



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

**ANA MARIA DE ÁVILA LEMOS**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE REAGENTES AGREGANTES SOBRE  
CARACTERÍSTICAS DE PASTAS DE MINÉRIO DE FERRO**

**ARAXÁ/ MG**

**2017**

**ANA MARIA DE ÁVILA LEMOS**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE REAGENTES AGREGANTES SOBRE  
CARACTERÍSTICAS DE PASTAS 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<sup>a</sup>. Me. Maria Auxiliadora Mendes Aguiar

**ARAXÁ/MG**

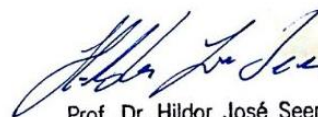
**2017**

**ANA MARIA DE ÁVILA LEMOS**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE REAGENTES AGREGANTES SOBRE  
CARACTERÍSTICAS DE PASTAS 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, 20 de junho de 2017.



Prof. Dr. Hildor José Seer  
Coordenador Engenharia de Minas  
CEFET-MG / Unidade - Araxá  
Siape - 1318615

**Presidente e Orientador:** Profa. Me. Maria Auxiliadora Mendes Aguiar  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Prof. Francisco de Castro Valente Neto  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



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

*Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais Tatiana e Clésio que sempre se esforçaram e apoiaram para que eu concluísse os meus estudos.*

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada e por não me desamparar em nenhum momento;

À minha família, que me deram todo o apoio, em especial, aos meus amados pais, Tatiana e Clésio, que são meu porto seguro, que sempre sonharam e participaram de todas as conquistas de minha vida e dedicaram a mim todo amor e carinho, pessoas a quem jamais conseguirei descrever todo o amor e gratidão que sinto.

Aos os meus amigos de faculdade, em especial, Kamylla e João Antônio por todos os momentos de risadas contínuas, pela amizade, apoio e força nas horas de felicidade e desespero ao longo dessa jornada.

Ao técnico e amigo João Victor por todo auxílio e sugestões que fizeram possível a realização deste trabalho.

À Professora Maria Auxiliadora Mendes Aguiar, por aceitar o convite de ser minha orientadora e por toda a dedicação;

Aos meus Professores, por compartilharem de seus conhecimentos comigo ao longo desta caminhada. Especialmente, à professora Michelly dos Santos Oliveira por todo o apoio durante a execução deste trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer a todos que de alguma forma me ajudaram nesta longa jornada.

*O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho.*

Abraham Lincoln

## RESUMO

O aumento da produção mineral e a diminuição dos teores das jazidas minerais acabam aumentando consideravelmente a geração de rejeito a ser depositado. Atualmente, os rejeitos de minério de ferro são dispostos na forma de polpa mineral em barragens ou bacias de rejeitos, esse tipo de disposição apresenta riscos físicos ao meio ambiente, podendo ocorrer significativas perdas econômicas e sociais em eventuais rompimentos de barragens. Uma nova alternativa é a disposição de rejeitos em forma de pasta, já implementada em outros países, apresentando como vantagens a minimização dos impactos ambientais devido à demanda de menor área para disposição do rejeito, maior recuperação de volume de água de processo e menores riscos de ruptura. Nesse contexto, os objetivos deste trabalho foram caracterizar o rejeito de minério de ferro fornecido pela empresa Minerita e verificar a influência da adição de reagente agregante sobre as características da pasta mineral, através de testes de sedimentação em proveta e testes de *slump*. Os testes de sedimentação em proveta foram executados com 20% de sólidos, sendo testadas as dosagens de 0 g/t, 20 g/t e 50g/t, visando otimizar a dosagem ótima de reagente. Posteriormente, foram realizados os testes de slump na ausência de reagente e na presença de reagente na dosagem ótima encontrada nos testes de sedimentação em proveta. O rejeito do minério de ferro apresentou uma densidade de 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Através da caracterização granulométrica observou-se que 90,10% do material apresenta granulometria abaixo de 0,075mm. Dentre as dosagens testadas no teste de sedimentação, o melhor resultado obtido foi com 20g/t do reagente Flotisor FL7130, tendo sido essa dosagem utilizada nos testes para pasta mineral. Foram avaliados os testes de *slump* na ausência e na presença do floculante a 20 g/t, com porcentagens de sólidos variando de 65% a 80%. A utilização de reagentes se mostrou eficiente para as condições com 65% e 70% de sólidos, reduzindo consideravelmente a altura de abatimento, já para polpas com maior porcentagens de sólidos a adição de floculante não apresentou mudança significativa em relação aos testes com ausência de floculantes, visto que estes apresentaram menor tendência de abatimento e espalhamento.

**Palavras-chaves:** Rejeito de minério de ferro, pasta mineral, floculantes.

## ABSTRACT

The increase of the mineral production and the decrease of the contents of the mineral deposits end up increasing considerably the generation of waste to be deposited. Currently, iron ore tailings are disposed in the form of mineral pulp in dams or tailings ponds, this type of disposal poses physical risks to the environment, and there may be significant economic and social losses in eventual dam breaks. A new alternative is the disposal of tailings in the form of pulp, already implemented in other countries, presenting as advantages the minimization of the environmental impacts due to the demand of smaller area for disposal of the tailings, greater recovery of process water volume and lower risks of break. In this context, the objectives of this work were to characterize the iron ore tailings provided by the company Minerita and to verify the influence of the addition of aggregating reagent on the characteristics of the mineral paste, through tests of sedimentation in the test tube and slump tests. The sedimentation tests in the beaker were performed with 20% solids and the dosages of 0g/t, 20g/t and 50g/t were tested in order to optimize the optimum reagent dosage. Subsequently, the slump tests were performed in the absence of reagent and in the presence of reagent at the optimum dosage found in the test sedimentation tests. The iron ore reject presented a density of  $2.7\text{g/cm}^3$ . Through the granulometric characterization, it was observed that 90,10% of the material presented granulometry below 0.075mm. Among the dosages tested in the sedimentation test, the best result was 20g/t of the Flotisor FL7130 reagent, which was used in the tests for mineral paste. The slump tests were evaluated in the absence and presence of the flocculant at 20g/t, with percentages of solids ranging from 65% to 80%. The use of reagents proved to be efficient for the 65% and 70% solids conditions, considerably reducing the abatement height, even for paste with higher solids percentages the addition of flocculant did not present a significant change in relation to the tests with no flocculants, since these presented a lower tendency of reduction and scattering.

**Keywords:** Iron ore tailings, mineral paste, flocculants.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Hematita especular.....	18
Figura 2.2 - Quartzo germinado .....	18
Figura 2.3 - Representação esquemática do teste de <i>slump</i> .....	23
Figura 2.4 - Plano inclinado e diagrama esquemático do fluido estacionário na calha.....	23
Figura 2.5 - Espessadores de pasta <i>Deep Cone</i> EIMCO. ....	24
Figura 2.6 - Detalhes do espessador de pasta <i>Deep Cone</i> . ....	25
Figura 2.7 - Empilhamento superficial em torre.....	26
Figura 2.8 - Disposição através de tubulação. ....	26
Figura 2.9 - Desenho esquemático da disposição de polpas de alta densidade e pasta. ....	27
Figura 2.10 - Distribuição dos íons na dupla camada elétrica.....	30
Figura 2.11 - Potencial zeta da hematita e quartzo em água destilada. ....	31
Figura 2.12 - Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação entre partículas.....	32
Figura 3.1 - Pilha cônica.....	36
Figura 3.2 - Pilha alongada.....	37
Figura 3.3 - Teste de picnometria.....	37
Figura 3.4 - Peneiramento a úmido. ....	38
Figura 3.5 – Provetas de 1000mL.....	39
Figura 4.1- Curva Granulométrica. ....	42
Figura 4.2- Ensaio de sedimentação sem floculante.....	43
Figura 4.3 - Curvas de sedimentação do rejeito de minério de ferro variando a dosagem.....	44
Figura 4.4 – Testes de <i>Slump</i> na ausência de floculante. (a) 65% de sólidos; (b) 70% de sólidos; (c) 75% de sólidos; (d) 80% de sólidos .....	45
Figura 4.5 – Testes de <i>Slump</i> com 20g/t de floculante. (a) 65% de sólidos; (b) 70% de sólidos; (c) 75% de sólidos; (d) 80% de sólidos. ....	46

Figura 4.6 - Gráfico % de abatimento da altura “slump” em função do adensamento de pasta.

.....47

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS**

DCE Dupla camada elétrica

DNPM Departamento Nacional de Produção Mineral

PIE Ponto isoelétrico

## LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetros
Mt	Milhões de toneladas
mm	Milímetros
$\mu\text{m}$	Micrômetro
$\rho_s$	Massa específica dos sólidos
$\rho_{s \text{ média}}$	Massa específica média dos sólidos
%	Porcentagem ou porcentagem
$\theta_R$	Ângulo de repouso
pH	Potencial hidrogeniônico
$\zeta$	Potencial zeta
°	Grau

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Minério de ferro .....</b>	<b>16</b>
2.1.1	Minerais constituintes.....	17
2.1.2	Rejeito do minério de ferro.....	19
2.1.3	Disposição de rejeito de minério de ferro.....	20
<b>2.2</b>	<b>Pasta Mineral .....</b>	<b>21</b>
2.2.1	Equipamentos formadores de pasta mineral.....	24
2.2.2	Disposição superficial.....	25
2.2.3	Vantagens .....	28
2.2.4	Desvantagens .....	28
<b>2.3</b>	<b>Fenômenos fundamentais na formação pastas.....</b>	<b>28</b>
2.3.1	Dupla Camada Elétrica.....	29
2.3.2	Teoria DLVO e X-DLVO.....	31
2.3.3	Coagulação .....	33
2.3.4	Floculação.....	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Amostra de minério .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização do sólido .....</b>	<b>37</b>
3.2.1	Massa específica.....	37
3.2.2	Granulometria.....	38
<b>3.3</b>	<b>Ensaio de sedimentação descontínua .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>Teste de abatimento (<i>Slump</i>).....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>

<b>4.1</b>	<b>Caracterização da amostra .....</b>	<b>41</b>
	A partir dos ensaios realizados foram obtidos os resultados a seguir.....	41
4.1.1	Massa específica .....	41
4.1.2	Distribuição granulométrica .....	41
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de sedimentação descontínua.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3</b>	<b>Testes de abatimento .....</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>
	<b>ANEXO A: TÉCNICA DE PICNOMETRIA .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda da produção mineral, as jazidas minerais vem apresentando a cada dia teores menores, acarretando em uma maior geração de volumes de rejeitos provenientes das diversas operações durante o beneficiamento. Em razão da maioria das operações de tratamento de minérios serem realizadas a úmido, os rejeitos apresentam-se como polpas minerais, sendo dispostos em barragens ou bacias de rejeito.

