me. Tamiris Fonseca de Souza**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá

  
\_\_\_\_\_  
**Coorientador: Esp. João Victor Silva Alves**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá

  
\_\_\_\_\_  
**Membro Titular: Prof. Dr. Antonio Lenito Soares Júnior**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá

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

## **AGRADECIMENTOS**

Em especial a Deus, que está sempre presente em nossas vidas.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e me incentivaram nessa longa jornada.

À minha família e amigos, que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento.

À todos meus professores e todos os funcionários do CEFET-MG pelos ensinamentos passados.

À prof.º Tamiris Fonseca, minha orientadora, pela paciência e dedicação.

Aos amigos e técnicos do laboratório de tratamento de minérios do CEFET-MG, João Victor e João Antônio, pela ajuda e sugestões.

Aos professores, Natal Junio e Maria Auxiliadora, por todo apoio dado durante a execução deste projeto.

E a todos os meus amigos que me ajudaram durante a realização deste projeto.

*O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.*

Winston Churchill

## RESUMO

Nos empreendimentos mineiros existe um grande uso de água para seus processos de beneficiamento mineral, produzindo assim uma necessidade de recirculação da água e/ou um tratamento para o retorno dessa água ao ambiente. Além destes dois fatores já citados, também é importante a minimização da água presente no rejeito para que se reduza seu volume e facilite a sua disposição. Um modo de se fazer a retirada da água de processo é a separação sólido-líquido. Desta forma este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de um coagulante e um floculante, na velocidade de sedimentação de um rejeito de minério de ferro fornecido pela empresa Minerita. Foram executados testes de sedimentação em proveta alterando algumas variáveis operacionais. O floculante utilizado para os testes foi um copolímero de acrilamida chamado Flotisor FL 7130 nas dosagens de 20 g/t e 40 g/t, e o coagulante usado foi sulfato de alumínio Flotisor OT 7429 nas dosagens de 100mg/L e 300 mg/L. Além da dosagem também se alterou o pH da polpa, utilizando os valores de pH 5 e pH 10 e a porcentagem de sólidos de 25 % e 40 %. Os resultados mostraram que o coagulante não apresentou um ganho na velocidade de sedimentação o floculante trouxe um ganho significativo. A caracterização mineralógica apresentou um material composto principalmente de quartzo e hematita com uma densidade de 2,93 g/cm<sup>3</sup>, 13,57 % de Fe e 46,40 % da amostra em um tamanho menor que 37 µm. O melhor resultado para a combinação de maior velocidade de sedimentação, menor turbidez no clarificado, maior compactação do sólido na proveta e menor gasto de reagente foi encontrado na utilização de uma dosagem de floculante de 20 g/t, pH 5 e 25 % de sólidos.

**Palavras-chave:** Rejeito de minério de ferro. Floculação. Coagulação.

## ABSTRACT

In mining projects there is a great use of water for mineral processing operations, thus producing a need for recirculation of water and / or a treatment for the return of this water to the environment. In addition to these two factors, it is also important to minimize the water present in the tailings to reduce its volume and facilitate its disposal. One way of withdrawing the process water is the solid-liquid separation. In this way, this work had as objective to evaluate the influence of a coagulant and a flocculant, in the sedimentation velocity of an iron ore tailings provided by the company Minerita. Sedimentation tests were performed on the test tube, altering some operational variables. The flocculant used for the tests was an acrylamide copolymer called Flotisor FL 7130 at 20 g/t and 40 g/t, and the coagulant used was Flotisor OT 7429 aluminum sulphate at the dosages of 100 mg/L and 300 mg/L. In addition to the dosage, the pH of the pulp was also altered, using the values of pH 5 and pH 10 and the percentage of solids of 25 % and 40 %. The results showed that the coagulant did not present a gain in sedimentation velocity. The flocculant brought a significant gain. The mineralogical characterization showed a material composed principally of quartz and hematite with a density of 2.93 g/cm<sup>3</sup>, 13.57 % Fe and 46.40 % of the sample in a size smaller than 37 µm. The best result for the combination of higher settling velocity, lower clarified turbidity, higher compaction of the solid in the beaker and lower reagent expense was found in the use of a flocculant dosage of 20g/t, pH 5 and 25 % solids.

**Keywords:** Iron ore tailings. Flocculation. Coagulation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE MODO DE DEPOSIÇÃO ENTRE POLPA E PASTA. ....	14
FIGURA 2 – ITEM (A) AS ETAPAS DO ENSAIO DE PROVETA E ITEM (B) CURVA GERADA PELO ENSAIO. ....	16
FIGURA 3- MODELO DE FLUXO DO ESPESSADOR. FONTE: GUIMARÃES.....	17
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍONS NA DUPLA CAMADA ELÉTRICA. ....	19
FIGURA 5 - TEORIA DLVO: CURVAS DE ENERGIA DE INTERAÇÃO.....	21
FIGURA 6 - MECANISMO SIMPLIFICADO DE COAGULAÇÃO. ....	23
FIGURA 7 - DEMONSTRAÇÃO DO FLOCULANTE ADSORVIDO DE FORMA PLANA NAS PARTÍCULAS.....	24
FIGURA 8 - DEMONSTRAÇÃO DE FLOCULAÇÃO POR PONTES POLIMÉRICAS. ....	24
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRA. ....	27
FIGURA 10 - PILHA ALONGADA. ....	27
FIGURA 11- ESTEREOMICROCÓPIO. ....	28
FIGURA 12 – (A) PICNÔMETRO VAZIO, (B) PICNÔMETRO COM AMOSTRA, (C) PICNÔMETRO COM AMOSTRA E ÁGUA, (D) PICNÔMETRO COM ÁGUA....	30
FIGURA 13 – PENEIRADOR SUSPENSO. ....	32
FIGURA 14 – PROVETA UTILIZADA NOS TESTES.....	33
FIGURA 15 – POLPA HOMOGÊNEA. ....	35
FIGURA 16 – MINERAIS PRESENTES NA AMOSTRA. (1) HEMATITA, (2) QUARTZO OPACO E (3) QUARTZO TRANSPARENTE.....	38
FIGURA 17 - CURVA GRANULOMÉTRICA ....	40
FIGURA 18- (A) CLARIFICADO COM PH 5, (B) CLARIFICADO COM PH 10.....	42
FIGURA 19 – (A) TESTE COM 20 G/T DE FLOCULANTE COM 40 % DE SÓLIDOS E PH5, (B) TESTE COM 20 G/T DE FLOCULANTE COM 25 % DE SÓLIDOS E PH 10. ....	44
FIGURA 20- GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS DO FLOCULANTE.....	45
FIGURA 21– OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA PARA O USO DO FLOCULANTE. ....	46
FIGURA 22- GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS DO COAGULANTE.....	48
FIGURA 23- OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA PARA O USO DO COAGULANTE. ....	49

FIGURA 24 – MÉDIA DE VELOCIDADE DOS TESTES DE SEDIMENTAÇÃO EM PROVETA.....	50
--	----

### **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 – TABELA DE RESERVAS E PRODUÇÃO DE FERRO MUNDIAL.....	12
TABELA 2- SÉRIE DE PENEIRAS UTILIZADAS.....	31
TABELA 3 - TESTES DE SEDIMENTAÇÃO EM PROVETA NA AUSÊNCIA DE FLOCULANTE/COAGULANTE.....	34
TABELA 4- TESTES DE SEDIMENTAÇÃO EM PROVETA COM A PRESENÇA DE REAGENTES.....	34
TABELA 5 – TEMPOS DE MEDIDA DO TESTE DE SEDIMENTAÇÃO .....	36
TABELA 6 - PROPRIEDADE DOS MINERAIS.....	37
TABELA 7 – RESULTADOS DA PICNOMETRIA DO REJEITO DE FERRO.....	39
TABELA 8 – RESULTADO DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	40
TABELA 9 – RESULTADOS DO TESTE DE SEDIMENTAÇÃO NA AUSÊNCIA DE COAGULANTE E/OU FLOCULANTE.....	41
TABELA 10 – RESULTADOS DO TESTE DE SEDIMENTAÇÃO COM A PRESENÇA DE FLOCULANTE.....	43
TABELA 11 -RESULTADOS DO TESTE DE SEDIMENTAÇÃO COM A PRESENÇA DO COAGULANTE.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
DIPLAM	Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento da Mineração
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
US\$	Dólar Americano
FOB	<i>Free on Board</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 Produção do concentrado de minério de ferro .....	12
2.2 Disposição de rejeitos de minérios .....	13
2.2.1 Teste de sedimentação descontínua .....	15
2.2.2 Espessamento .....	16
2.3 Estudo de agregação e dispersão .....	18
2.3.1 Dupla Camada Elétrica, potencial zeta e forças de van der Waals.....	18
2.3.2 Teoria DLVO .....	20
2.3.3 Teoria X-DLVO ou DLVO estendida .....	21
2.3.4 Coagulação.....	22
2.3.5 Floculação .....	23
<b>3. Metodologia</b> .....	<b>26</b>
3.1 Preparação da amostra .....	26
3.2 Caracterização da amostra .....	28
3.2.1 Caracterização mineralógica.....	28
3.2.2 Picnometria e cálculo do teor de ferro da amostra.....	29
3.2.3 Análise Granulométrica.....	31
3.3 Testes de sedimentação em proveta .....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
4.1 Caracterização.....	37
4.1.1 Caracterização mineralógica.....	37
4.1.2 Densidade e teor de ferro da amostra .....	38
4.1.3 Distribuição granulométrica .....	39
4.2 Testes de sedimentação em proveta na ausência de reagentes .....	41
4.3 Testes de sedimentação na presença do floculante .....	42
4.4 Testes de sedimentação na presença do coagulante .....	46
4.5 Comparação entre o uso dos reagentes .....	49
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo, a descoberta de depósitos de minérios com altos teores e grandes dimensões vem se tornando cada vez mais raras. Juntando esta dificuldade de encontrar depósito com teores altos e com a crescente demanda de produção se torna necessário a extração de minérios de baixos teores. Porém com esse aumento de produção de minérios de baixos teores acarreta um aumento na geração de rejeitos e também na utilização de água.

Um dos principais problemas enfrentados pela mineração nas últimas décadas é o descarte do material já processado que não possui interesse econômico, isto é, o rejeito. Com o aumento da extração de minerais com teores cada vez baixos existe uma intensificação da quantidade de rejeito produzida, isso gera a necessidade de novas formas de descarte do material. Um dos grandes problemas com o a disposição do rejeito é o fato de ser uma etapa onde não se gera nenhum retorno financeiro, assim grande parte das empresas não possui um investimento em pesquisas voltadas para essa área e adotam os métodos convencionais como a deposição em barragens de rejeito.

As barragens de rejeitos apresentam várias dificuldades sob o ponto de vista construtivo, uma vez que demandam uma grande área para construção e alto investimento financeiro, bem como riscos no que diz respeito aos aspectos de segurança e de meio ambiente, já que uma ruptura das mesmas pode causar perda de equipamentos, pessoas e ainda danos aos meios bióticos e abióticos do local.

Tendo em vista tal contexto, novas formas de disposição vêm sendo estudadas. Uma delas é a disposição do rejeito em forma de pasta mineral que apresenta um material com uma forma mais adensada reduzindo drasticamente a área utilizada e diminuindo o risco de acidentes.

A pasta é formada através da retirada da água do material até se atingir uma consistência mais adensada, esse desaguamento é realizado por equipamentos chamados de espessadores. Estes equipamentos tem por finalidade a redução da água presente na polpa mineral, e para melhorar sua eficiência é possível a aplicação de alguns reagentes agregantes, como coagulantes ou floculantes, que aumentam a velocidade de sedimentação e geram um clarificado com uma menor quantidade de sólidos.

Nesse sentido o trabalho proposto tem a finalidade avaliar a influência de reagentes agregantes, um coagulante e um floculante, na velocidade de sedimentação de um rejeito de minério de ferro. Para isso foram realizados os testes de sedimentação em proveta, sendo feitos com diferentes dosagens de reagentes, porcentagens de sólidos e valores de pH. Ademais, o rejeito de minério de ferro foi caracterizado para que se pudesse identificar as características físicas, químicas e mineralógicas desse material.

No desenvolvimento do trabalho será apresentado uma revisão bibliográfica sobre produção de minério de ferro, pasta mineral e como acontece a agregação dos reagentes utilizados. A seguir é demonstrado como foram feitos os testes de sedimentação em proveta. A partir dos resultados obtidos dos testes serão analisados a influência dos reagentes agregantes, das porcentagens de sólidos na polpa e do pH do meio, depois comparados os resultados com trabalhos anteriores.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo a seguir será abordado uma breve revisão sobre a produção do minério, disposição de rejeitos e agregação/dispersão de sólidos em polpa.

### 2.1 Produção do concentrado de minério de ferro

O minério de ferro é um dos materiais mais explorados mundialmente, principalmente por sua aplicação nas indústrias de base. A siderurgia destaca-se no consumo do minério ferro, pois é onde a maior parte dele é aplicado, na produção de aços e ligas ferrosas.