Esse tipo de disposição apresenta sérios riscos ao meio ambiente, que podem ser agravados em caso de rompimentos. O último acidente provocado pela ruptura de barragem foi registrado em Mariana, no estado de Minas Gerais e acarretou inúmeros impactos à fauna e flora, além de causar graves desequilíbrios socioeconômicos e prejuízos vultosos.

Nesse contexto, a busca por novas formas de disposição de rejeito mais seguras e menos onerosas tem aumentando significativamente. O adensamento do rejeito transformando-o em pasta mineral tem sido uma nova alternativa de disposição já implementada em outros países, apresentando como vantagens a minimização dos impactos ambientais devido à demanda de menor área para disposição do rejeito, maior recuperação de volume de água de processo e menores riscos de ruptura.

Considerando os atuais problemas enfrentados pela indústria mineral no que diz respeito à disposição final de rejeitos oriundos do beneficiamento de minério de ferro, este trabalho tem como finalidade compreender a influência da adição de reagentes agregantes na formação de pastas minerais. Tem como objetivos específicos caracterizar a amostra do rejeito de minério de ferro e verificar a influência de um reagente comercial fornecido pela Clariant para a separação sólido-líquido através da realização de testes de sedimentação em proveta e testes de *slump*.

Questões como as colocadas já justificam a importância da realização desta pesquisa. Além disso, o trabalho introduz uma nova vertente de pesquisas científicas ligadas à disposição de rejeitos em forma de pasta na instituição, através de implementação de novas unidades experimentais no laboratório de tratamento de minérios do CEFET-MG/Unidade-Araxá, contribuindo para futuros trabalhos a serem realizados.

Para o desenvolvimento deste trabalho, primeiramente foi realizada uma breve revisão bibliográfica sobre minério de ferro e disposição dos rejeitos gerados no seu beneficiamento, pasta mineral e os fenômenos envolvidos na sua formação. Em um segundo momento, serão realizados os seguintes testes laboratoriais: sedimentação em proveta e *slump*. Será analisada a

influência da dosagem de reagentes sobre a velocidade de sedimentação e abatimento. Após a execução dos ensaios, os resultados obtidos serão comparados com a bibliografia encontrada.

Os próximos capítulos desse trabalho abordam o minério de ferro, seu atual cenário econômico, a forma como o rejeito originado do tratamento do bem mineral é descartado e os riscos e/ou acidentes causados pelo método atual de disposição. Posteriormente, será exposta a nova forma de disposição na forma de pasta mineral, bem como as suas características físicas e reológicas, a forma de obtenção da pasta e as vantagens do novo método. Em seguida, serão mencionados os fenômenos participantes e influenciadores na formação das pastas. Já no capítulo seguinte é exposta a metodologia a ser utilizada na realização do trabalho. Por fim serão apresentados os resultados obtidos e as discussões acerca dos mesmos.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Minério de ferro

O ferro corresponde a um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, em virtude de suas propriedades químicas e físicas, o minério de ferro é a matéria-prima básica da siderurgia (99%). O restante é utilizado como carga na indústria de ferro-liga, cimento e eventualmente na construção de estradas (OMACHI, 2015).

As reservas mundiais de minério de ferro são da ordem de 190 bilhões de toneladas (Tabela 2.1). Neste contexto, o Brasil detém 11,9% das reservas lavráveis mundiais de minério de ferro, com um teor médio de 49,0% (DNPM, 2015).

Tabela 2.1 - Reserva e produção mundial do minério de ferro.

Países	Reservas (10 <sup>6</sup> t)		Produção (10 <sup>3</sup> t)		
	2014	%	2013	2014	%
Brasil	22.565	11,88	386.270	411.783	12,79
China	23.000	12,11	1.450.000	1.500.000	46,58
Austrália	53.000	27,89	609.000	660.000	20,50
Índia	8.100	4,26	150.000	150.000	4,66
Rússia	25.000	13,16	105.000	105.000	3,26
Ucrânia	6.500	3,42	82.000	82.000	2,55
Outros países	51.835	27,28	327.730	311.217	9,67
<b>Total</b>	<b>190.000</b>	<b>100</b>	<b>3.110.000</b>	<b>3.220.000</b>	<b>100</b>

Fonte: Adaptado DNPM/DIPLAM; USGS - Mineral Commodity Summaries – 2015.

Em termos de metal contido nas reservas, o Brasil ocupa um lugar de destaque no cenário mundial, devido aos altos teores de ferro em seus minérios. Os principais estados brasileiros detentores de reservas de minério de ferro são: Minas Gerais (72,5%), Mato Grosso do Sul (13,1%) e Pará (10,7%). Dentre as principais empresas produtoras estão: Vale S.A.

(73,77%), Companhia Siderúrgica Nacional (4,49%), Samarco Mineração S.A. MG (3,98%) e Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A (2,97%) (DNPM, 2016).

Em 2014, a produção brasileira de minério de ferro alcançou 411,8Mt (milhões de toneladas), obtendo um teor médio de 63,5% de ferro, ocorrendo um aumento de 6,4% em relação ao ano anterior. Entretanto, o valor de produção diminuiu 13,5% em comparação a 2013, devido à queda dos preços de minério de ferro no mercado internacional.

No Brasil, as principais regiões produtoras de minério de ferro são o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais (68,4%), a Província Mineral de Carajás no Pará (29,2%) e a região de Corumbá em Mato Grosso do Sul (1,2%) (DNPM, 2015).

A produção de minério de ferro representa uma importante atividade mineral no Brasil, principalmente pelos recursos financeiros envolvidos, desde a prospecção mineral até a comercialização de seus produtos ferro-gusa e pelotas. Em 2014, o consumo na indústria siderúrgica somado ao consumo nas usinas de pelotização aumentou 9,3% em relação ao ano anterior, resultando em 112,3Mt. (DNPM, 2015). Logo, nota-se que apesar da desaceleração econômica a demanda por minério de ferro deverá continuar aquecida nos próximos anos, consequentemente, aumentando a quantidade de rejeitos gerados e tamanho das estruturas de contenção.

### 2.1.1 Minerais constituintes

O Minério de Ferro é composto basicamente por duas partes distintas, sendo uma delas o mineral de óxido de ferro, podendo ser hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ou magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), e a outra parte formada basicamente pelo mineral de óxido de silício, ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Há também a presença de outros minerais e/ ou elementos em menores porcentagens na composição do minério de ferro, entre eles estão o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o óxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ ) e o elemento fósforo (CARVALHO, 2003).

A hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) é o principal mineral-minério de ferro (Figura 2.1), sendo um óxido de ferro com 70% de Fe e 30 % de O na sua composição básica. Tem como principais características: dureza variando de 5,5 a 6,5 na escala de Mohs, massa específica de  $5,26 \text{ g/cm}^3$ ; cor entre castanho avermelhada a preta; traço vermelho acastanhado e brilho metálico azul (DANA, 1981). Na natureza é encontrada isolada ou em agregados com partículas distintas,

sendo o caso mais clássico com partículas de quartzo, ou em associação com a goethita e também com limonitas. Segundo Cornejo e Bartorelli (2014) a denominação hematita deriva do grego e significa “pedra de sangue”, em alusão à coloração vermelha do pó desse mineral.

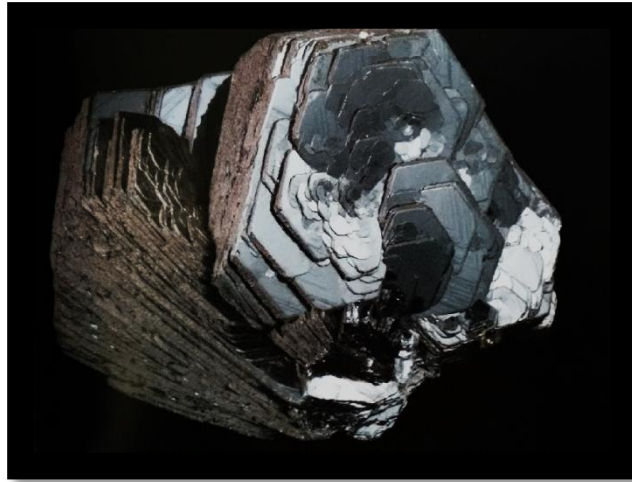


Figura 2.1 - Hematita especular  
Fonte: Cornejo e Bartorelli (2014 p. 263).

O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) é um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre, devido à alta resistência ao intemperismo e erosão (Figura 2.2). Dentre suas principais características, estão: dureza 7,0 na escala de Mohs, massa específica de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , brilho vítreo, traço branco, fratura conchoidal (DANA, 1981). Na maioria dos processamentos minerais o quartzo é o principal constituinte da ganga.



Figura 2.2 - Quartzo germinado  
Fonte: Cornejo e Bartorelli (2014, p. 628).

### 2.1.2 Rejeito do minério de ferro

O minério extraído durante as operações de lavra são compostos por minerais úteis, que contém o ferro concentrado, e minerais de ganga, que correspondem à porção mineral de baixo ou nenhum valor econômico que ocorrem agregados ao mineral-minério (MILONAS, 2006). Desse modo, são necessárias etapas de beneficiamento mineral para adequação da concentração do mineral visando sua comercialização.