Segundo DNPM (2016) as reservas mundiais de minérios de ferro são da ordem de 194 bilhões de toneladas, enquanto as brasileiras correspondem a 13 % desse valor, com reservas na ordem de 32 bilhões de toneladas. Sendo as principais reservas brasileiras localizadas nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul. Os dados de produção mundial são encontrados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Reservas e produção de Ferro Mundial.**

Países	Reservas (10 <sup>6</sup> T)		Produção (10 <sup>3</sup> T)	
	2015	2014	2014	2015
Brasil	32.170	411.183	430.838	
China	23.000	1.510.000	1.380.000	
Austrália	52.000	774.000	824.000	
Índia	8.100	129.000	129.000	
Rússia	25.000	102.000	112.000	
Ucrânia	6.500	68.000	68.000	
África do Sul	1.000	81.000	80.000	
Outros países	44.500	348.000	302.000	
Total	194.270	3.423.183	3.325.838	

Fonte: Adaptado DNPM/DIPLAM; USGS - Mineral Commodity Summaries – 2016.

O Brasil possui uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo, e essas reservas se destacam pelo alto teor encontrado. Em Minas Gerais encontra-se um minério com teor médio de 41,5 % de ferro e representa 82,9 % das reservas

brasileiras, Mato Grosso do Sul com teor médio de 62,9 % com 2,3 % das reservas e o Pará com um teor de 64,9 % e 9,9 % das reservas brasileiras (DNPM 2016).

De acordo com dados publicados pelo DNPM (2016), o Brasil teve uma produção de 430,8 Mt com teor médio de 64 % de ferro. Deste total, 366,2 Mt foram exportados com um valor de US\$-FOB 14,1 bilhões. Do qual a maior parte (50,6%) foi vendida para China, que atualmente é o maior comprador mundial de minério de ferro devido sua grande taxa de crescimento nos setores imobiliários e obras de infraestrutura. Enquanto no mercado interno, o consumo é todo voltado para produção de ferro-gusa e pelotas.

A extração do minério de ferro é uma atividade de grande importância no cenário econômico brasileiro. De acordo com DNPM (2016), a arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) gerada pela produção de minério de ferro corresponde a R\$ 792 milhões, este valor representa 52,1 % de toda a arrecadação recolhida pela CFEM.

Tendo em vista a necessidade de extração de minerais com teores reduzidos para suportar a demanda de consumo crescente, é esperado um aumento constante na quantidade de rejeitos produzidos pela mineração. O aumento desta produção junto à dificuldade para a abertura de novas barragens faz com que exista um incentivo maior nas pesquisas voltadas a outras técnicas de deposição de rejeitos.

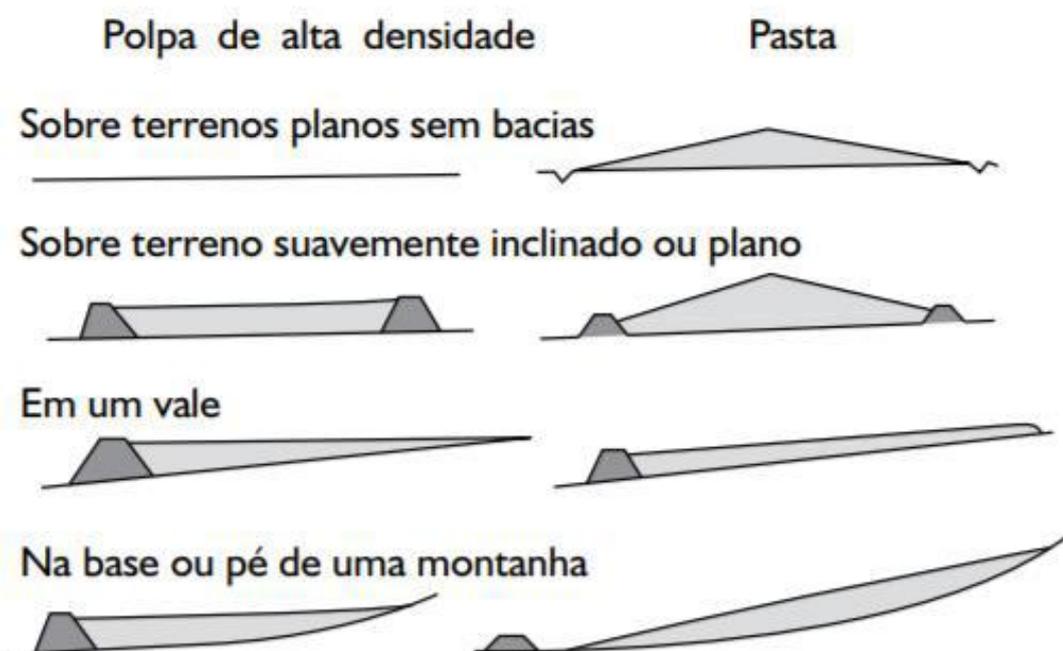
## **2.2 Disposição de rejeitos de minérios**

O minério que é extraído durante a lavra passa por diversas etapas de preparação e separação até chegar ao produto final. Durante esses processos é gerado um material que não possui valor econômico chamado de rejeito. Os rejeitos são definidos como a fração do minério destituída de mineral útil ou de valor econômico, obtida por processo de beneficiamento mineral (LUZ, *et al.*, 2010).

Como a maior parte dos processos de beneficiamentos trabalham com polpas de minério, é comum a utilização de barragens como uma forma de deposição do rejeito gerado durante o processo. A utilização de barragens tem como principal vantagem o baixo custo em relação às outras formas de deposição, pois, a retirada da água do material nas outras formas de deposição gera um custo mais alto para uma etapa onde não é produzido nenhum retorno financeiro. Porém, com a grande

quantidade de rejeitos produzida, a utilização destas estruturas esbarra em alguns problemas ambientais devido à grande área necessária para disposição e o grande risco envolvido pelo tamanho da estrutura.

Como uma alternativa à disposição em polpa mineral existe a disposição na forma de pasta mineral. Uma pasta mineral é conceituada por Araujo *et al.*(2003) como um sistema coloidal, sendo um fluido homogêneo onde não acontece uma segregação granulométrica das partículas, que quando disposto em superfícies estáveis não manifesta uma drenagem significativa de água. Por possuírem uma baixa quantidade de água, as pastas necessitam de uma área menor de deposição, conseguem uma grande recuperação de água e geram um risco de acidentes muito inferior quando comparadas as barragens de rejeito. A Figura 1 mostra a comparação entre a disposição de uma polpa e uma pasta mineral em terrenos diferentes, sendo eles um terreno plano sem bacias, outro suavemente inclinado, em um vale e uma base de uma montanha.



**Figura 1 - Comparação entre modo de deposição entre Polpa e Pasta.**

**Fonte: (OSORIO *et al.*, 2008)**

Branches (2015) diz que através da experiência prática e observação, foi determinado que uma pasta deve possuir no mínimo 15 % em massa de material com granulométrica abaixo de 20  $\mu\text{m}$ . Essa granulometria é necessária para que a retenção de água possa produzir uma mistura não-segregante e propriedades de fluxo típicas de pasta.

Segundo Falcucci (2007), a porcentagem de sólidos para se caracterizar uma pasta mineral é dependente de cada material, não possui um valor fixo. Outro parâmetro citado pelo autor é a área superficial específica, que segundo ele pode afetar as propriedades da pasta como a proporção de partículas finas, alterando a retenção de água da polpa.

Araujo *et al.* (2003) cita algumas propriedades que devem ser analisadas para a deposição de rejeitos em forma de pasta, sendo elas: tensão de escoamento da pasta; altura de abatimento ou altura de *slump*, que é medido através do teste de *slump*; ângulo de repouso, determinado através do teste de *flume* ou calha; viscosidade da mistura sólido-líquido; resistência à compressão obtida através de ensaio mecânico de tensão e permeabilidade do preenchimento obtido.

### **2.2.1 Teste de sedimentação descontínua**

De acordo com Luz *et al.*(2010), a sedimentação é um processo que se baseia na diferença entre densidades dos constituintes de uma solução e da ação dos fenômenos de transportes, assim é possível a separação de componentes sólidos da solução líquida. As partículas em suspensão se encontram sobre a ação das forças da gravidade, empuxo e de resistência ao movimento (LARA, 2011).

A separação sólido-líquido ocorre pela sedimentação das partículas sólidas na solução, deste modo são encontradas duas fases no sistema. Uma fase contendo uma baixa quantidade de sólidos em suspensão e a outra fase com grande quantidade de sólidos.

Os testes de sedimentação em provetas podem ajudar o dimensionamento de um equipamento com um processo de sedimentação contínua (LARA, 2011). Através dele é possível a obtenção de parâmetros como velocidade de sedimentação e turbidez do clarificado, que são necessários para o dimensionamento dos espessadores.

No começo do teste de proveta, a polpa se encontra de uma forma homogênea com todas as partículas dispersas no meio, com o passar do tempo as partículas mais densas começam a sedimentar pela ação da gravidade. As partículas de densidade menor permanecem em equilíbrio na solução, porém quando o peso da partícula acaba sendo maior que o empuxo gerado ela começa a se mover no

sentido do fundo da proveta, deste modo é gerado uma interface que se movimenta de cima para baixo. Na parte superior se encontra o líquido clarificado e na parte inferior os sólidos em movimento descendente (LUZ, *et al.*, 2010).

A Figura 2 apresenta um esquema do teste de sedimentação em proveta. O item (a) corresponde às etapas do teste de sedimentação e o item (b) a curva gerada por este ensaio. Na Figura 2,  $t=0$  representa à primeira fase onde a polpa se encontra homogênea,  $t=t_1$  é a etapa onde as partículas mais densas começam a sedimentar,  $t=t_2$  representa a movimentação das partículas menos densas,  $t=t_3$  o tempo onde começa a ocorrer interação entre as partículas dificultando o seu movimento e por fim  $t=t_4$  onde as partículas tem contato entre si e começam a se compactar.

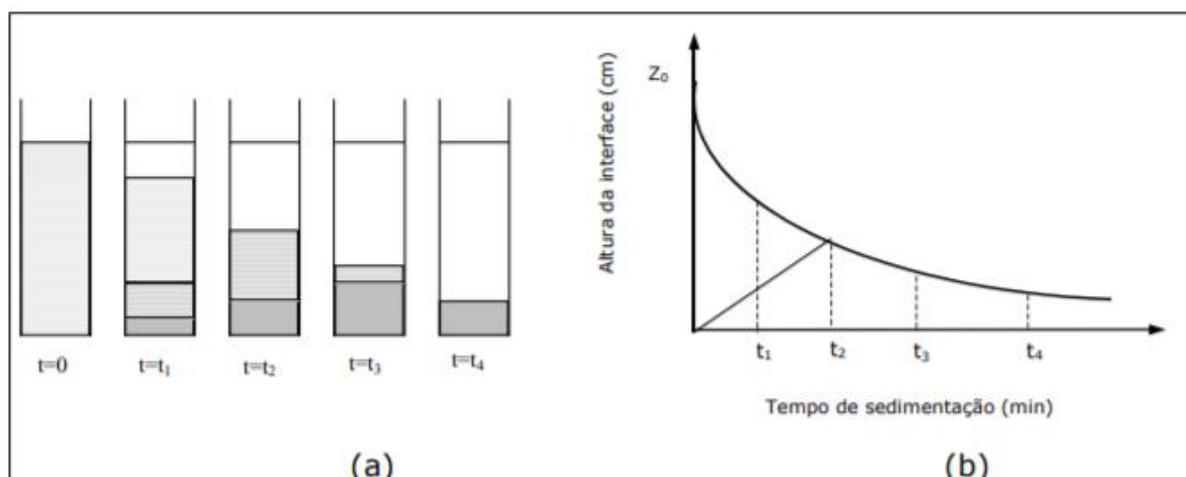


Figura 2 – Item (a) as etapas do ensaio de proveta e item (b) curva gerada pelo ensaio.

Fonte: (LUZ, *et al.*, 2010)

### 2.2.2 Espessamento

O espessamento é uma operação unitária que faz o adensamento da polpa mineral separando a fase líquida da fase sólida, assim reduzindo significativamente a quantidade de água contida. A sedimentação ocorre pela força da gravidade, produzindo uma polpa com uma maior quantidade de sólidos e sendo possível o reaproveitamento da água retirada (LARA, 2011).

A sedimentação, das partículas presentes na polpa, nos espessadores irá ocorrer pela diferença de densidade das duas fases. Tais equipamentos apresentam

uma parte superior com um formato cilíndrico e o fundo um formato cônico. As partículas sedimentadas são retiradas pelo fundo do cone (são chamadas de *underflow*) enquanto o líquido clarificado que é retirado por transbordo (chama-se *overflow*) (GUIMARÃES, 2010). A Figura 3 demonstra o modelo clássico de um espessador com o sentido de fluxo do material.