O beneficiamento consiste basicamente nas etapas de britagem, moagem, peneiramento, classificação, concentração, espessamento e filtragem, sendo responsável pela redução e regularização da granulometria, remoção dos minerais sem valor econômico, aumento da concentração de mineral útil no produto final e separação do sólido suspenso do meio líquido.

Durante as etapas do beneficiamento geralmente são utilizados grandes volumes de água com diversas finalidades como: reduzir o calor gerado nas etapas de fragmentação, facilitar o transporte e viabilizar processos de separação, gerando um produto em forma de polpa. Subsequentemente, a polpa produzida é submetida a diversos processos físico-químicos, separando-se o produto final que atenda às especificações do mercado, dos materiais economicamente pobres (MILONAS, 2006). Os materiais de baixo valor econômico descartados ao final de cada um dos diversos processos do tratamento de minérios são agrupados e denominados de rejeito.

Os rejeitos podem exibir características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis em função do tipo de minério processado e do método de beneficiamento adotado. Segundo Pereira (2005), podem ser classificados sob o aspecto granulométrico como grossos ou finos. Os rejeitos grossos, também denominados de granulares, são compostos predominantemente por partículas nas frações areia fina a média (acima de 0,074 mm) e, em alguns casos, siltosas, sem características de plasticidade. Os rejeitos finos ou 'lamas' são geralmente originados da deslamagem e do processo de beneficiamento que envolvem a flotação do minério de ferro. Em geral, contem basicamente frações abaixo de 0,074 mm de diâmetro, apresentando características de plasticidade e elevada compressibilidade no processo de adensamento.

Nos rejeitos há diferentes partículas minerais em suspensão e/ou íons dissolvidos, algumas apresentam um determinado percentual de minério útil, pois nenhum processo de

concentração possui recuperação de 100 % (SÁNCHEZ, 1995). De acordo com Espósito (2000), os rejeitos de minério de ferro são principalmente constituídos por hematita (de 10 a 50% do teor dos sólidos), cuja massa específica dos grãos ( $\rho_s$ ) é em torno de 5,25 g/cm<sup>3</sup>, sendo o restante do material formado por quartzo ( $\rho_s$  entre 2,65 a 2,70 g/cm<sup>3</sup>).

### 2.1.3 Disposição de rejeito de minério de ferro

Os rejeitos do beneficiamento mineral vem sendo colocados, em sua maioria, em depósitos conhecidos como barragens de rejeitos. Essa é a técnica mais utilizada para a disposição de rejeitos de minério de ferro no Brasil, onde são construídas enormes estruturas de terra para contenção dos sedimentos juntamente com o grande volume de água não reaproveitado gerado durante o processo de beneficiamento do minério.

O crescimento da atual produção mineral acarreta no aumento da geração de rejeitos, e consequentemente, na necessidade de maiores áreas para a disposição. Entretanto, esse cenário confronta-se com a preocupação dos órgãos ambientais e da sociedade, diante da atividade minerária, no que diz respeito aos possíveis danos associados às barragens que compõem o reservatório para a disposição (PORTES, 2013).

Segundo Barreda (2012), as barragens possuem consideráveis impactos negativos, visto que, depois da disposição, os rejeitos podem causar efeitos ambientalmente adversos. As barragens apresentam grandes riscos físicos e químicos como rompimentos, geração de drenagem ácida, contaminação de lençóis freáticos com reagentes, além de acarretarem impactos ao meio ambiente, dificultando a recuperação do solo e da vegetação original (SOFRÁ & BOGER, 2002).

Ávila (2016) apresentou algumas das catástrofes ambientais envolvendo barragens no Brasil (Tabela 2.2), além dos danos causados pelo rompimento das mesmas. Nota-se que a maioria deles envolvem a deposição de rejeito de minério de ferro, entre eles está maior o acidente ocorrido recentemente, em Mariana, onde milhões de toneladas de rejeito foram derramados causando danos irreparáveis a cidade de Bento Rodrigues e nas diversas cidades abastecidas pelo Rio Doce.

Quadro 2.1 - Rompimentos de barragens no Brasil.

<b>Acidentes no Brasil</b>			
<b>Ano</b>	<b>Barragem</b>	<b>Material</b>	<b>Principais danos</b>
<b>1986</b>	Fernandinho, Rio Acima	Rejeito de minério de ferro	7 mortes
<b>2001</b>	Rio Verde	Rejeito de minério de ferro	5 mortes
<b>2003</b>	Industria do Papel, Cataguases	Resíduo da produção de celulose	Contaminação e interrupção de fornecimento de água.
<b>2006</b>	Mineração Rio Pomba, Mirai	Rejeito de bauxita	Vazamento de rejeitos de bauxita e interrupção do fornecimento de água.
<b>2007</b>	Mineração Rio Pomba, Mirai	Rejeito de bauxita	Vazamento de rejeitos de bauxita e interrupção do fornecimento de água.
<b>2014</b>	Herculano, Itabirito	Rejeito de minério de ferro	3 Mortes
<b>2015</b>	Fundão, Mariana	Rejeito de minério de ferro	18 a 22 Mortes

Fonte: Adaptado Ávila (2016).

Os danos causados pelas rupturas das barragens também afetam significativamente as empresas mineradoras, visto que os custos de recuperação são muito onerosos e são muitas as exigências dos órgãos fiscalizadores (FALCUCCI,---). Neste contexto, as empresas estão buscando a minimização dos impactos ambientais e a redução dos custos associados aos processos de contenção dos rejeitos através do desenvolvimento de novas abordagens de caracterização tecnológica e de disposição de rejeitos, como por exemplo a disposição sob forma de pasta mineral.

## **2.2 Pasta Mineral**

Araújo et. al (2005) define pastas minerais como um material adensado e homogêneo, no qual não ocorre segregação granulométrica de partículas quando dispostos de forma suave sobre superfícies estáveis, com distribuição de tamanhos e mineralogia característicos, baixo nível de água e baixa velocidade de sedimentação dos sólidos.

Segundo Brackebusch (1993) pasta é uma mistura de alta densidade formada de água com sólidos, que contém uma proporção significativa de partículas finas. A baixa proporção de

água no sistema (10 a 25% em massa) faz com que a consistência da pasta seja espessa. As partículas finas que compõem a pasta podem ser advindas de rejeitos de minas ou de argilas naturais, limos e areias finas. A mineralogia das partículas pode assim ter uma grande variedade de quartzo e feldspato a argilas, micas e mesmo sais.

As características físicas e químicas do componente sólido, tais como a densidade, a distribuição granulométrica, a área superficial específica, as composições química e mineralógica e a porcentagem dos sólidos são responsáveis pelo comportamento da pasta.

Na formação de uma pasta mineral, a porcentagem de sólidos necessária é uma característica intrínseca do material e não pode ser definida por um valor fixo. A quantidade de partículas finas na pasta mineral deve ser suficiente apenas para a retenção de água quando submetida a diferença de pressão, como nas operações de bombeamento (FALCUCCI, 2007).

Johnson et al. (2000) consideram que as pastas podem ser produzidas com uma ampla faixa de tamanho de partículas, mas o excesso da quantidade de partículas finas pode produzir uma redução da resistência da pasta, sendo geralmente necessário apenas 15% em massa de material de tamanho inferior a 20  $\mu\text{m}$  por questões de bombear a pasta através do tubo sem perdas da resistência requerida para preenchimento.

De acordo com Falcucci (2007) outro parâmetro importante é a área superficial específica, pois afeta as propriedades da pasta mineral, assim como a proporção necessária de partículas finas. Quando esta proporção cresce, a necessidade de água também aumenta para que ocorra a cobertura da área superficial disponível.

Além das características físicas e químicas dos sólidos presentes no sistema, as características reológicas como a conformação e consistência da pasta mineral são importantes para a análise do sistema ao ser disposto sobre uma superfície.

A consistência da pasta mineral é possível de ser determinada através do teste de abatimento. O método consiste em preencher um cone de PVC com o material a ser analisado até completar todo seu volume, quando o cone é retirado verticalmente, verifica-se a diferença entre a altura original e a final, a que é chamada de altura de abatimento ou *slump* (Figura 2.4).

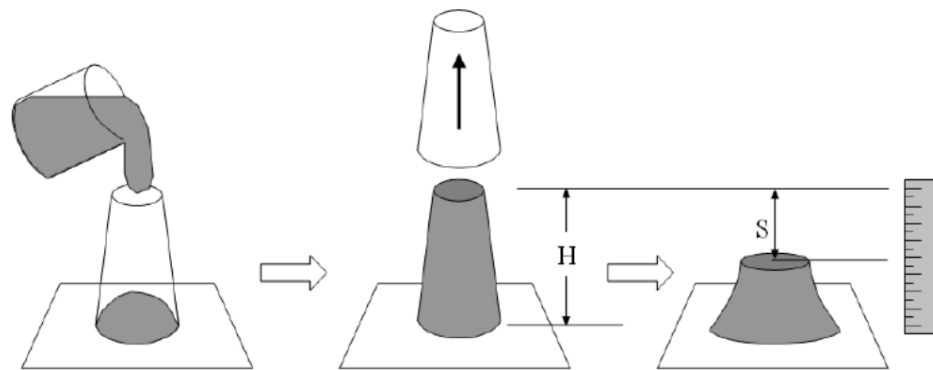


Figura 2.3 - Representação esquemática do teste de *slump*.  
Fonte: Clayton et al. (2003, p.4).

Outra propriedade do sistema de pastas é a fluidez, determinada através do ângulo de repouso encontrado através do teste de calha ou *flume*. Esse teste consiste em determinar o ângulo máximo possível no qual a pasta ainda mantém-se no repouso. O plano inclinado utilizado para realizar o teste de *flume* apresentado por Sofrá et al. (2002) bem como um diagrama esquemático do fluido estacionário no plano (Figura 2.5).

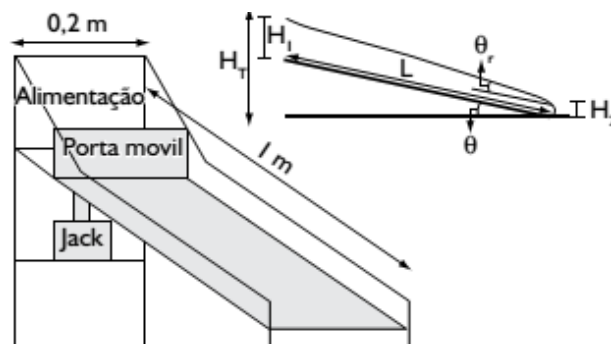


Figura 2.4 - Plano inclinado e diagrama esquemático do fluido estacionário na calha.  
Fonte: Sofrá et al. (2002, p. 326).

De acordo com a Figura 2.5, o ângulo de repouso,  $\theta_R$ , fica definido pela equação [1]:

$$\theta_R = \arctan \left\{ (H_1 - H_2) / L \right\} \quad \text{Equação [1]}$$

Segundo Osório (2005) quanto mais adensada é a polpa ou pasta, maiores ângulos de repouso são possíveis de se obter, atingindo-se, também, maiores volumes de material disposto por unidade de área superficial.



Essas propriedades dos sistemas de pasta, juntamente com a viscosidade e a tensão de escoamento, tornam possível estabelecer a faixa de transição entre polpas e pastas minerais e caracterizar seu comportamento reológico.

### 2.2.1 Equipamentos formadores de pasta mineral

A preparação de pastas minerais consiste basicamente na eliminação da água presente no material através do desaguamento, até atingir a consistência desejada. Uma das formas mais comuns de separação sólido-líquido é o espessamento, tendo como princípio básico a velocidade de sedimentação das partículas em suspensão. A utilização de flocculantes e coagulantes nessas operações aumentam a eficiência da operação, visto que a agregação das partículas sólidas formam agregados maiores e conseqüentemente aumentam a velocidade de sedimentação, podendo obter massas com altas concentrações de sólidos (PORTES, 2013).

Na produção da pasta, a primeira etapa é realizada por espessadores. Desse modo, sua descarga é ainda uma polpa, que pode ser bombeada facilmente (OSORIO, 2005). Na etapa posterior, o *underflow* do espessador passa por filtros a vácuo ou por espessadores de alta densidade de cone profundo (*deep cone*), para formar a pasta. A Figura 2.6 apresenta diferentes espessadores industriais de alta densidade de cone profundo.



Figura 2.5 - Espessadores de pasta *Deep Cone* EIMCO.  
Fonte: EIMCO (2010, p. 1)

Nesse espessador a altura do tanque é nitidamente maior que seu diâmetro (Figura 2.7), apresentando uma geometria cilíndrica na parte superior e uma geometria cônica na parte inferior, além de coluna central para recirculação de água e canaletas laterais para coleta de *underflow* por transbordo (REZENDE, 2016).

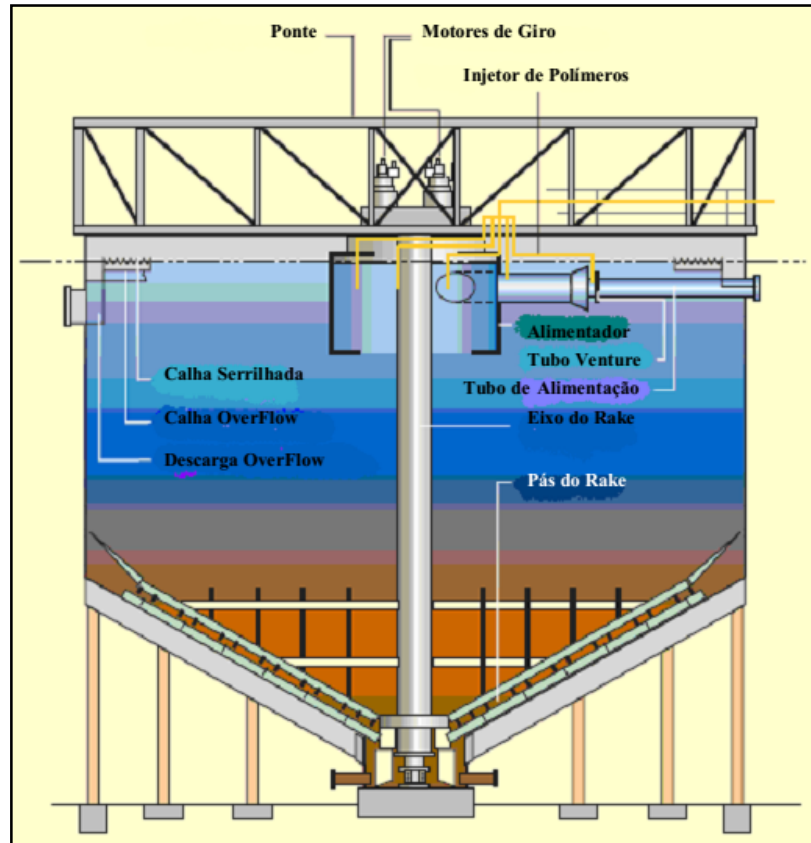


Figura 2.6 - Detalhes do espessador de pasta *Deep Cone*.  
 Fonte: adaptado de EIMCO (2010, p. 3)

O ângulo de inclinação na sessão cônica geralmente varia entre 10 a 60°, dependendo da concentração de sólidos desejada na descarga do *underflow*, do desempenho esperado e do projeto dos *rakes*. Desse modo, o ângulo de inclinação na porção inferior deve proporcionar o deslocamento da pasta até a descarga do *underflow*, onde a pasta passa a ser bombeada para o local de deposição.

Segundo Barreda (2012) a porcentagem de sólidos do *underflow* deve estar de acordo com os requerimentos do local de disposição, além de permitir que a pasta possa ser bombeada a partir de sua obtenção no espessador.

### 2.2.2 Disposição superficial

Existem muitos métodos para realizar a disposição superficial de rejeitos na forma de pastas minerais na superfície do terreno. A escolha do melhor método depende principalmente

da topografia do lugar da disposição e da reologia da pasta (BARREDA, 2012). As Figuras 2.8 e 2.9 mostram formas de disposição utilizando o método de utilização de uma torre central conectado com o equipamento *deep cone* e o uso de tubulações para a disposição do material.

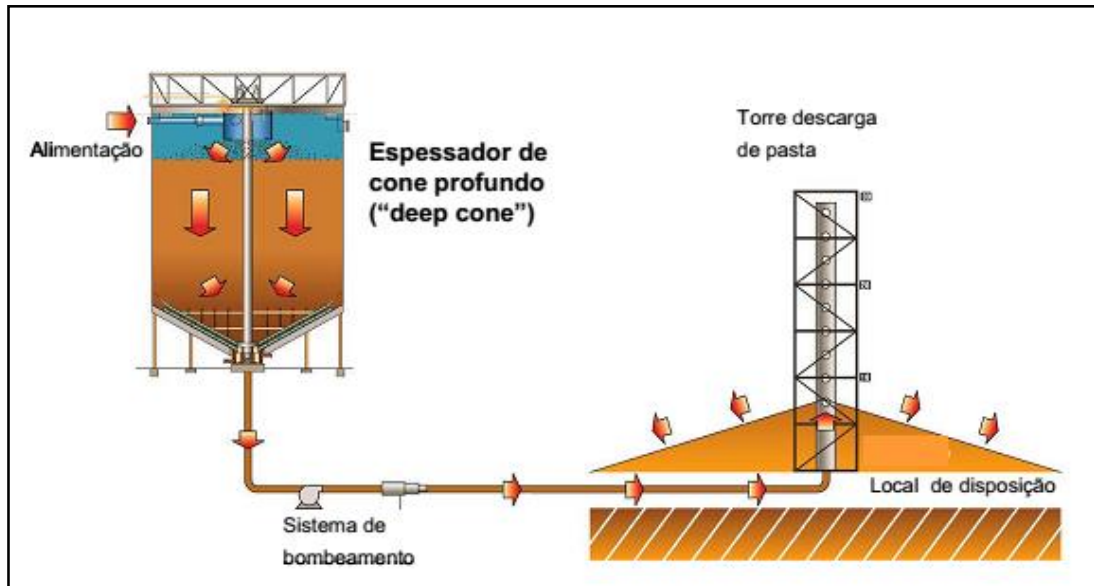


Figura 2.7 - Empilhamento superficial em torre.

Fonte: adaptado de EIMCO (2010, p. 3).



Figura 2.8 - Disposição através de tubulação.

Fonte: Vietti e Dunn, 2002 apud Osorio (2007, p. 23).

De acordo com Fiúza (2009) citado por Nunes (2015) a deposição superficial da pasta é realizada em camadas. Cada camada é lançada até atingir determinada altura pré-estabelecida,

onde permanecem por algum tempo sofrendo desidratação e fraturação, devido à evaporação. Após esse período, ocorre uma nova deposição, preenchendo as falhas da primeira deposição de pasta.

Osorio (2005) afirma que a vantagem dessa tecnologia de disposição de rejeitos é a utilização de menores áreas e estruturas mais simples para a retenção da pasta. De acordo com Barreda (2012), pastas com fluxos de inclinação de 3 a 10° garantem uma boa estabilização do rejeito durante a disposição superficial.

Os aspectos geotécnicos da área escolhida para disposição são outro fator de extrema importância e não devem ser negligenciados na escolha do método. Landriault (2002) citado por Osorio (2005) faz uma comparação entre a polpa de alta densidade e a pasta mineral na Figura 2.10, mostrando os possíveis ângulos de repouso e estruturas de contenção necessários para diferentes tipos de solos.