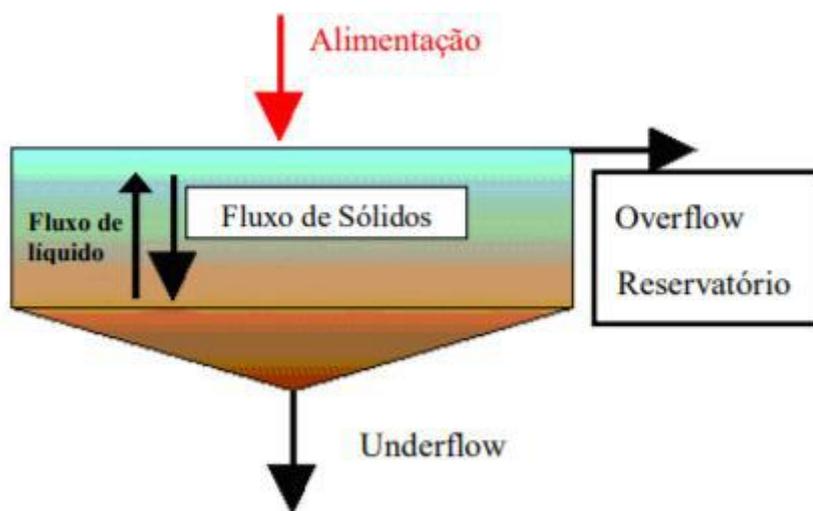


Figura 3- Modelo de fluxo do espessador.

Fonte: Guimarães (2010, p.14).

Existem vários modelos de espessadores tendo como diferença principal entre eles o formato do equipamento, que está relacionado com a finalidade do equipamento. Guimarães (2011) descreve os principais tipos de espessadores utilizados para polpas de minério de ferro:

- **Convencional:** Caracterizado por uma grande área, uma maior quantidade de água presente no *underflow* quando comparado aos demais espessadores.
- **High Density:** Possui uma área menor que o convencional e uma altura muito maior, produzindo assim um *underflow* com alta densidade, ou seja, uma maior porcentagem de sólidos.
- **Deep Cone:** Apresenta a menor área dentre os espessadores com a maior altura que resulta em um espessador capaz de gerar pasta mineral.

Um melhor desempenho dos espessadores é conseguido quando utiliza-se de reagentes químicos como floculantes e coagulantes. Estes reagentes atuam auxiliando a agregação das partículas gerando estruturas maiores fazendo com que

a operação de espessamento seja mais rápida e possibilitando a redução do tamanho do equipamento.

### **2.3 Estudo de agregação e dispersão**

Será realizado uma breve revisão acerca da agregação e dispersão de partículas coloidais em uma suspensão aquosa.

#### **2.3.1 Dupla Camada Elétrica, potencial zeta e forças de van der Waals**

Conforme Baltar (2010), uma partícula com carga superficial em excesso irá atrair espécies iônicas com cargas contrárias (contra-íons) formando uma nuvem eletrônica nas suas proximidades. Isso gera a dupla camada elétrica, formada pela superfície carregada da partícula e os contra-íons, sendo que uma das partes possui excesso de cargas positivas enquanto a outra gera um excesso de cargas negativas. A dupla camada elétrica pode ser dividida em duas regiões, a primeira chamada de camada de Stern a mais próxima a partícula onde os contra-íons estão ligados de forma rígida à superfície, a segunda sendo a camada difusa que se encontra íons em constante movimentação e apresenta uma diminuição da concentração de contra-íons com um aumento de co-íons. Através da Figura 4 é possível observar as duas regiões da dupla camada elétrica.

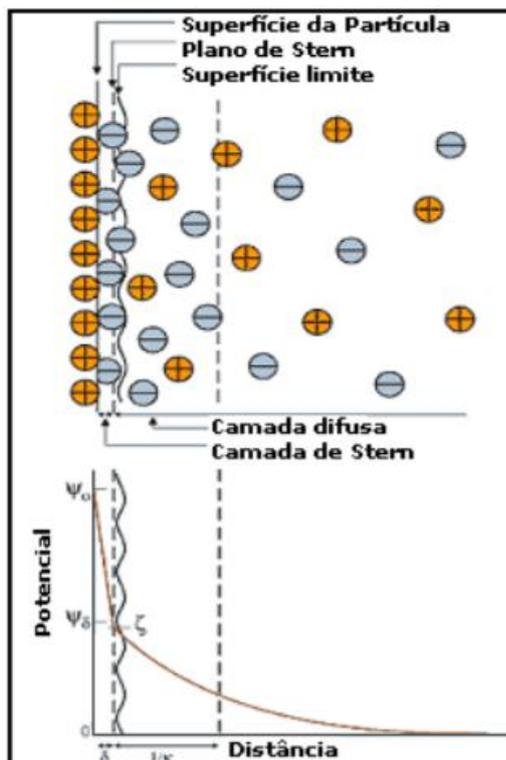


Figura 4 - Distribuição dos íons na dupla camada elétrica.

Fonte: Andriani (2009)

Como citado anteriormente a dupla camada elétrica é dividida em duas partes, o plano de Stern e a camada difusa. Durante o deslocamento da partícula, a camada de Stern se move junto à partícula gerando um plano de cisalhamento no limite da camada difusa. O potencial elétrico gerado nesse plano de cisalhamento é chamado de potencial zeta, seu valor é dependente da carga da partícula e da quantidade e carga dos íons presente na solução (ANDRIANI, 2009).

Quando o potencial zeta da partícula é zero chama-se de ponto isoelétrico. Nesta condição não existe força de repulsão entre as partículas, então a tendência é uma aglomeração das mesmas. Em contrapartida, em uma condição onde o potencial zeta é diferente de zero existirá repulsão entre as partículas, quanto mais distante estiver o valor do zero mais forte será a repulsão (ANDRIANI, 2009).

Já as forças de van der Waals são geradas através dos dipolos instantâneos presentes nos átomos. Os átomos individualmente são apolares por natureza, os dipolos instantâneos são formados através da interação entre o movimento do centro de massa da nuvem eletrônica e o núcleo do átomo. O campo eletromagnético formado em cada átomo pelo dipolo interage com os átomos vizinhos produzindo um dipolo induzido (JOHNSON *et al.*, 2000).

### 2.3.2 Teoria DLVO

A teoria DLVO é utilizada para a compreensão das suspensões coloidais. Ela mostra a interação das duas forças opostas, de atração e de repulsão, para explicar o porquê de algumas suspensões se aglomerarem e outras não, baseando-se nas seguintes forças:

- I. Força de van der Waals, a força de atração.
- II. Força entre as duplas camadas elétricas das partículas, a força de repulsão.

Duas partículas de mesma natureza, independente do solvente usado, sempre possuem uma força de caráter atrativo chamada de força de van der Waals. Estas forças dependem da natureza das partículas, da distância entre elas e também do solvente. Porém, independem da carga das partículas, do pH do meio e da concentração de eletrólitos da solução (LYKLEMA *et al.*, 1989).

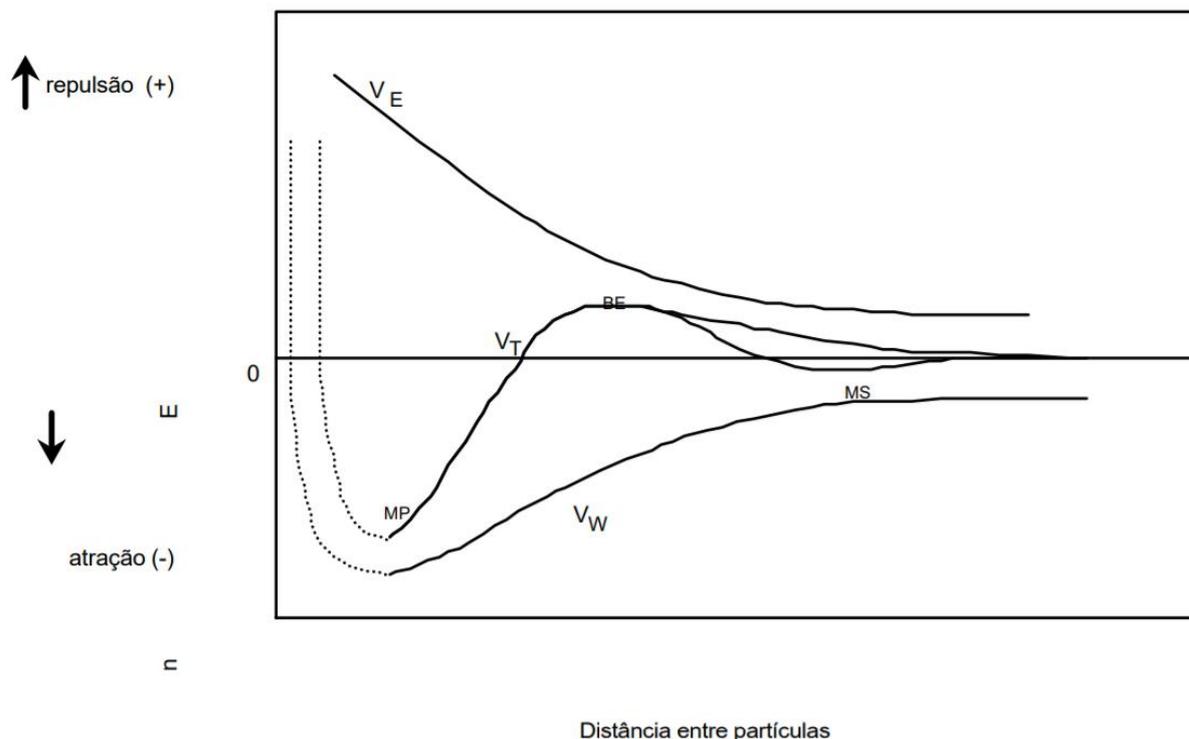
Ao contrário da força de van der Waals, que é atrativa para partículas iguais, a dupla camada elétrica para duas partículas de mesma carga superficial tem o efeito de repulsão. A força entre duas camadas elétricas depende da distância das partículas, magnitude da carga e também do pH do solvente. São sensíveis à natureza e a concentração do eletrólito, porém em uma certa carga superficial perdem a dependência da natureza da partícula (LYKLEMA *et al.*, 1989).

A teoria DLVO assume que as únicas forças que determinam a aglomeração ou não de um sistema de colóides são as forças da dupla camada elétrica e a de van der Waals. Assim a energia total é calculada pela soma da energia da dupla camada elétrica e energia de van der Walls, como é apresentado pela Eq.(1):

$$V_T = V_E + V_W \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde  $V_W$  é a energia da força van der Waals,  $V_E$  a energia da força da dupla camada elétrica e  $V_T$  representa a energia total de interação. A convenção diz que um valor negativo da energia total representa uma força final atrativa, enquanto um valor positivo representa uma força final repulsiva. Sendo encontrado também representado em forma de gráfico. Através da união entre as curvas de atração de

van der Waals e a curva de repulsão eletrostática se forma a curva que representa a interação resultante. A Figura 5 reproduz a união das curvas de energia da teoria DLVO.



**Figura 5 - Teoria DLVO: Curvas de energia de interação.**  
**(MP=mínimo primário, BE=barreira de energia, MS= mínimo secundário)**  
**Fonte: LINS e ADAMIAN (2000)**

O mínimo primário que existe na curva  $V_T$ , na Figura 5, demonstra um sistema onde as partículas se aproximam suficientemente para se agregarem, assim o sistema é chamado de estável. Enquanto no mínimo secundário existe uma agregação mais fraca, que pode ser facilmente desfeita através de uma agitação, gerando uma dispersão no sistema (LINS e ADAMIAN, 2000).

### 2.3.3 Teoria X-DLVO ou DLVO estendida

Devido aos avanços nas tecnologias e pesquisas voltadas para a área, foi possível observar a existência de outros tipos de forças presentes em sistemas coloidais além daquelas descritas pela teoria DLVO. Assim, foi necessário a inclusão destas forças, que foram chamadas de forças estruturais, resultando na teoria X-DLVO ou DLVO estendida.

De acordo com Lins e Adamian (2000) a abordagem do tratamento de minerais coloidais pela teoria X-DLVO pode envolver outros componentes na energia total de interação entre partículas, além das forças estruturais:

$$V_T = [V_W + V_E] + V_S + V_{ASS} + V_M + V_{Est} + \dots \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:

$V_S$ = Energia estrutural, devida as mudanças na estrutura das moléculas de água, pela vizinhança da superfície sólida ou de espécies adsorvidas;

$V_{ASS}$ = Energia atrativa hidrofóbica, devida às cadeias de hidrocarboneto dos coletores adsorvidos nas partículas. É uma interação de alcance muito curto, de 1,0 até 10,0 nm;

$V_M$ = Energia atrativa magnética entre partículas com suscetibilidade magnética relativamente elevada.

$V_{EST}$ = Energia de repulsão estérica decorrente da interação entre as partes externas das cadeias de polímeros hidrofílicos, em configuração não filamentosa;

### 2.3.4 Coagulação

Quando as forças de caráter atrativo superam as forças de caráter repulsivo dentro de uma solução coloidal esta solução gera agregados que são chamados de coágulos, e este fenômeno é chamado de coagulação. A coagulação nada mais é que a redução dos componentes repulsivos da solução.

Minerais coloidais costumam não responderem bem a processos de separação sólido/sólido, pois nesta faixa as forças intermoleculares de longo alcance e fenômenos de dupla camada elétrica dominam e controlam toda a interação entre as partículas (OLIVEIRA, *et al.* 2004). De acordo com a teoria DLVO, as contribuições da dupla camada elétrica para a estabilidade de uma solução coloidal tem um caráter repulsivo, assim o objetivo da coagulação pode ser obtido através compressão da dupla camada elétrica ou o abaixamento do potencial zeta.

Coagulantes são os eletrólitos que possuem uma carga contrária às cargas apresentadas pela superfície das partículas. Quando dispersos em um meio neutralizam a carga superficial fazendo com que as partículas gerem atração e contato entre si através da ação de forças moleculares (OLIVEIRA *et al.*, 2004). A coagulação é realizada através da adição de eletrólitos inorgânicos multivalentes ao

meio, na maioria dos casos aplica-se cátions hidrolisáveis, como  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  (RICHSTFDON E CONNELLY, 1988; HOOG, 2000). A Figura 6 representa a redução da energia de repulsão ( $E_R$ ) através do uso de eletrólitos.

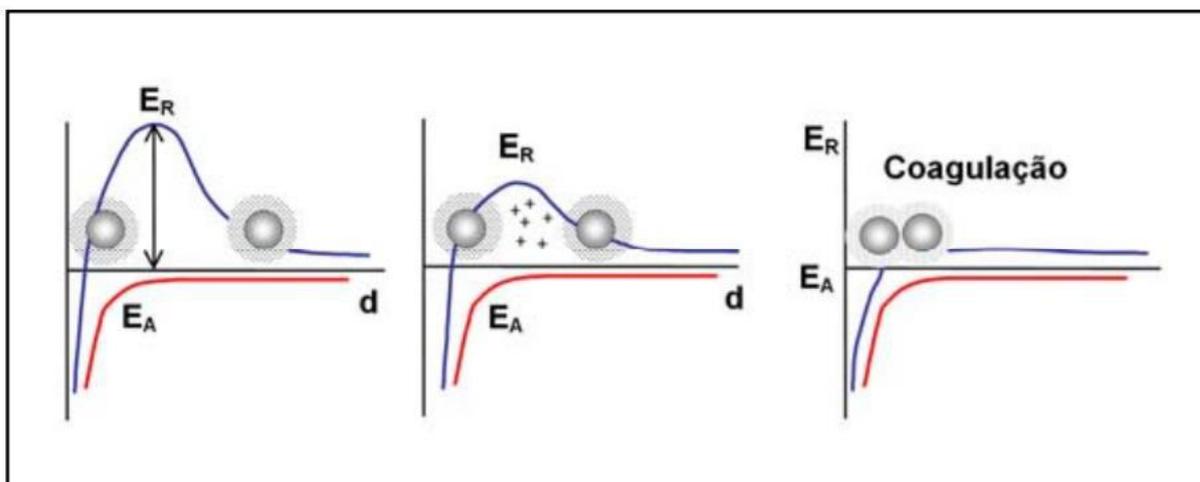


Figura 6 - Mecanismo simplificado de Coagulação.

$E_R$  = Energia de repulsão;  $E_A$  = Energia de atração.

Fonte: OLIVEIRA E RUBIO (2011)

### 2.3.5 Floculação

A floculação é definida por Luz, *et al* (2010) como a ação de um polímero, necessariamente solúvel em água, denominado floculante, que promove a agregação de partículas finas em forma de flocos.

Segundo Chaves (2013), existem dois mecanismos de floculação para os polímeros. O primeiro mecanismo ocorre com um polímero de cadeia curta com carga elétrica contrária à carga da partícula, quando o floculante adsorve de forma plana em uma área restrita da superfície, neutralizando as cargas dessa área, a partícula irá possuir uma área com uma carga cercada por cargas de sinal oposto. Deste modo uma área positiva de uma partícula poderá atrair uma área negativa de outra partícula e vice-versa, formando os flocos. Na Figura 7 é possível observar a adsorção de forma plana de um polímero com carga positiva em partículas com cargas negativas.

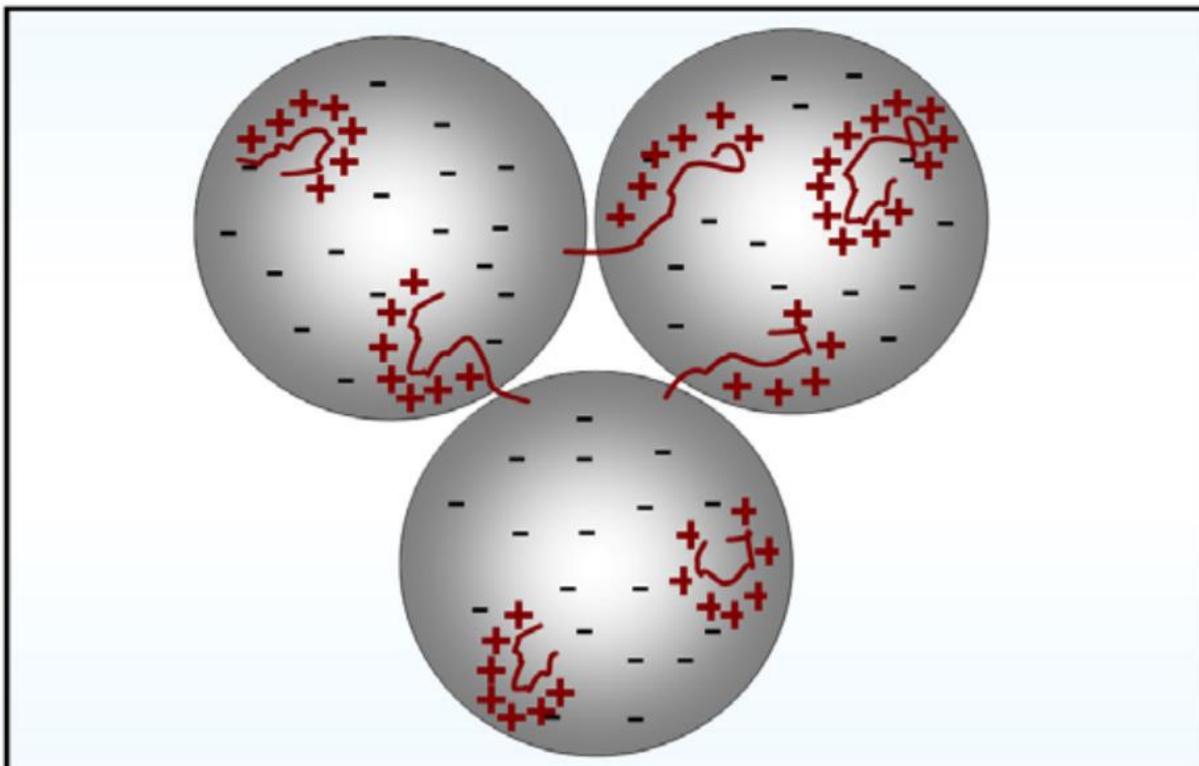


Figura 7 - Demonstração do Floculante adsorvido de forma plana nas partículas.

Fonte: OLIVEIRA E RUBIO (2011)

Citado por Chaves (2013), outro mecanismo é o da formação de pontes, onde se utiliza polímeros de cadeias maiores, o esquema de formação de pontes é exibido na Figura 8. Esses polímeros se adsorvem apenas em alguns pontos, deixando o resto da cadeia livre para adsorver em outra partícula. Quanto maior a cadeia do polímero maior será o floco formado, porém quanto maior o floco maior retenção de água no floco.

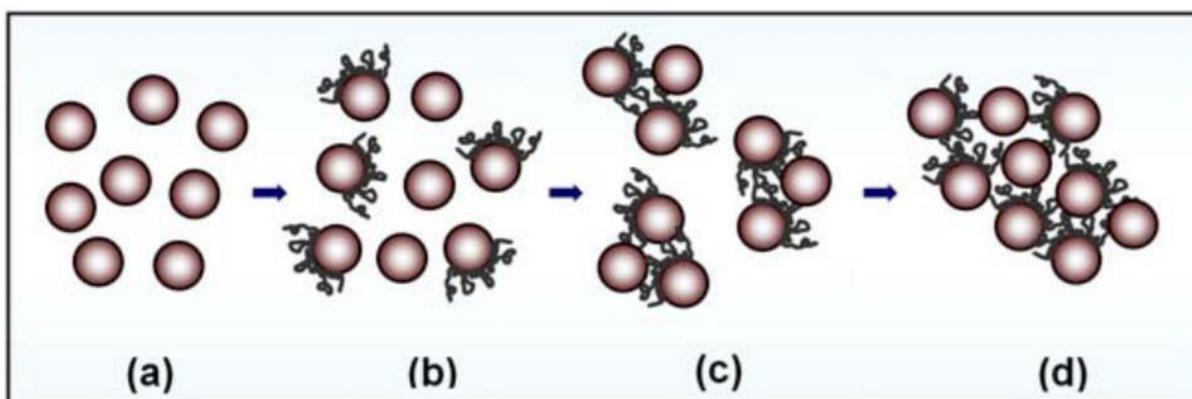


Figura 8 - Demonstração de Flocculação por pontes Poliméricas.

Fonte: OLIVEIRA E RUBIO (2011, p.16)

Oliveira *et al.* (2004) citam que para a escolha do floculante deve-se considerar alguns fatores do reagente: tamanho da cadeia molecular, natureza iônica do polímero, densidade iônica e as características químicas dos grupos ativos da molécula. Deve-se também salientar que cada operação de separação sólido/líquido necessita de um tipo diferente de floco, por exemplo no espessamento é necessário flocos grandes enquanto na filtração o floco deve ser compacto, deste modo, o tipo de floco desejado apresenta um papel muito importante na hora da escolha do floculante.

A eficiência dos mecanismos de floculação é controlada por alguns fatores, tais como: agitação do sistema; porcentagem de sólidos; pH e temperatura. A agitação do sistema está ligada diretamente à chance da colisão entre as partículas, com a quebra de flocos e com a sedimentação do sistema. Ou seja, deve-se encontrar um valor ideal de agitação onde seja possível atingir o máximo de colisões, prevenindo uma sedimentação e com um valor mínimo de quebra de flocos.

A porcentagem de sólidos também é relacionada à colisão das partículas, sendo que quanto maior a porcentagem de sólidos maior o contato entre partículas e mais rápido será a interação das partículas com floculante.

Um dos parâmetros mais influentes na eficiência é o pH da solução, porque o floculante reage com as cargas da superfície da partícula e essas cargas variam de acordo com o solvente que é utilizado. Os principais íons capazes de reagir com as cargas elétricas da superfície, assim determinando a mesma, são os íons de hidrogênio ( $H^+$ ) e íons hidroxila ( $OH^-$ ). Já o aumento da temperatura traz uma maior colisão entre as partículas assim melhorando a adsorção do floculante.

### **3. METODOLOGIA**

A massa inicial da amostra utilizada no estudo foi, de 55 kg de rejeito de minério de ferro, provenientes da empresa Minerita Ltda, situada no Complexo Serra Azul.

Na realização dos testes de sedimentação foram utilizados quatro reagentes, sendo eles um coagulante, um floculante e dois reguladores de pH. O coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio com o nome comercial de Flotisor OT 7429 que foi fornecido pela empresa Clariant. O floculante também fornecido pela empresa Clariant, um copolímero de acrilamida, denominado Flotisor FL 7130. Os reguladores de pH foram a hidróxido de sódio (NaOH) em concentração de 10 % m/m e o ácido clorídrico (HCl) em concentração 30 % m/m.

#### **3.1 Preparação da amostra**

A primeira etapa de preparação da amostra de rejeito de minério de ferro foi a secagem do material na estufa a 100°C, em sequência o seu peneiramento a seco em uma peneira de 150 µm para a classificação do material e uma posterior desagregação de torrões.

Separaram-se as alíquotas utilizadas para os testes através de uma pilha alongada que foi produzida após a pilha cônica. Formou-se uma pilha com aproximadamente 1,8 metros, distribuindo o material no sentido direita para esquerda e depois da esquerda para a direita e assim até que todo o material fosse empilhado. O material foi dividido de modo a obter 60 amostras para o teste de sedimentação em proveta, destas foram 30 com massa de 300 g e 30 com massa de 543 g, e 12 amostras para a realização dos ensaios de caracterização contendo cada uma 200 g. A Figura 9 apresenta o fluxograma de preparação da amostra e a Figura 10 a pilha alongada realizada para homogeneização e quarteamento da amostra.

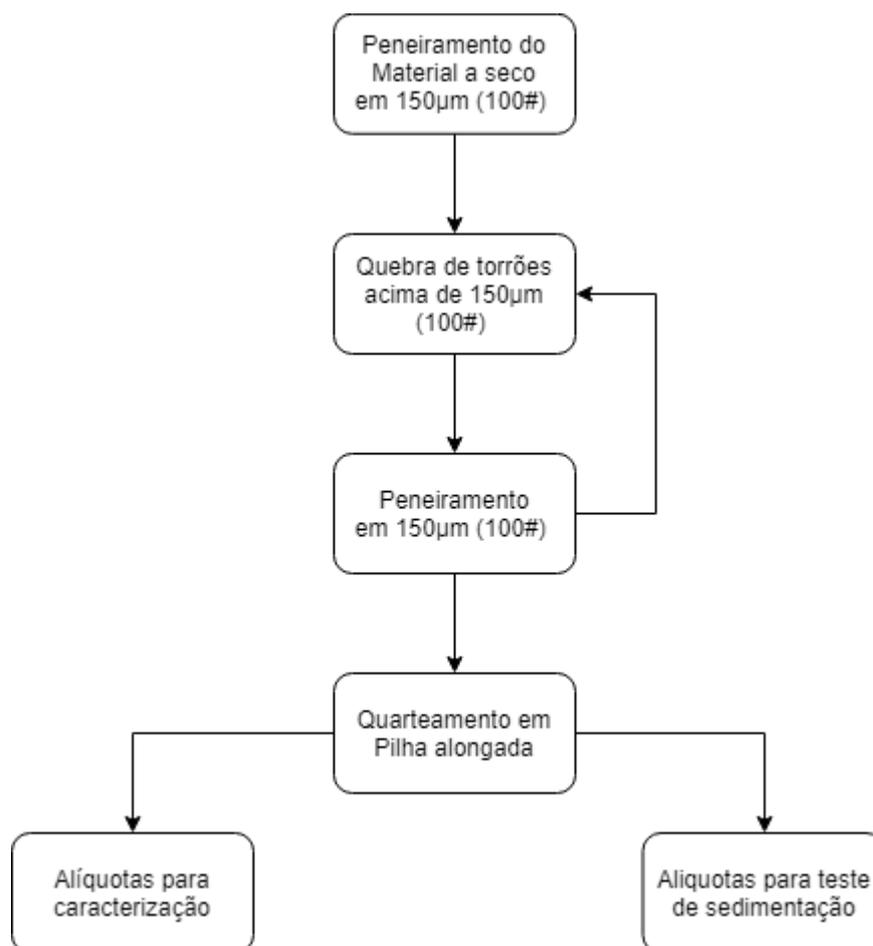


Figura 9 - Fluxograma de preparação de amostra.