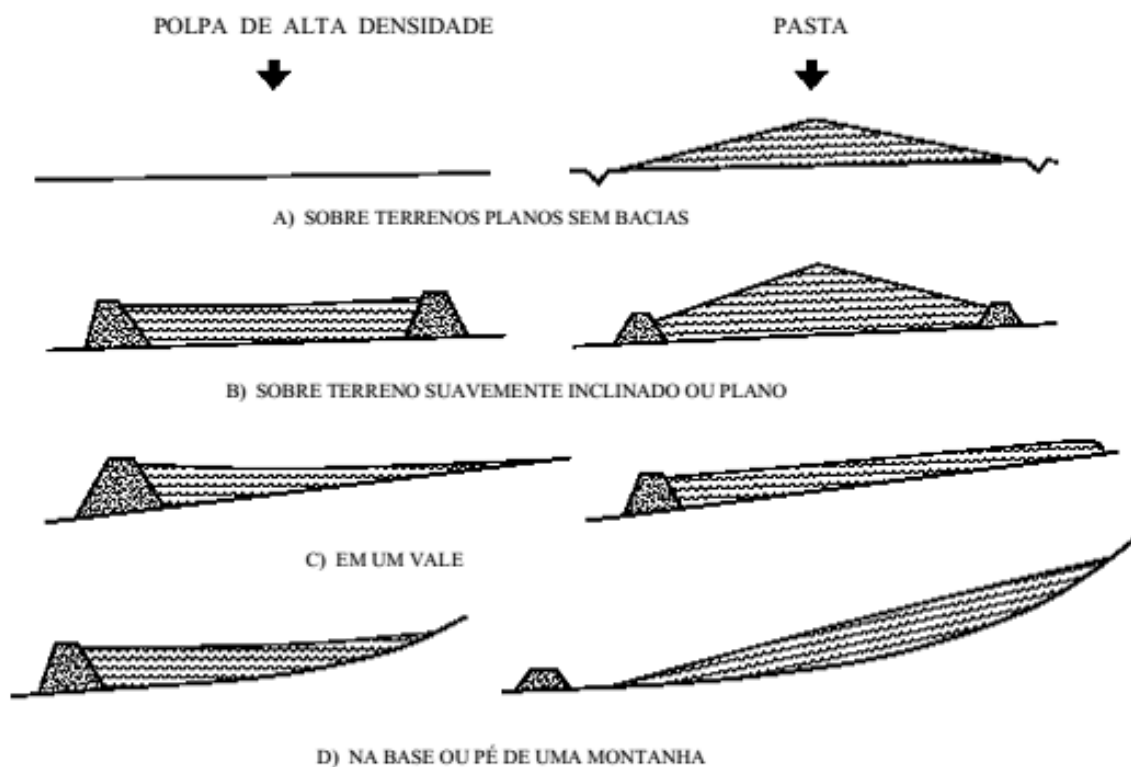


Figura 2.9 - Desenho esquemático da disposição de polpas de alta densidade e pasta.  
Fonte: Laudriault, 2002 apud Osorio (2007, p. 19).

### 2.2.3 Vantagens

Portes (2013) afirma que a disposição de rejeitos espessados apresentam vantagens quando comparados com a técnica convencional (polpa). Entre elas estão: a redução da água gerando a redução de custos no sistema de disposição, causando menor impacto ambiental, além de uma maior recuperação de água para recirculação; a diminuição da área em planta necessária para a disposição de rejeitos, reduzindo do tempo e do custo de recuperação das áreas propiciando o crescimento de vegetação na região devido ao rápido escoamento e secagem.

Além dessas as melhores características de permeabilidade e estabilidade, ocasionam menores riscos de ruptura, dessas estruturas. De acordo com Portes (2013, p. 33):

Mesmo em caso de ruptura, o fluxo seria menor e mais facilmente controlado, tornando-se um problema local. Em contrapartida, se ocorre ruptura da barragem de contenção no caso da disposição na forma convencional, toda a polpa presente no reservatório se liquefaz e, neste estado, é capaz de fluir por quilômetros de distância à jusante. Adicionalmente, salienta-se que o rejeito espessado também pode sofrer liquefação, dependendo de suas características e do tipo de carregamento.

Devido a esse contexto, a disposição de rejeitos na forma de polpas de alta densidade e pastas minerais vem ganhando importância nas pesquisas minerais, visto que a disposição os sedimentos se consolidam mais rapidamente, levando a um melhor aproveitamento do solo e, em longo prazo, uma redução dos custos.

### 2.2.4 Desvantagens

Entretanto, é necessário considerar a existência de aspectos limitadores e as desvantagens da aplicação do adensamento dos rejeitos. Dentre eles estão: a necessidade de mão de obra especializada; a reologia da pasta produzida deve permitir o transporte para a zona de disposição do material; os custos associados à infraestrutura, transporte e consumo de energia do material são mais elevados. Além disso, se faz necessário a análise da pluviometria da região, visto que, o acúmulo de água interfere diretamente nas características da pasta.

## 2.3 Fenômenos fundamentais na formação pastas

A otimização das operações de separação sólido-líquido no tratamento de minérios é realizada normalmente pelo processo de agregação em razão de que certas suspensões são muito

diluídas e as partículas apresentam dispersas no meio, levando muito tempo para se sedimentarem, sendo necessário a utilização de agentes coagulantes e floculantes responsáveis por unir as partículas, aumentando a velocidade de sedimentação.

Outro fator redutor da eficiência da sedimentação é a presença partículas menores do que 10  $\mu\text{m}$  no processo devido ao efeito de dispersão das partículas (VAZ et al., 2014). Portanto, deve-se avaliar a necessidade de aglomeração prévia das partículas antes de submetê-las à operação de separação propriamente dita. Os floculantes e coagulantes atuam em nível molecular nas superfícies das partículas para reduzir as forças repulsivas e incrementar as forças atrativas.

De acordo com Rezende (2016, p. 8) “o estado de agregação é aquele em que partículas sólidas presentes na suspensão tendem a se segregar no meio.” A ocorrência desse estado pode ser entendida pelos fenômenos de superfície e pelas teorias DLVO e X-DLVO, sendo estimada através de índices de turbidez (NTU) e velocidade de sedimentação.

### 2.3.1 Dupla Camada Elétrica

As partículas minerais presentes em meio aquoso adquirem cargas elétricas superficiais devido à interação das espécies iônicas da superfície com as moléculas de água. Conseqüentemente, os íons de cargas opostas são atraídos para essas superfícies, estabelecendo a Dupla Camada Elétrica (Figura 2.11), constituída de uma superfície carregada e um meio polar onde se distribuem os contra íons (BALTAR, 2010).

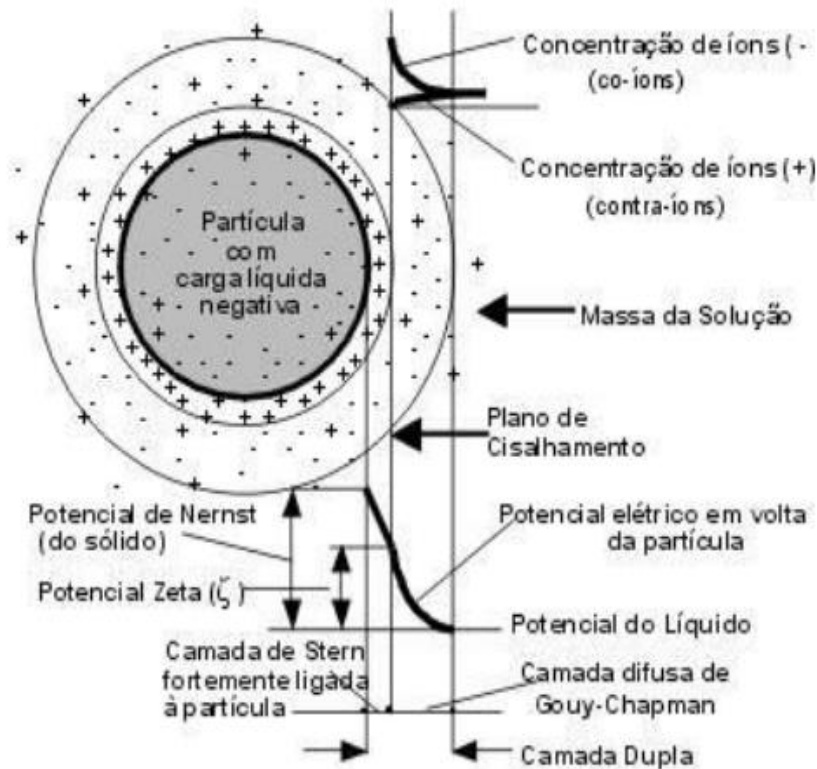


Figura 2.10 - Distribuição dos íons na dupla camada elétrica.  
Fonte: Karla (2009, p. 18).

A DCE é eletricamente neutra e tem sua existência condicionada a algum excesso de carga na superfície mineral. Pode ser dividida em duas partes principais; uma região interna, a camada de Stern, onde os íons estão fortemente ligados ocupando posições rígidas em relação à superfície e outra, uma região externa, difusa; Gouy-Chapman, onde os íons estão menos fortemente ligados.

Durante a movimentação das partículas na suspensão há um cisalhamento entre a camada de íons próximos à superfície, que se move com a solução, e a camada difusa. Esse limite é plano de deslizamento ou plano de Stern. O potencial no plano de cisalhamento é denominado potencial zeta ( $\zeta$ ), a magnitude desse depende do potencial da superfície e da concentração e carga dos íons contrários (OLIVEIRA et al., 2004).

Se a magnitude do potencial zeta, positiva ou negativa, das partículas em suspensão é alta, estas vão ter a tendência de repelirem umas às outras. Mas, se as partículas possuem valores de um potencial zeta baixos, não existe nenhuma força impedindo as partículas de se aglomerarem e flocularem. O ponto onde o potencial zeta é nulo ( $\zeta = 0$ ) é conhecido como ponto isoeletrico (PIE),

isto significa que há ausência de atmosfera eletrônica formada pelos contra íons da camada difusa, logo não há repulsão eletrostática, possibilitando a agregação das partículas.

Lopes e Lima (2009) caracterizaram as propriedades superficiais de amostras minerais de hematita e quartzo a partir da determinação do potencial zeta, tendo sido obtidos valores de PIE em pH 7,5 e 1,8, respectivamente (Figura 2.3).