Figura 10 - Pilha alongada.

### 3.2 Caracterização da amostra

A seguir neste tópico será abordado os testes para a caracterização da amostra de rejeito de minério de ferro. Os ensaios realizados foram: Caracterização mineralógica com auxílio do estereomicroscópio, picnometria e cálculo de teor de ferro e a análise granulométrica através do peneiramento a úmido.

#### 3.2.1 Caracterização mineralógica

Os minerais presentes na amostra foram determinados com a utilização de um estereomicroscópio da marca Laboran, do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, unidade Araxá. A Figura 11 mostra o estereomicroscópio usado.



Figura 11- Estereomicroscópio.

### 3.2.2 Picnometria e cálculo do teor de ferro da amostra

Para o cálculo da massa específica do rejeito foi realizado o método de picnometria, sendo realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, unidade Araxá. O método consistiu em pesar o picnômetro em quatro situações diferentes. Sendo a primeira com ele vazio, a segunda com uma quantidade de material suficiente para cobrir o fundo do picnômetro, terceira com material junto a água e por último com o picnômetro cheio de água. As etapas realizadas foram as seguintes:

- Pesagem do picnômetro vazio.
- Em seguida, preencheu-se totalmente o fundo do picnômetro com o material sólido. A massa foi aferida.
- Com o auxílio de uma pisseta adicionou água ao picnômetro até que ele estivesse cheio, com cuidado para evitar a formação de bolhas. Depois de cheio foi secado a parte externa do picnômetro e novamente o conjunto foi pesado.
- Na última etapa o picnômetro foi preenchido apenas de água e sua massa aferida novamente.

Com os resultados das massas em mãos utilizou-se da Equação 3 para o cálculo da massa específica.

$$ds = \frac{(A2-A1)}{(A4+A2)-(A1+A3)} \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde:

- ds densidade do sólido;
- A1 massa do picnômetro vazio;
- A2 massa do picnômetro com amostra;
- A3 massa do picnômetro com amostra e água;
- A4 massa do picnômetro com água.

Este procedimento foi realizado três vezes. O resultado final foi a média calculada dos três ensaios admitindo um desvio padrão de no máximo 5%. Na Figura 12 é mostrado o picnômetro em todas as etapas do teste.

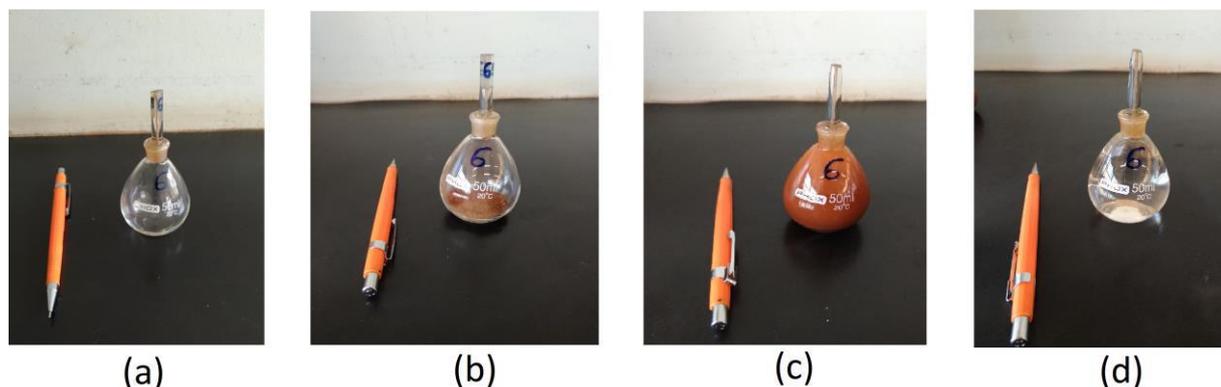


Figura 12 – (a) picnômetro vazio, (b) picnômetro com amostra, (c) picnômetro com amostra e água, (d) picnômetro com água.

O cálculo do teor de ferro da amostra foi realizado após a determinação da densidade do rejeito de minério de ferro. Este método considera que a amostra de minério de ferro é constituída apenas pelos minerais de quartzo e hematita, sem a presença de outros contaminantes. Como demonstrado por BORGES (2015), esta metodologia produz um resultado muito similar ao resultado de uma análise química. Primeiro se determina a quantidade de hematita através da Equação 4 apresentada a seguir.

$$\%He = \frac{dH \cdot (dS - dQ)}{dS \cdot (dH - dQ)}$$

Eq.(4)

Onde:

- %He Porcentagem de Hematita presente na amostra;
- dH Densidade da Hematita, considerado 5,30 g/cm<sup>3</sup>;
- dQ Densidade do Quartzo, considerado 2,65 g/cm<sup>3</sup>;
- dS Densidade do rejeito, obtido através da picnometria.

Em seguida para encontrar o valor do teor de ferro deve-se multiplicar a porcentagem de hematita encontrada da amostra pela quantidade de ferro presente na hematita, que é de 69,9%. A Equação 5 demonstra o cálculo a ser realizado.

$$\text{Teor de Fe} = \%He \cdot 0,699$$

Eq.(5)

### 3.2.3 Análise Granulométrica

A análise da granulometria do rejeito foi realizada um peneiramento a úmido no peneirador vibratório suspenso. Como material foi constituído de rejeito de minério de ferro era esperado uma grande quantidade de material abaixo de 37  $\mu\text{m}$ . Assim a escolha da série de peneiras para o peneiramento a úmido foi feita para que apresentassem as peneiras de menor abertura encontradas no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, unidade Araxá. Na Tabela 2 é apresentada série de peneiras utilizadas para a análise granulométrica.

**Tabela 2- Série de peneiras utilizadas.**

Mesh (#)	Abertura em $\mu\text{m}$
30	592
45	352
65	209
80	176
100	148
120	124
150	105
170	88
200	74
230	62
270	52
325	44
400	37

O peneiramento foi feito em duas etapas pois o peneirador não comporta esta quantidade de peneiras, o primeiro da fração mais grosseira e o segundo da fração mais fina. No início do peneiramento uma amostra de aproximadamente 200 g foi colocada na primeira peneira, e com o auxílio de uma mangueira e um balde e foi realizado o peneiramento até que a água passante da última peneira estivesse visivelmente transparente. O fundo da primeira etapa de peneiramento foi colocado em um balde e utilizado para alimentar a segunda etapa do peneiramento. A Figura 13 apresenta o peneirador utilizado para o teste de análise granulométrica.



**Figura 13 – Peneirador suspenso.**

O material passante da peneira de 400# (37  $\mu\text{m}$ ) foi recolhido em um balde e após 2 dias para a decantação do material foi retirado o excesso de água e em seguida colocado em bandejas e levados a estufa. Enquanto o material retido em cada peneira foi colocado em pratos separados e levados a estufa. Após a secagem do material, o mesmo foi pesado para a confecção da curva de distribuição granulométrica.

### **3.3 Testes de sedimentação em proveta**

Nos ensaios de sedimentação utilizaram-se provetas de 1000 mL, que apresentavam no seu exterior marcas feitas com papel milimetrado para facilitar a visualização da altura da interface de sedimentação. Foi analisada a influência de três variáveis: dosagem de reagente, pH e porcentagem de sólidos. Na Figura 14 encontra-se a proveta utilizada para os testes de sedimentação.



**Figura 14 – Proveta utilizada nos testes.**

Na realização do teste de sedimentação em proveta foram utilizados dois reagentes agregantes, um floculante e outro um coagulante. A preparação do floculante Flotisor FL 7130 foi feita utilizando uma solução aquosa altamente diluída de 0,05% em massa como indicado pelo fabricante. Essa solução era preparada com a mistura de 0,1 grama de floculante e 199,9 g de água, a mistura era agitada manualmente durante uma hora para a total solubilização do floculante.

Para a preparação do coagulante Flotisor OT 7429 foi pesado uma massa de um grama de coagulante e colocada em um balão volumétrico de 100,00 mililitros, e posteriormente o volume completado com água destilada.

Na realização de cada teste foi aferida a massa de rejeito de ferro, massa de água e também a massa da solução de reagente utilizada. As massas da solução de floculante e da solução de coagulante foram calculadas através da massa de sólido e do volume de solução do teste de sedimentação em proveta. A Tabela 3 e a Tabela 4 descrevem todos os testes de sedimentação em proveta realizados.

**Tabela 3 - Testes de sedimentação em proveta na ausência de floculante/coagulante.**

Testes na ausência de reagentes		
Testes	pH	% de sólidos
1	5	25
2	10	25
3	5	40
4	10	40
1 (*R)	5	25
2 (*R)	10	25
3 (*R)	5	40
4 (*R)	10	40

\*R-réplica

**Tabela 4- Testes de sedimentação em proveta com a presença dos reagentes floculante e coagulante.**

Testes utilizando floculante				Teste utilizando coagulante			
Testes	Dosagem (g/t)	pH	% de sólidos	Testes	Dosagem (mg/L)	pH	% de sólidos
1	20	5	25	1	100	5	25
2	40	5	25	2	300	5	25
3	20	10	25	3	100	10	25
4	40	10	25	4	300	10	25
5	20	5	40	5	100	5	40
6	40	5	40	6	300	5	40
7	20	10	40	7	100	10	40
8	40	10	40	8	300	10	40
1 (*R)	20	5	25	1 (*R)	100	5	25
2 (*R)	40	5	25	2 (*R)	300	5	25
3 (*R)	20	10	25	3 (*R)	100	10	25
4 (*R)	40	10	25	4 (*R)	300	10	25
5 (*R)	20	5	40	5 (*R)	100	5	40
6 (*R)	40	5	40	6 (*R)	300	5	40
7 (*R)	20	10	40	7 (*R)	100	10	40
8 (*R)	40	10	40	8 (*R)	300	10	40

\*R-réplica

Com todas as massas determinadas transferiu-se o rejeito e a água para uma proveta de 1000,0 mL graduada. A mistura foi agitada até se formar uma polpa homogênea com todas as partículas em suspensão, como mostra a Figura 15. Em seguida, foi determinado o pH da solução através do pHmêtro modelo HANNA M-

7962, e o pH ajustado para o valor necessário para cada teste utilizando ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH).



**Figura 15 – Polpa homogênea.**

Assim que o pH foi ajustado, adicionou-se a solução de floculante ou de coagulante em seguida foi realizado uma nova agitação para que ocorresse a interação entre o reagente e a polpa mineral. Ao final da agitação foi acionado o cronômetro e anotado a altura da interface de clarificado até o tempo final de duas horas e uma outra medida após 20 horas do início do teste. Os intervalos utilizados para as marcações da altura da interface são exibidos na Tabela 5.

**Tabela 5 – Tempos de medida do teste de sedimentação**

TEMPO (s)	TEMPO (s)	TEMPO (s)	TEMPO (s)
10	160	330	960
20	170	360	1020
30	180	390	1080
40	190	420	1140
50	200	450	1200
60	210	480	1500
70	220	510	1800
80	230	540	2100
90	240	570	2400
100	250	600	2700
110	260	660	3000
120	270	720	3300
130	280	780	3600
140	290	840	7200
150	300	900	72000

Após o termino do teste foi confeccionado a curva de sedimentação e calculada a velocidade de sedimentação através da Equação 6:

$$V_s = \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde  $V_s$  representa a velocidade de sedimentação,  $\Delta H$  representa a diferença entre a altura e  $\Delta T$  representa a diferença de tempo.

Após uma hora do início do teste de sedimentação em proveta realizou-se uma análise visual do clarificado gerado no teste.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão abordados os resultados dos ensaios de caracterização da amostra e dos testes de sedimentação em proveta.