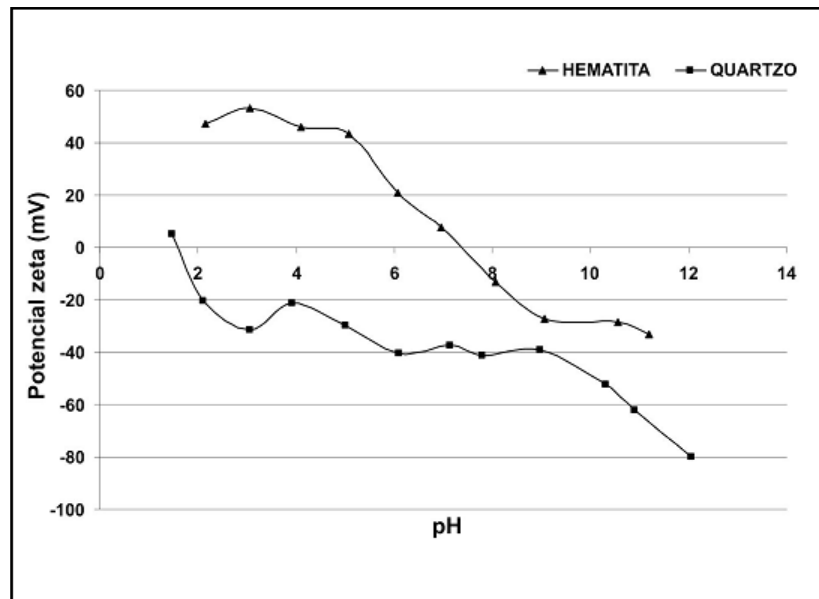


Figura 2.11 - Potencial zeta da hematita e quartzo em água destilada.  
Fonte: Lopes e Lima (2009, p. 326).

### 2.3.2 Teoria DLVO e X-DLVO

A teoria DLVO desenvolveu-se nos anos 40 pela dupla de cientistas Derjaguin-Landau e Verwey-Overbeek, considerando que as forças de van der Waals e as forças entre as duplas camadas elétricas das partículas são as únicas influenciadoras no grau de estabilização do sistema, sendo responsáveis na agregação e dispersão das partículas.

As forças de van der Waals são dependentes das características das partículas e solvente, além da distância entre elas. Em duas partículas de mesma natureza, em meio aquoso, as forças de van der Waals são sempre atrativas. Já as forças entre a interação das duplas camadas elétricas de partículas idênticas é repulsiva, com intensidade dependente da distância entre as partículas e da magnitude da carga ou potencial de superfície e, em muitos casos, do valor do pH do solvente (LINS & ADAMIAN, 2000).



Assim, a energia potencial total de interação ( $V_I$ ) pode ser determinada pela somatória da energia potencial de atração entre as partículas  $V_A$  e a energia potencial de repulsão entre as duplas camadas elétricas  $V_R$  (Equação [2]). Convencionalmente, atração é considerada negativa e a repulsão positiva.

$$V_I = V_A + V_R \quad \text{Equação [2]}$$

O comportamento das partículas irá, portanto, depender do balanço entre as forças de atração e de repulsão eletrostáticas. Na Figura 2.12 tem-se a representação esquemática das curvas de energia de interação em função da distância de aproximação entre partículas. O ponto de mínimo primário ocorre a uma distância muito pequena entre as partículas, a essa distância a agregação é irreversível. Há também o ponto de mínimo secundário, onde há uma agregação (atração) mais fraca, facilmente desfeita por uma agitação moderada, causando a redispersão do sistema.

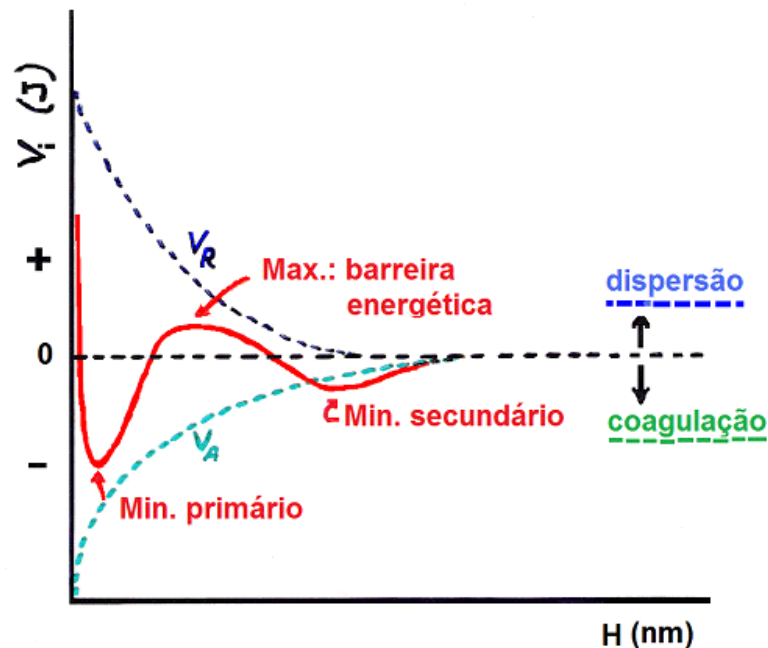


Figura 2.12 - Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação entre partículas.

Fonte: Brandão (---, p. 23)

Depois de algum tempo, os experimentos para a determinação das forças superficiais evidenciaram a possibilidade de existência de forças adicionais, além das forças de van der Waals e forças eletrostáticas, tais como forças de hidratação (repulsiva) e forças hidrofóbica (atrativa), não previstas pela teoria clássica (LINS & ADAMIAN, 2000). A inclusão da energia

devida a essas forças estruturais resultou na teoria DLVO estendida ou X-DLVO, representada pela Equação [3].

$$V_I = V_A + V_R + V_S + V_{AS} + V_{EST} + V_M + \dots \quad \text{Equação [3]}$$

Onde:

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

$V_{AS}$  = 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;

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

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

A partir de cada componente da Equação [3] é possível analisar e prever a maior tendência do comportamento das partículas minerais em agregar umas às outras ou se dispersarem no meio aquoso.

### 2.3.3 Coagulação

A coagulação ocorre quando partículas extremamente finas, coloidais, se aderem diretamente umas às outras através de forças de atração mútuas denominadas London-van der Waals, que são efetivas. Este processo de agregação ocorre devido à desestabilização por adição de produtos químicos, que neutralizam as forças elétricas repulsivas presentes nas superfícies das partículas, ocorrendo a formação agregados (coágulos) que sedimentam a uma velocidade maior (BARREDA, 2012).

Os coagulantes são eletrólitos que apresentam carga oposta às das superfícies das partículas que ao serem adicionados na solução aquosa, acarretam a neutralização da carga levando as partículas ao contato umas com as outras e a sua adesão como resultado das forças de atração moleculares (OLIVEIRA et al., 2004).

De acordo com Barreda (2012) os reagentes utilizados no processo de coagulação são agrupados em coagulantes, alcalinizantes e coadjuvantes. Os reagentes coagulantes geralmente são compostos de ferro ou alumínio e apresentam baixos pesos moleculares, sendo capazes de produzir hidróxidos gelatinosos insolúveis englobando as partículas e reduzindo a turbidez da fase aquosa. Os alcalinizantes são capazes de conferir a alcalinidade necessária à coagulação, enquanto que os coadjuvantes aumentam a densidade das partículas, tornando os agregados mais pesados.

#### 2.3.4 Floculação

A floculação é um processo de agregação de partículas finas dispersas em flocos. De acordo com Hogg (apud VAZ et al., 2014, p. 173) o mecanismo envolve três etapas principais: a eliminação da repulsão entre partículas devida as cargas elétricas, a formação e crescimento do floco, isto é, o desenvolvimento de agregados por colisão e adesão e a quebra do floco devido ao cisalhamento.

Para Oliveira et al. (2004, p. 19) “a floculação consiste na formação de aglomerados muito mais abertos que os obtidos a partir da coagulação e depende da utilização de moléculas de reagentes que agem como pontes entre partículas separadas na suspensão”.

A formação dos flocos se dá através de dois principais mecanismos: a floculação por pontes e a floculação por reversão localizada de carga. Quando são utilizados polímeros não iônicos, de elevado peso molecular a floculação ocorre por pontes. Já a floculação por reversão localizada de carga ocorre quando utiliza-se um polímero com peso molecular médio ou baixo, de carga elétrica oposta à da superfície da partícula.

Cada tipo de floculação dá uma característica diferente ao floco originado. Na floculação por pontes, os flocos apresentam estrutura aberta, onde as partículas não se tocam e as ligações entre partículas ocorrem por meio da macromolécula do flocculante, logo, o crescimento dos flocos é um processo rápido. Já flocos formados por reversão localizada de carga têm crescimento, são pequenos, compactos, rígidos, densos e permeáveis (OLIVEIRA et al., 2004).

Portanto o tipo de floco desejado apresenta um papel fundamental na escolha do reagente mais adequado. Logo, a escolha do reagente deve considerar o tamanho da cadeia

molecular, a natureza iônica do polímero, a densidade iônica e as características químicas dos grupos ativos da molécula. Desse modo, Oliveira et al. (2004, p. 18) cita os agentes mais comuns na floculação:

Os reagentes utilizados para formar essas pontes são polímeros orgânicos de cadeia longa que podem ser naturais, tais como, amido, goma e gelatina, ou sintéticos, denominados polieletrólitos. A maioria dos polieletrólitos apresenta caráter aniônico, mas são também produzidos os não iônicos e catiônicos. Os sais inorgânicos não são capazes de exercer a função de formar pontes, mas algumas vezes são utilizados em conjunto com os polieletrólitos com o objetivo de reduzir os custos de neutralização das cargas.

De acordo com Rezende (2016) algumas variáveis operacionais influenciam no desempenho dos floculantes durante o processo, entre elas estão a sua própria dosagem, o peso molecular, a agitação, a porcentagem de sólidos e o pH do meio.