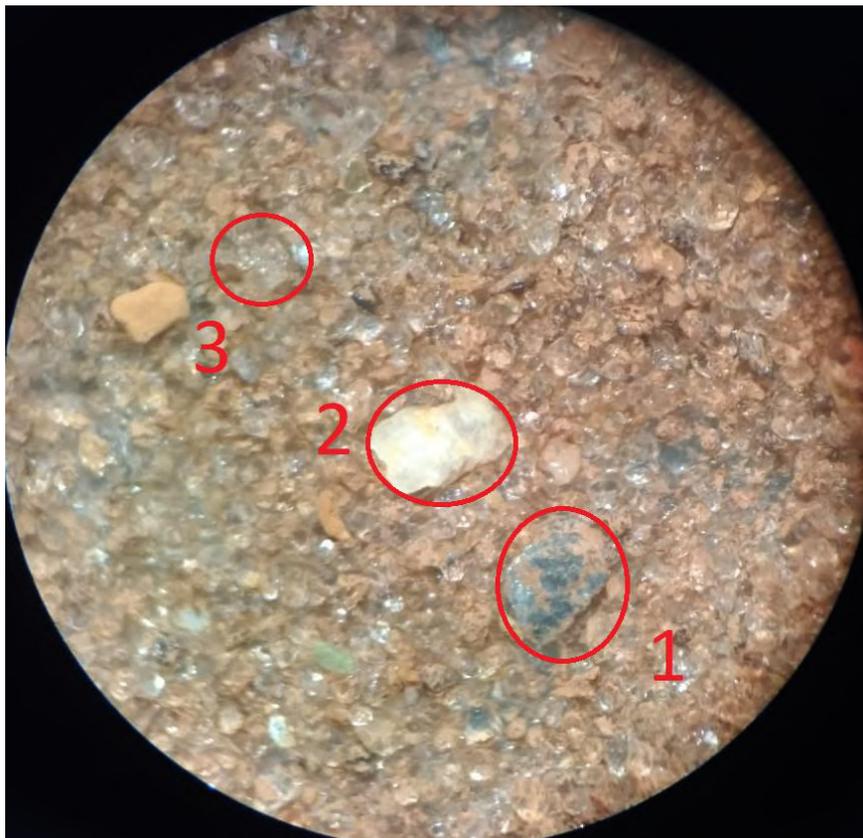
### 4.1 Caracterização

#### 4.1.1 Caracterização mineralógica

Os minerais que conseguiram ser observados na amostra foram identificados através do estereomicroscópio. Através dele foi possível observar algumas diferenças entre os minerais, entre elas a cor, o brilho, diafaneidade e a fratura (Tabela 6). Na Figura 16, é possível perceber que a amostra apresenta uma grande quantidade de quartzo e pouca de hematita, mostrando que a amostra está de acordo com o esperado de um rejeito de minério de ferro, ou seja, um material rico em quartzo e pobre em hematita.

**Tabela 6 - Propriedade dos minerais.**

	Propriedades	
Hábito	Granular	Granular
Cor	Preto	Branco/Incolor
Brilho	Metálico	Vítreo
Diafaneidade	Opaco	Opaco/Transparente/ Translúcido
Minerais	Hematita	Quartzo



**Figura 16 – Minerais presentes na amostra.**  
**(1) Hematita, (2) Quartzo opaco e (3) Quartzo transparente.**

#### **4.1.2 Densidade e teor de ferro da amostra**

Os resultados dos ensaios de picnometria se encontram na Tabela 7. Os ensaios de picnometria foram realizados em triplicata e apresentam um valor médio final de  $2,93 \text{ g/cm}^3$ . Como o mineral-minério da empresa Minerita é a hematita e a ganga em sua grande maioria é composta apenas de quartzo, o teor de ferro foi calculado através da Equação 4 e Equação 5 encontrou-se um valor de 13,51 %.

**Tabela 7 – Resultados da picnometria do rejeito de ferro.**

Testes	1	2	3
Massa do picnômetro (g)	31.03	30.06	29.86
Massa do picnômetro com água (g)	81.44	80.14	80.52
Massa do picnômetro com amostra (g)	33.62	34.51	33.97
Massa do picnômetro com amostra e água (g)	83.17	82.69	83.22
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3.012	2.875	2.915
Média da densidade (g/cm <sup>3</sup> )		2.934	
Desvio padrão (g/cm <sup>3</sup> )		0.070	
Teor de Fe (%)		13,51	

#### 4.1.3 Distribuição granulométrica

O resultado do peneiramento a úmido é apresentado na Tabela 8 e a partir dessa tabela foi construído o gráfico encontrado na Figura 17. No teste de distribuição granulométrica utilizou-se uma amostra com massa de 198 g. Foi observada uma perda de 1,87 g, correspondendo 0,94 %, que está dentro do valor máximo de perda aceitável que era de 5%. Através da análise dos resultados foi visto que 46,40 % do material era passante na peneira de 37 µm (400#), o que caracteriza um material com uma grande quantidade de partículas finas que são difíceis de sedimentar. O d<sub>80</sub> encontrado, através da curva granulométrica, se encontra aproximadamente em 124 µm.

Tabela 8 – Resultado da análise granulométrica.

Mesh (#)	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Massa retida (g)	Retido simples (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
30	592	1.75	0.89	0.89	99.11
45	352	1.70	0.87	1.76	98.24
65	209	7.40	3.77	5.53	94.47
80	176	5.69	2.90	8.43	91.57
100	148	6.58	3.35	11.79	88.21
120	124	9.50	4.84	16.63	83.37
150	105	10.85	5.53	22.16	77.84
170	88	17.03	8.68	30.85	69.15
200	74	11.69	5.96	36.81	63.19
230	62	13.29	6.78	43.58	56.42
270	52	9.27	4.73	48.31	51.69
325	44	7.63	3.89	52.20	47.80
400	37	2.75	1.40	53.60	46.40
-400	-37	91.00	46.40	100.00	0.00
Total		196.13	Perda de massa (%)		1.87

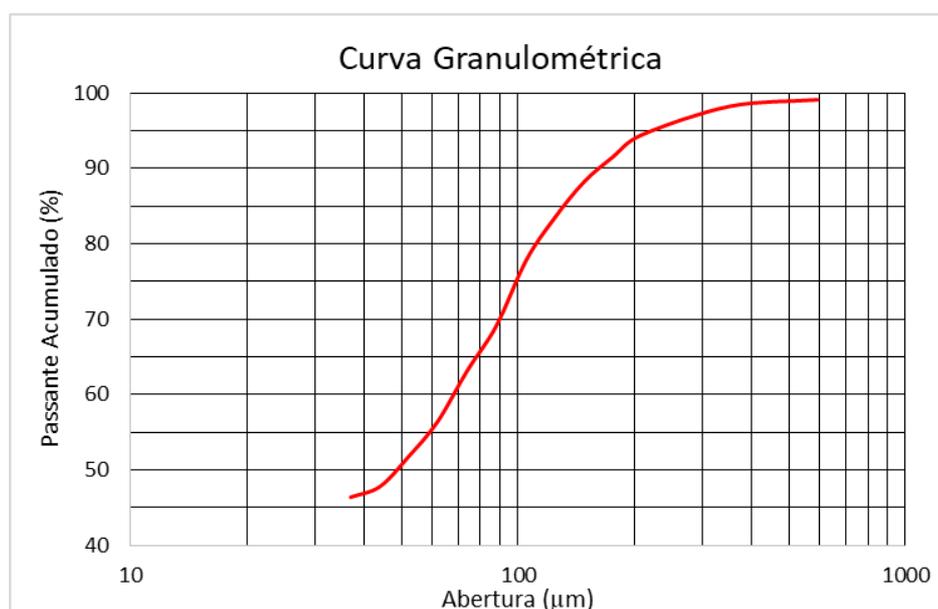


Figura 17 - Curva granulométrica

## 4.2 Testes de sedimentação em proveta na ausência de reagentes

Nos testes de sedimentação na ausência de reagentes foram feitos 4 testes. Nestes avaliou-se o efeito da porcentagem de sólidos e do pH da solução na velocidade de sedimentação. A Tabela 9 apresenta o resultado de velocidade de sedimentação e uma análise qualitativa da turbidez do clarificado. Durante os testes ocorreram alguns problemas com o turbidímetro utilizado, assim a análise da turbidez foi apenas visual.

**Tabela 9 – Resultados do teste de sedimentação na ausência de coagulante e/ou floculante.**

Testes de sedimentação sem a presença de reagentes			
	% Sólidos	Velocidade (mm/s)	Turbidez
pH 10	40%	Sem interface	Alta
	40% (2)	Sem interface	Alta
	25%	Sem interface	Alta
	25%(2)	Sem interface	Alta
pH 5	40%	0,059	Baixa
	40% (2)	0,065	Baixa
	25%	0,265	Baixa
	25%(2)	0,213	Baixa

Como demonstrado na Tabela 9, os testes realizados em pH 10 não foram possíveis de observar uma interface gerada no sistema e apresentaram clarificados com uma grande presença de sólidos, apresentando visualmente um líquido de cor alaranjada. Isto pode ter ocorrido porque para o valor de pH 10 pode ocorrer na superfície das partículas uma repulsão entre elas, desestabilizando a solução, impedindo a formação de uma interface e deixando grande parte dos finos em suspensão. Lopes (2017) encontrou resultados semelhantes quando realizou teste de sedimentação em proveta em pH 9, mesmo com a presença de um floculante.

Também é possível observar uma menor velocidade de sedimentação para a maior porcentagem de sólidos, 40 % de sólidos. De acordo com SAMPAIO *et al.* (2007) quanto maior a quantidade de partículas maior a chance de colisão entre elas, reduzindo a velocidade de sedimentação, assim a taxa de sedimentação deixa de ser constante e passa a ser decrescente.

A Figura 18 mostra a diferença entre os clarificados quando alterado o pH, na Figura 18 (a) representa o clarificado em pH 5, que foi classificado como baixa turbidez, e a foto (b) o clarificado com pH 10, que foi classificado como alta turbidez.



Figura 18- (a) Clarificado com pH 5, (b) clarificado com pH 10.

### 4.3 Testes de sedimentação na presença do floculante

Os testes na presença do floculante (Flotisor FL 7130) foram realizados 16 ensaios avaliando condições distintas. Estes ensaios tiveram como variáveis a porcentagem de sólidos, dosagem de floculante e pH do meio. Os resultados dos testes com o uso de floculante são retratados pela Tabela 10.

**Tabela 10 – Resultados do teste de sedimentação com a presença de floculante.**

Testes com floculante				
		% Sólidos	Velocidade (mm/s)	Turbidez
Floculante (20g/T)	pH 10	40%	0,349	Alta
		40% (*R)	0,372	Alta
		25%	3,200	Alta
		25%(*R)	2,714	Alta
	pH 5	40%	0,152	Baixa
		40% (*R)	0,243	Baixa
		25%	2,567	Baixa
		25%(*R)	1,780	Baixa
Floculante (40g/T)	pH 10	40%	0,377	Alta
		40% (*R)	0,414	Alta
		25%	1,880	Alta
		25%(*R)	2,075	Alta
	pH 5	40%	0,312	Baixa
		40% (*R)	0,327	Baixa
		25%	2,557	Baixa
		25%(*R)	2,343	Baixa

\*R-réplica

Com a utilização do floculante foi possível gerar uma interface de sedimentação mesmo em pH 10, porém novamente é nítido a presença de uma grande quantidade de sólidos no clarificado para este valor de pH.

Em relação ao pH da solução, observa-se um pequeno aumento de velocidade para o valor de pH 10. Esse aumento de velocidade, quando comparado a variação de pH 5 para pH 10, é seguido do aumento da turbidez do clarificado, que deixa de ser um clarificado com poucos sólidos e transparente para se tornar um clarificado com uma grande quantidade de sólidos com uma cor alaranjada. Nos testes realizados por Braz (2017), com a utilização de um minério de ferro, observa-se um comportamento similar com uma velocidade maior em testes com pH mais básicos próximos ao pH 10.