O floculante deve ser utilizado na sua dosagem ótima, pois a superdosagem do floculante conduz a situação de saturação superficial, ocorrendo a repulsão entre as cadeias poliméricas e resultando na dispersão das partículas. O peso molecular do floculante também deve ser adequado de acordo com a finalidade desejada, pois interfere diretamente na capacidade de formação de pontes entre as partículas minerais. Pesos moleculares muito baixos resultam em uma floculação ineficiente, ao contrário, elevados pesos moleculares podem reestabilizar o sistema, causando problemas de solubilidade e alto custo operacional (REZENDE, 2016).

A porcentagem de sólidos na suspensão mineral influencia na formação das pontes, sendo facilitada em maiores concentrações devido a maiores probabilidades de colisão. A colisão e a distribuição uniforme do floculante são fatores controlados pela agitação do sistema interferindo na quantidade e qualidade dos flocos formados.

Outra variável importante no fenômeno de agregação ou dispersão é o pH, pois interfere no potencial zeta das partículas e do próprio floculante. Dessa forma, quando as partículas e o floculante apresentarem potenciais elétricos contrários, a floculação é facilitada, e caso apresentarem potenciais elétricos iguais, a floculação é dificultada.

### 3 METODOLOGIA

Este tópico aborda a metodologia utilizada nos estudos caracterização da amostra, nos ensaios de sedimentação em proveta e nos testes de abatimento.

#### 3.1 Amostra de minério

Para realização dos testes foram utilizadas amostras de rejeito de minério de ferro proveniente da empresa Minerita, localizada no município de Itaúna/MG. Estas foram enviadas ao CEFET/MG na forma de polpa com aproximadamente 25% de sólidos. Após a operação de secagem foram preparadas as amostras representativas de sólido cuja massa total aproximada foi de 50kg.

Inicialmente, as amostras foram homogeneizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Unidade Araxá através de pilha cônica (Figura 3.1). Em seguida, o material foi quarteado através da formação de uma pilha alongada (Figura 3.2) onde foram obtidas alíquotas representativas de 1,5kg para os ensaios de caracterização do sólido, bem como para ensaios de sedimentação e ensaios de abatimento.



Figura 3.1 - Pilha cônica.



Figura 3.2 - Pilha alongada.

## 3.2 Caracterização do sólido

### 3.2.1 Massa específica

A massa específica da amostra foi determinada através da técnica de picnometria, utilizando-se uma balança semi-analítica da marca Gehaka, modelo BG 2000 (0,01 g) e balões volumétricos de fundo chato de 50 mL (Figura 3.3). Antes da realização do ensaio, três alíquotas da amostra foram armazenadas em estufa por 30 minutos, a 100°C. A metodologia dos testes de picnometria se encontra descrita no Anexo A.



Figura 3.3 - Teste de picnometria. a) picnômetro vazio; b) picnômetro + minério; c) picnômetro + minério + água; d) picnômetro + água.

### 3.2.2 Granulometria

Para a determinação da distribuição granulométrica da amostra estudada, foi executado um peneiramento a úmido utilizando-se um peneirador vibratório suspenso (Figura 3.2), visto que, a mesma é composta por partículas finas. Foram utilizadas peneiras da série Tyler, da marca Bronzinox, com aberturas de 355  $\mu\text{m}$ , 212  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 106  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$  e 38  $\mu\text{m}$ .



Figura 3.4 - Peneiramento a úmido.

### 3.3 Ensaio de sedimentação descontínua

Ensaio de sedimentação descontínua foram realizados visando observar a influência dos flocculantes, bem como a sua dosagem, sobre a velocidade de sedimentação. Os testes de sedimentação foram realizados em provetas de 1000 mililitros (Figura 3.5), sendo que estas foram previamente graduadas em escala milimétrica para facilitar a visualização da movimentação da interface da polpa.



Figura 3.5 – Provetas de 1000mL.

Para analisar o efeito da floculação foram executados testes sem a presença de floculante e com a presença do floculante nas dosagens de 20g/t e 50g/t. O floculante utilizado corresponde ao Flotisor FL 7130, fornecido pela empresa Clariant. Este reagente corresponde a um polímero aniônico líquido solúvel em água, com alto peso molecular. Para a sua utilização nos testes, o mesmo foi preparado em solução aquosa de concentração 0,05% p/p, com o auxílio de vidraria específica e balança semi-analítica.

Os testes de sedimentação foram executados com uma porcentagem fixa de 20% de sólidos. Inicialmente, a amostra de rejeito de minério de ferro foi pesada em uma balança semi-analítica, assim como a massa de água e a massa de floculante para cada teste. Em seguida, a amostra de rejeito foi adicionada a uma proveta, juntamente com a água para a preparação da polpa, seguida de uma agitação manual para a homogeneização da polpa. Posteriormente, a solução de floculante era adicionada, de acordo com a dosagem específica do teste a ser realizado. Logo após, era executada a agitação da polpa. Ao fim da agitação era disparado o cronômetro, sendo registrada a altura da interface de clarificação da polpa em intervalos estabelecidos. O último ponto foi coletado após 24 horas decorridas do início do respectivo teste para a confecção da curva granulométrica.



Após a realização dos testes foi definida a melhor dosagem para ser utilizada nos testes de abatimento.

### 3.4 Teste de abatimento (*Slump*)

A consistência da pasta mineral foi determinada através dos testes de slump, utilizando-se um cilindro de PVC de 10cm de diâmetro e 10cm de altura. Foram executados experimentos com e sem a presença de floculantes para porcentagens de sólidos variando de 65% a 80% de sólidos. Nos ensaios de abatimento na presença de floculante, foi utilizada a dosagem que culminou na melhor resposta de sedimentação.

Inicialmente, as massas de sólido e água para cada percentual de sólido foram pesadas e posteriormente misturadas e homogeneizadas em um béquer com o auxílio de espátulas. Quando necessário, adicionou-se o volume adequado de floculante à quantidade de sólidos, seguido de agitação manual cuidadosa. Em seguida, transferiu-se a pasta preparada para o cilindro, preenchendo-o totalmente até transbordar. Subsequentemente, mediu-se a altura inicial, retirou-se o cilindro verticalmente para cima e mediu-se a altura final da pasta. Por fim, determinou-se a porcentagem de abatimento (%ABT) através da Equação [1]:

$$\%ABT = S/H*100 \quad [1]$$

Onde:

- S é a diferença entre altura do cilindro e altura da pasta já ensaiada;
- H é a altura inicial do cilindro.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico será apresentado o estudo caracterização da amostra, os ensaios de sedimentação em proveta e os testes de abatimento.

### 4.1 Caracterização da amostra

A partir dos ensaios realizados foram obtidos os resultados a seguir.

#### 4.1.1 Massa específica

Foram preparadas três amostras do material sólido (Amostras 1, 2 e 3), com as quais foi determinado o valor da massa específica utilizando a metodologia do picnômetro simples. Os dados experimentais são apresentados na Tabela 4.1. Através da média dos resultados encontrados, detectou-se que a densidade do rejeito de minério de ferro, foi igual a 2,7 g/cm<sup>3</sup>, com variação mínima entre os testes realizados.

Tabela 4.1 – Resultados da picnometria.

Teste	1	2	3
A1 - Picnômetro	29,748	30,348	30,653
A2 - Picnômetro+ Amostra	31,830	32,730	32,476
A3 - Picnômetro+ Amostra + Água	80,974	82,566	82,098
A4 - Picnômetro+ Água	79,650	81,054	80,972
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,746	2,738	2,619
$\rho_s$ média (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2,701</b>		

#### 4.1.2 Distribuição granulométrica

Os dados obtidos na análise granulométrica estão apresentados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Análise granulométrica da amostra.

Mesh (série Tyler)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
45#	0,355	0,13	0,16	0,16	99,84
70#	0,212	0,07	0,09	0,25	99,75
100#	0,150	0,33	0,41	0,67	99,33
150#	0,106	2,05	2,58	3,24	96,76
200#	0,075	5,30	6,66	9,90	90,10
270#	0,053	7,59	9,54	19,44	80,56
400#	0,038	24,05	30,22	49,65	50,35
-400#	-0,038	40,07	50,35	100,00	0,00
Total		79,59	100,00		

Diante dos dados apresentados na Tabela 4.2 e da Figura 4.1, observa-se que a amostra é composta por baixa quantidade de material grosseiro ( $> 0,075\text{mm}$ ) e grande quantidade de material fino, o que é indicado pelo valor elevado de material passante pela peneira de abertura de  $0,075\text{mm}$ , que corresponde a  $90,10\%$ . De acordo com Pereira (2005), neste caso o material pode ser classificado como um rejeito fino ou “lama”, sendo originados de processos de deslamagem.

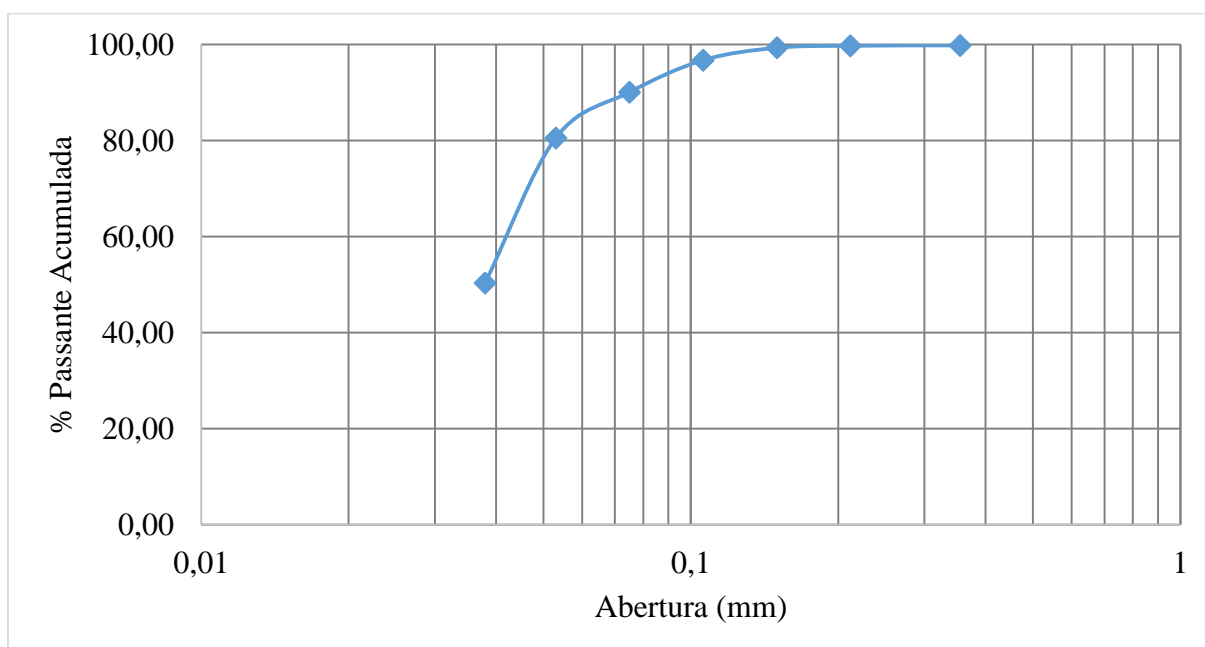


Figura 4.1- Curva Granulométrica.