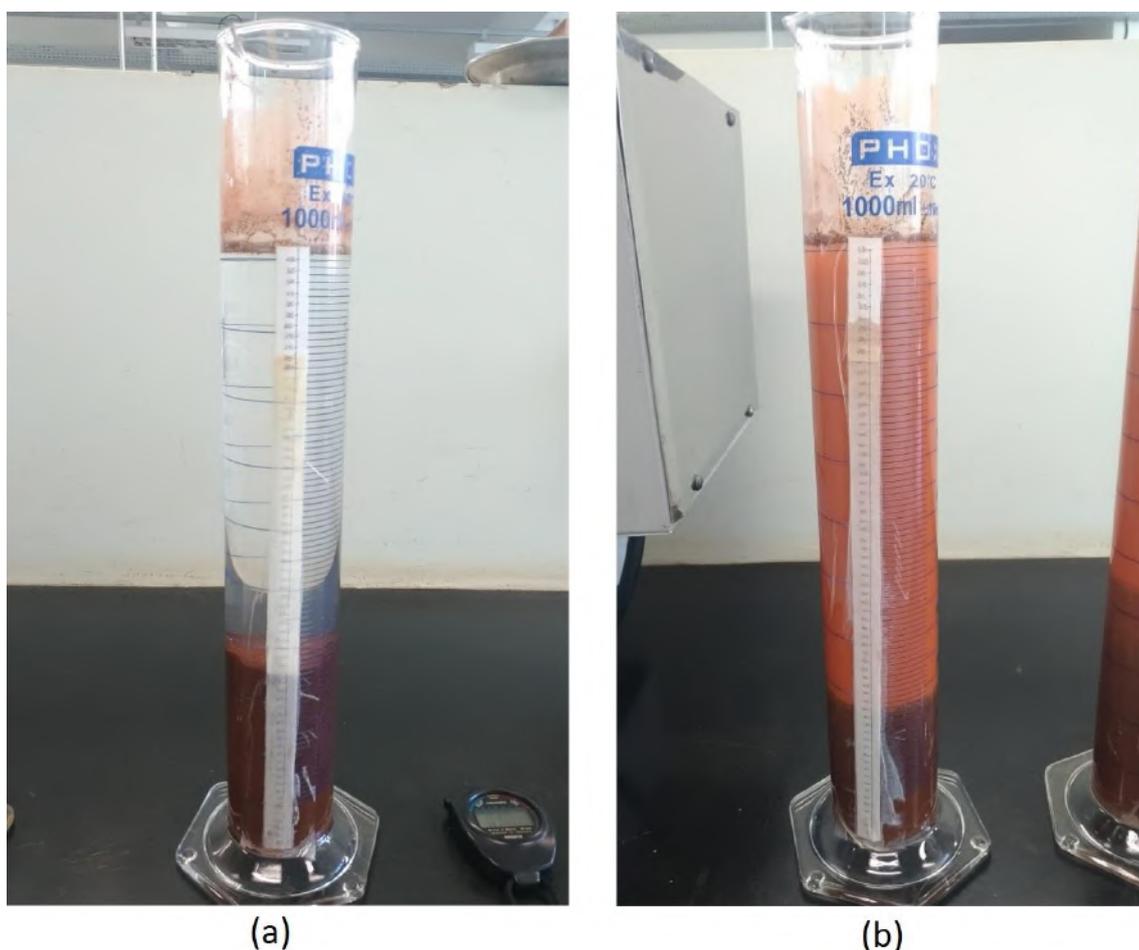
O aumento da dosagem de floculante também trouxe uma tendência de aumento na velocidade de sedimentação para os testes no pH 5, mas era visível a formação de flocos muito grandes, pois a altura da interface no tempo final se encontrava bem mais alta que nos testes com 20 g/t, que retém uma grande quantidade de água atrapalhando a eficiência da separação sólido-líquido. Esta

relação entre o aumento da dosagem com o tamanho dos flocos formados e velocidade de sedimentação também foi encontrado por Lemos (2017).

Entre as três variáveis utilizadas a que apresentou maior influência na velocidade foi a porcentagem de sólidos. Como dito anteriormente, com o seu aumento ocorre uma redução na velocidade de sedimentação.

Levando em consideração a velocidade de sedimentação, o gasto de floculante, o tamanho dos flocos e a turbidez do clarificado o melhor resultado encontrado nos testes de sedimentação com a presença de floculantes foi o teste com 20 g/t de floculante em pH 5 e com 25 % de sólidos.

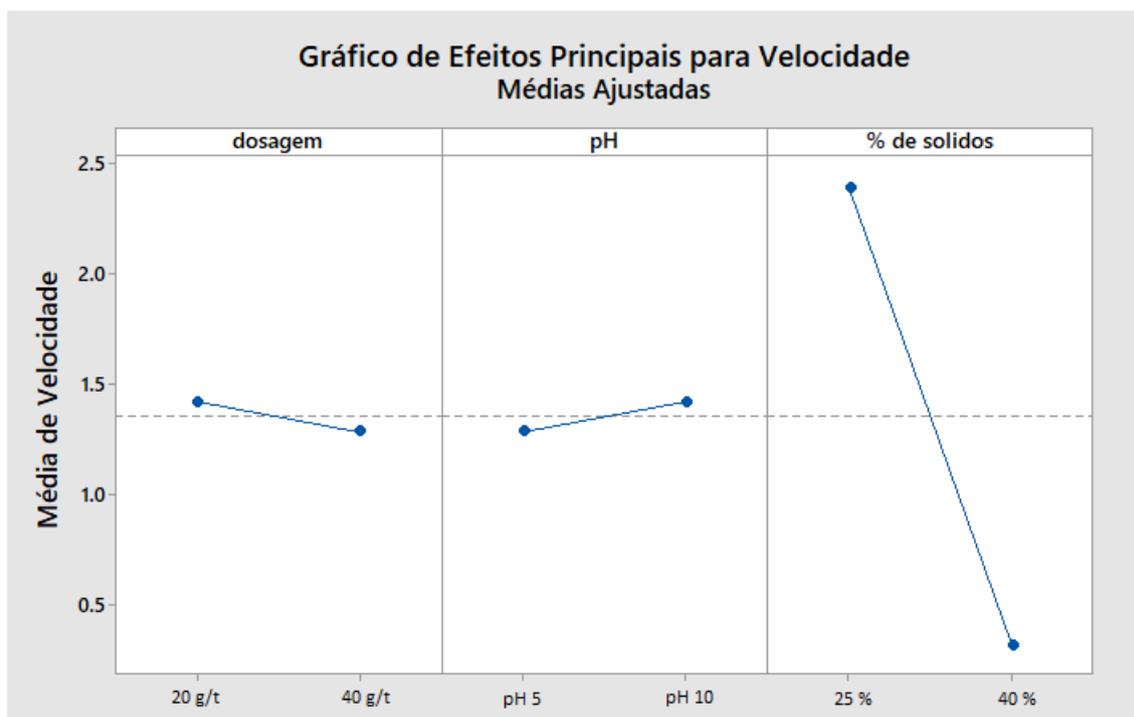
A Figura 19 mostra dois exemplos de testes realizados com a presença de floculante.



**Figura 19 – (a) Teste com 20g/T de floculante com 40% de sólidos e pH5, (b) Teste com 20g/T de floculante com 25% de sólidos e pH 10.**

Os testes utilizando floculante foi feita uma análise estatística através do programa Minitab® 2018. Com o auxílio do programa foi plotado um gráfico de Efeitos Principais para Velocidade, ele é exibido na Figura 20.

Esse gráfico de Efeitos Principais para Velocidade mostra a influência de cada uma das três variáveis estudadas: dosagem de floculante, pH e porcentagem de sólidos. Apresentado qual o tipo de efeito da variável, se é positivo ou negativo na velocidade média de sedimentação.



**Figura 20- Gráfico de efeitos principais do floculante.**

Segundo a Figura 20, a dosagem gerou uma pequena influência negativa, que mostra uma redução da sua velocidade média de sedimentação, quando seu valor varia de 20 g/t até 40 g/t. Para o pH, a sua variação trouxe um pequeno aumento da velocidade média de sedimentação. É visto que a porcentagem de sólidos foi a variável que gerou uma maior influência na velocidade de sedimentação, sendo que o seu aumento ocasionou um efeito negativo sobre a velocidade. Isto é observado pela sua grande inclinação negativa na reta entre 25 % e 40 %.

Com a utilização do programa também foi possível a otimização do sistema, a Figura 21 mostra o gráfico de otimização gerado. O programa apresenta os valores que juntos promovem o melhor resultado, eles se encontram em vermelho. O resultado encontrado da otimização foi a dosagem de 20 g/t de floculante em pH 10 e 25 % de sólidos gerando uma velocidade de sedimentação de 2,95 mm/s.

O resultado da otimização encontrado pelo programa leva em consideração apenas a velocidade de sedimentação, porém o melhor resultado dos testes deve

englobar os aspectos ambientais, a turbidez e a retenção de água nos flocos, e os econômicos, que seria o gasto de reagente. Por isso o melhor resultado dos testes de sedimentação com a presença do floculante é 20 g/t de floculante em pH 5 e com 25 % de sólidos.

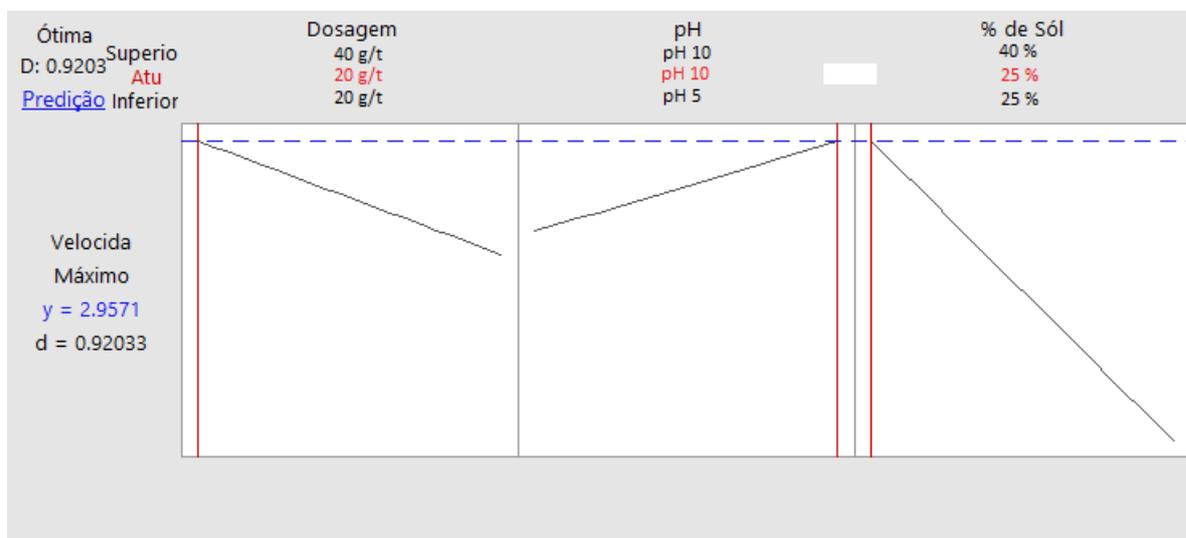


Figura 21– Otimização do sistema para o uso do floculante.

#### 4.4 Testes de sedimentação na presença do coagulante

A Tabela 11 apresenta os resultados de velocidade e turbidez para os testes utilizando o coagulante (Flotisor OT 7429). Foram feitos 16 ensaios para avaliar a dosagem do coagulante, variando-se o pH e a porcentagem de sólidos.

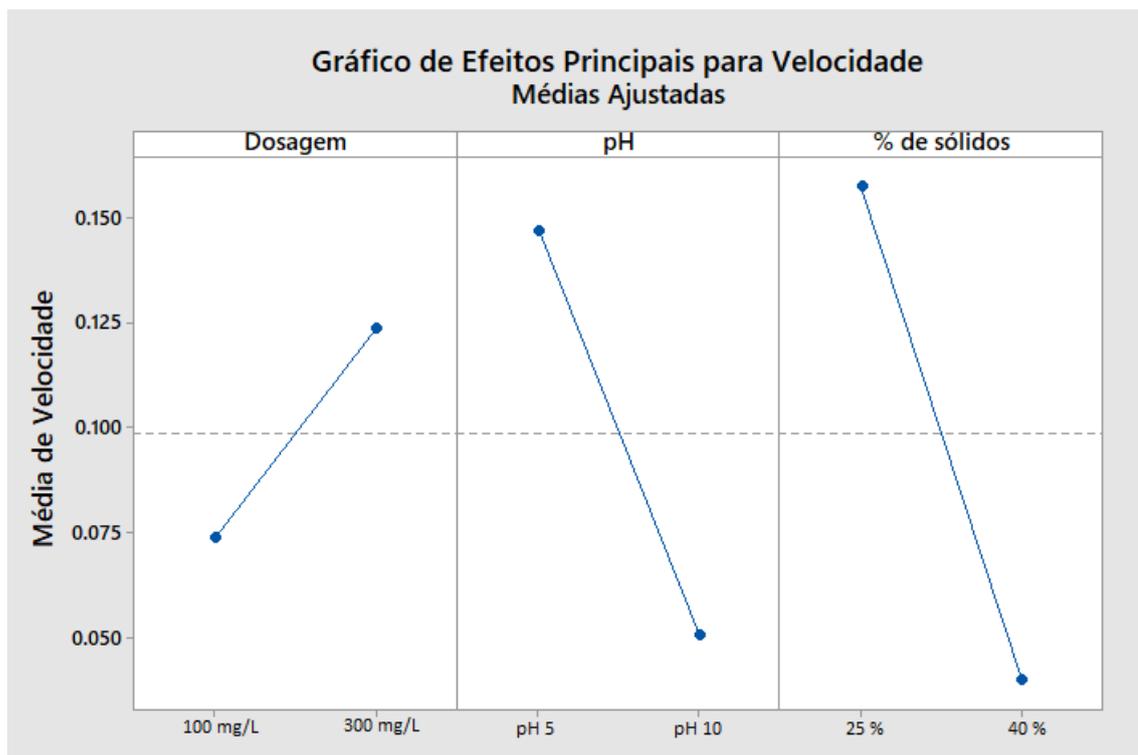
Tabela 11 -Resultados do teste de sedimentação com a presença do coagulante.

Testes com coagulante				
		% Sólidos	Velocidade (mm/s)	Turbidez
Coagulante (100mg/L)	pH 10	40%	Sem interface	Alta
		40% (2)	Sem interface	Alta
		25%	Sem interface	Alta
		25%(2)	Sem interface	Alta
	pH 5	40%	0,070	Baixa
		40% (2)	0,062	Baixa
		25%	0,232	Baixa
		25%(2)	0,226	Baixa
Coagulante (300mg/L)	pH 10	40%	0,037	Alta
		40% (2)	0,024	Alta
		25%	0,157	Alta
		25%(2)	0,186	Alta
	pH 5	40%	0,067	Baixa
		40% (2)	0,060	Baixa
		25%	0,228	Baixa
		25%(2)	0,230	Baixa

Na dosagem mais baixa de coagulante, 100 mg/L, os testes em pH 10 não apresentaram uma interface de sedimentação. Como mostrado por Guedes (2004), em condições de pH básicos suspensões contendo óxidos de ferro geram uma turbidez maior do que uma condição de pH ácido. Porém, com o aumento da dosagem foi possível ver uma formação de uma interface de difícil visualização e de baixa velocidade de sedimentação.

Em relação à velocidade de sedimentação o aumento da dosagem não pareceu surtir efeito nos testes realizados em pH 5. A porcentagem de sólidos trouxe novamente uma grande influência de redução da velocidade quando aumentada seu valor.

Os resultados dos testes com coagulante também foram analisados estatisticamente. A Figura 22 representa o Gráfico de Efeitos Principais para Velocidade para os resultados dos testes com a presença do coagulante.



**Figura 22- Gráfico de efeitos principais do coagulante.**

De acordo com a Figura 22, a dosagem gerou uma influência positiva que mostra um aumento da sua velocidade média de sedimentação, quando seu valor varia de 100 mg/L até 300 mg/L. Para o pH, a sua variação trouxe uma grande queda para a velocidade de sedimentação, pois não foi possível visualizar uma interface para alguns testes com pH 10, assim estas velocidades foram colocadas como aproximadamente 0. Novamente foi notado que a porcentagem de sólidos foi a variável que gerou uma maior influência na velocidade de sedimentação, sendo sua variação gerando um efeito negativo sobre a velocidade, que é observado pela maior queda do valor de velocidade entre 25 % e 40 %.

A resposta da velocidade também foi otimizada para o uso do coagulante. A Figura 23 mostra a otimização com os parâmetros de 300 mg/L, pH 5 e 25% de sólidos produzindo uma velocidade de 0.22 mm/s.

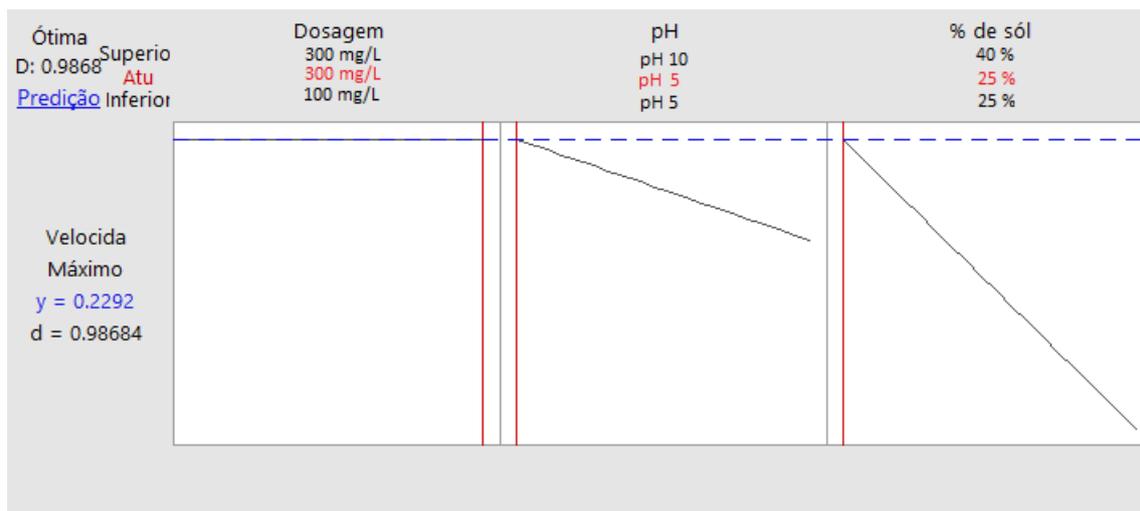


Figura 23- Otimização do sistema para o uso do coagulante.

#### 4.5 Comparação entre o uso dos reagentes

Os testes de sedimentação com a utilização do coagulante mostraram pouca eficiência quando comparados aos testes na ausência do mesmo, isto é, os resultados de velocidade de sedimentação mostraram uma variação não significativa com o uso do coagulante. A única diferença que deve ser notada foi a geração de uma interface quando utilizado em pH 10 e a maior dosagem (300mg/L), isto quer dizer que possivelmente com o aumento dessa dosagem possa gerar uma melhor resposta em relação a velocidade de sedimentação, porém são necessários mais testes para a comprovação desta suposição.

Quando comparado os testes na ausência de reagentes e com a presença do floculante o resultado foi o esperado, mostrando um grande aumento da velocidade de sedimentação e um clarificado mais transparente com a utilização do floculante.

Os resultados dos testes com o uso de floculante e coagulante mostraram que o uso do floculante se mostra bem mais interessante, pois não existe ganhos significativos de velocidade na utilização do coagulante. No entanto, para o floculante foi visto um grande aumento de velocidade. Tal fato é visualmente observado através da Figura 24, que traz a média, de cada duplicata, das velocidades obtidas nos testes de sedimentação em proveta.

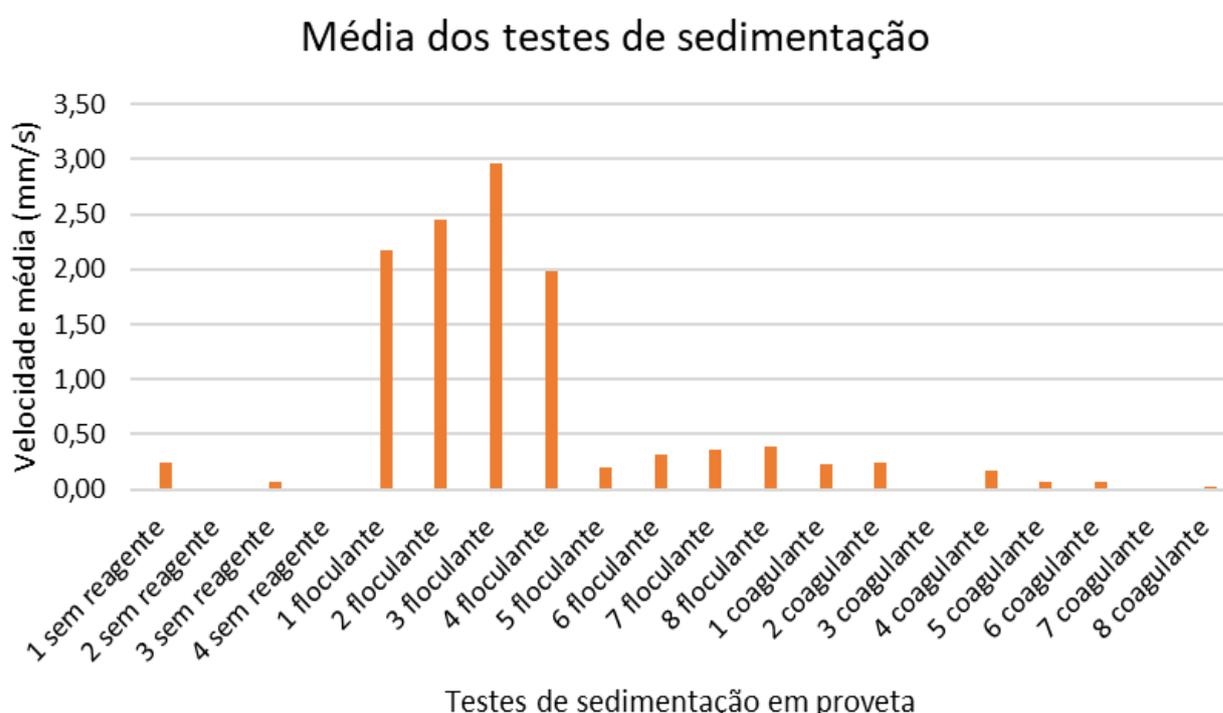


Figura 24 – Média de velocidade dos testes de sedimentação em proveta.

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado tinha como foco principal a análise do uso de floculante e um coagulante na sedimentação de um rejeito de minério de ferro. O resultado encontrado para os testes utilizando coagulante mostrou nenhuma variação significativa na velocidade de sedimentação e no clarificado, possivelmente pela baixa dosagem utilizada. Nos testes com utilização do floculante, foi visto um grande incremento na velocidade de sedimentação e uma melhora visual no clarificado.

A caracterização mineralógica mostra um rejeito de ferro contendo, quase em sua totalidade, apenas quartzo e hematita. Os ensaios de picnometria exibem uma média de densidade de  $2,93 \text{ g/cm}^3$ , e a partir desta densidade foi calculado um teor de ferro de aproximadamente 19,34 % no rejeito. Os ensaios de peneiramento mostraram que a amostra é constituída de 46,40 % de material passante em  $37 \mu\text{m}$ , com um  $D_{80}$  aproximadamente de  $124 \mu\text{m}$ .

Levando em consideração todas as respostas apresentadas, o melhor cenário encontrado pelos testes de sedimentação foram a utilização do floculante com dosagem de 20 g/T, pH 5 e 25 % de sólidos. Como o pH foi o único parâmetro com influência direta no clarificado e teve uma pequena atuação na variação da velocidade optou-se por este valor. Deste modo, este cenário apresentou a melhor junção de velocidade de sedimentação, clarificado com menor quantidade de sólidos e a menor retenção de água nos flocos.

## REFERÊNCIAS

ANDRIANI, K. F. **Efeito da adsorção de surfactantes catiônicos e aniônicos nas propriedades superficiais, reológicas e eletrocinéticas, de suspensões de bentonita**, Florianópolis, 2009.

ARAUJO, A. C. D.; VALADÃO, C. A. O.; HERNÁNDEZ, C. A. O. **Novas alternativas para disposição dos rejeitos: é possível se quebrar alguns paradigmas?**. Belo Horizonte: UFMG.

BALTAR, C. A. M. **Flotação no Tratamento de Minérios**. Editora Universitária. Recife: UFPE, 2010. 2ª Edição p 61-67.

BRANCHES, A. M. B. **Evolução temporal de uma superfície de pilha de rejeito em pasta: influência da rugosidade e do diâmetro dos sedimentos no processo erosivo**, Ouro Preto, 2015.

BRAZ, K. S.; NUNES, L. F.; F. GUEDES N. de J.; **Estudo do processo de separação sólido-líquido por sedimentação no setor mineiro-metalúrgico**. Revista Engenharia de Interesse Social. VOL. 1, NUM. 2, 2017, p. 1-7.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. [S.l.]: Oficina dos Textos, 2013.

DNPM. **Súmaro Mineral Brasileiro 2016**. Disponível em <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral>>. Acesso em: 20 de Outubro. 2018.

FALCUCCI, A. **A influência de floculantes poliméricos na formação de pastas minerais**., Belo Horizonte, Abril 2007.

GUEDES, C. D.; PEREIRA, J. G.; LENA, J. C. de; PAIVA, J. F.; **Coagulação/floculação de suspensões ricas em óxidos de ferro por sulfato de alumínio**. Quim. Nova, Vol. 27, No. 5, 715-719, 2004.

GUIMARÃES, F. A. V.; **Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais.** 2010.

GUIMARÃES, N. C.; **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** Belo Horizonte: UFMG, 2011.

HOOG, R. Flocculation Dewatering. **International Journal of Mineral Processing**, Vol. 58, 2000. pp 223-236.

JOHNSON, S. B.; FRANKS, G. V.; SCALES, P. J.; BOGER, D. V.; HEALY, T. W.; Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensions. **International Journal of Mineral Process.** **International Journal of Mineral Process**, Vol.58, 2000. pp 267-304.

LARA, A. F. M.; **Espessamento e transporte de pasta mineral.** Belo Horizonte: UFMG, 2011.

LEMOS, A. M. de A.; **Efeito da adição de reagentes agregantes sobre características de pastas de minério de ferro.** Araxá. CEFET-MG, 2017.

LINS, F. F.; ADAMIAN, R. **Minerais coloidais, Teoria DLVO Estendida e Forças Estruturais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000.

LOPES, L. M.; **Otimização do processo de espessamento de rejeito de minério de ferro de itatiaiuçu-mg.** Araxá. CEFET-MG, 2017.

LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios.** 5°. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

LYKLEMA, J. The colloidal background of flocculation and dewatering. **Flocculation and Dewatering (Moudgil, B. & Scheiner, J., eds.)**, New York, 1989. p. 1-20.

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. **Mecanismos, técnicas e aplicações da agregação no tratamento mineral e ambiental.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011.

OLIVEIRA, M. L. M. D.; LUZ, J. A. M. D.; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e Filtragem**. Ouro Preto, 2004.

OSORIO, C. A. H.; ARAUJO, A. C. D.; VALADÃO, G. E. S. **Estudo de características de algumas pastas minerais**. 3. ed. São Paulo: [s.n.], v. 4, 2008. 50-55 p.

RICHSTFDON, P. F.; CONNELLY, L. J. Industrial Coagulants and Flocculants. In: **Reagents in Mineral Technology**. [S.l.]: [s.n.], 1988. p. p. 519-558.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.; **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

U.S GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries 2016**. USGS. 202 p. Disponível em: <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf> >Acesso em: 22 de Novembro, 2018.