#### 4.2 Ensaio de sedimentação descontínua

O primeiro teste de sedimentação descontínua do rejeito de minério de ferro realizado foi sem a presença de floculantes. Entretanto, não foi possível acompanhar a interface de sedimentação, pois como o material possui uma grande quantidade de partículas de granulometria abaixo de 0,075mm que apresentam dificuldade de sedimentação, a turbidez gerada por estas impossibilitaram a leitura durante os 30 minutos iniciais do teste. Observou-se que não houve formação de flocos no decorrer do teste (Figura 4.2). Tal fato ocorreu provavelmente devido à ausência de floculante na polpa.



Figura 4.2- Ensaio de sedimentação sem floculante.

Em seguida, empregando a mesma porcentagem de sólidos de 20% do teste anterior, foram realizados testes variando a dosagem de floculante. As dosagens analisadas foram: 20 g/t e 50 g/t. A Figura 4.3 apresenta as curvas de sedimentação para os testes realizados.

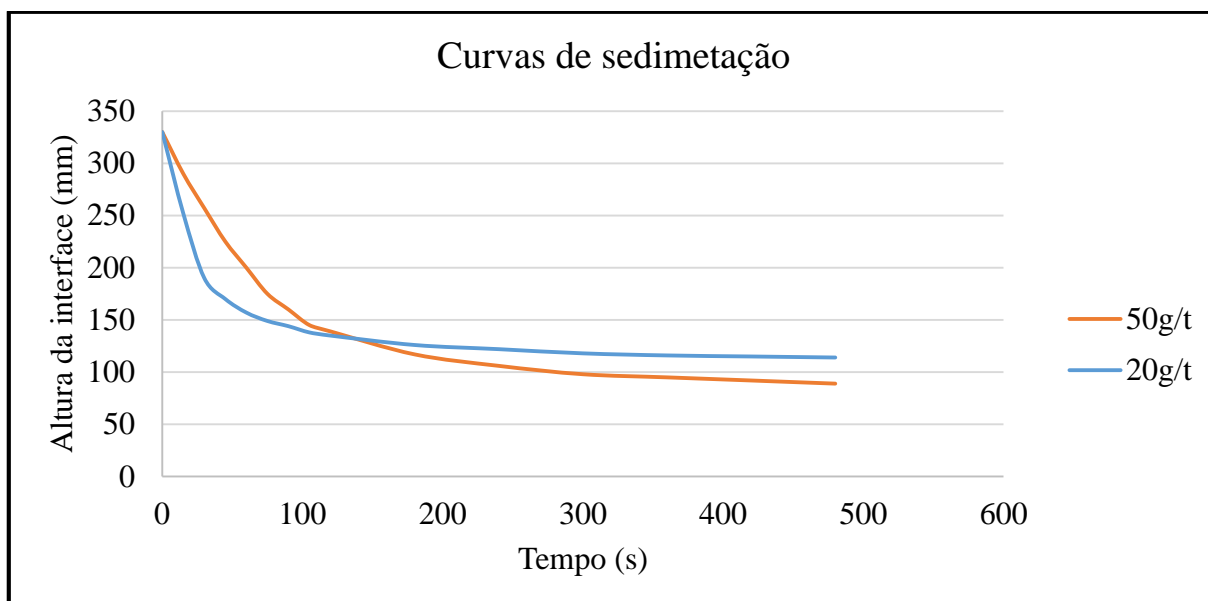


Figura 4.3 - Curvas de sedimentação do rejeito de minério de ferro variando a dosagem.

No teste com dosagem igual a 20 g/t, obteve-se uma velocidade de sedimentação de  $2,06 \times 10^{-3}$  m/s e observou-se a formação de flocos pequenos e uniformes. Além disso, a sedimentação aconteceu de forma mais uniforme. No teste realizado com 50 g/t, atingiu-se uma velocidade de sedimentação de  $4,67 \times 10^{-3}$  m/s e notou-se a formação de flocos maiores em relação ao teste anterior.

Entretanto, apesar da velocidade de sedimentação do teste com 50 g/t ser superior que a dosagem de 20g/t, os flocos na dosagem maior foram capazes de agregar uma quantidade de água significativamente maior no seu interior, fato este que contribui negativamente para a disposição do material em barragens, elevando o risco de acidentes. Além disso, a altura de compactação obtida para a dosagem de 50g/t é maior, ou seja, na fase de disposição a mesma quantidade de material ocupará um volume maior reduzindo a vida útil da barragem. Diante desses fatos, a dosagem escolhida para os testes de abatimento foi de 20g/t de floculante.

### 4.3 Testes de abatimento

Os resultados do teste de *slump*, utilizando geometria cilíndrica em escala de laboratório, são apresentados nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 a seguir:

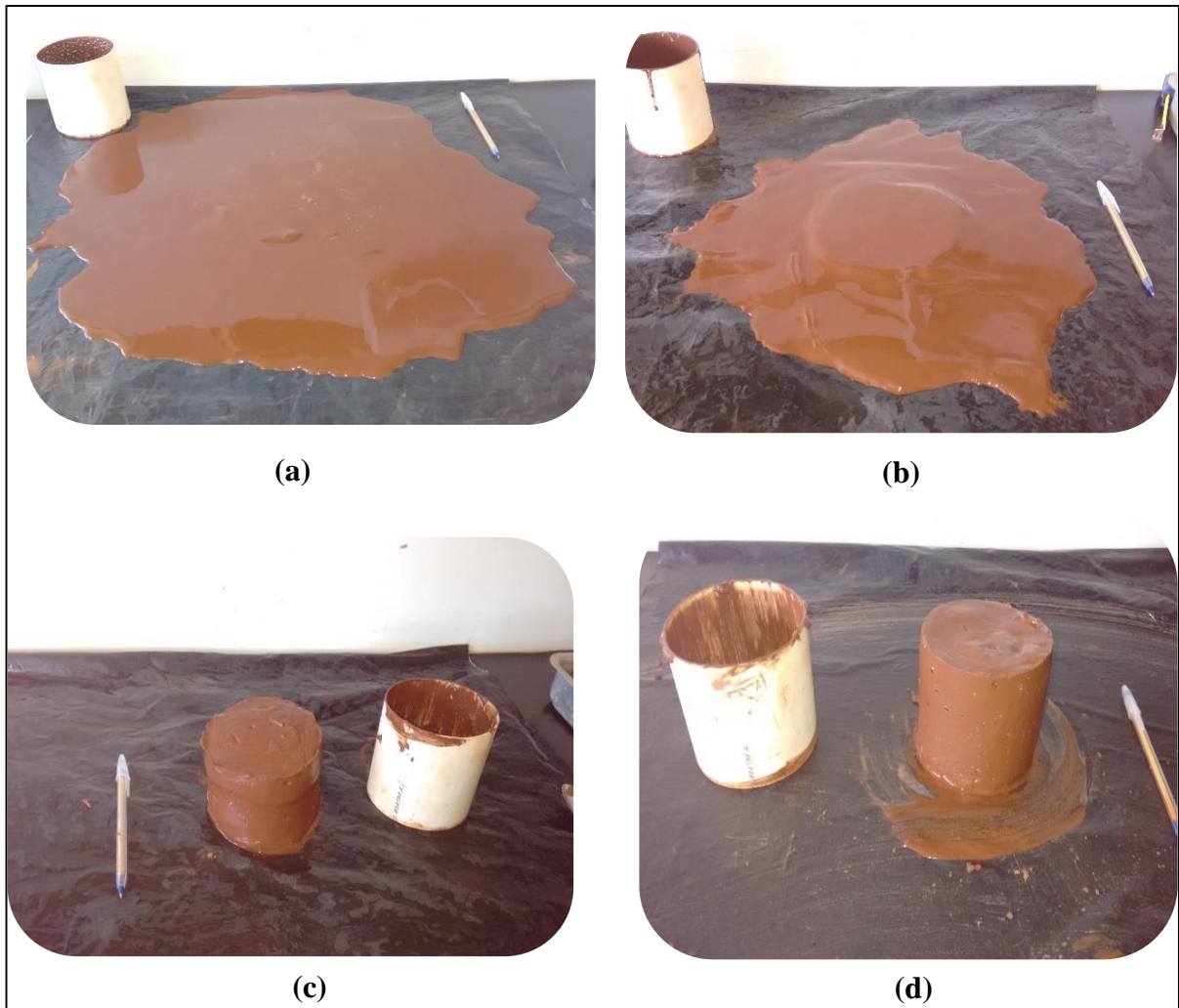


Figura 4.4 – Testes de *Slump* na ausência de floculante. (a) 65% de sólidos; (b) 70% de sólidos; (c) 75% de sólidos; (d) 80% de sólidos.

Através dos resultados de altura de abatimento na ausência de floculante, observa-se que para polpas mais diluídas, ou seja, com porcentagem de sólidos abaixo de 70% de sólidos há um grande espalhamento do material pela a superfície. A partir de 75% de sólidos a mobilidade do rejeito é reduzida, aumentando a consistência da pasta e levando à redução da altura de abatimento.

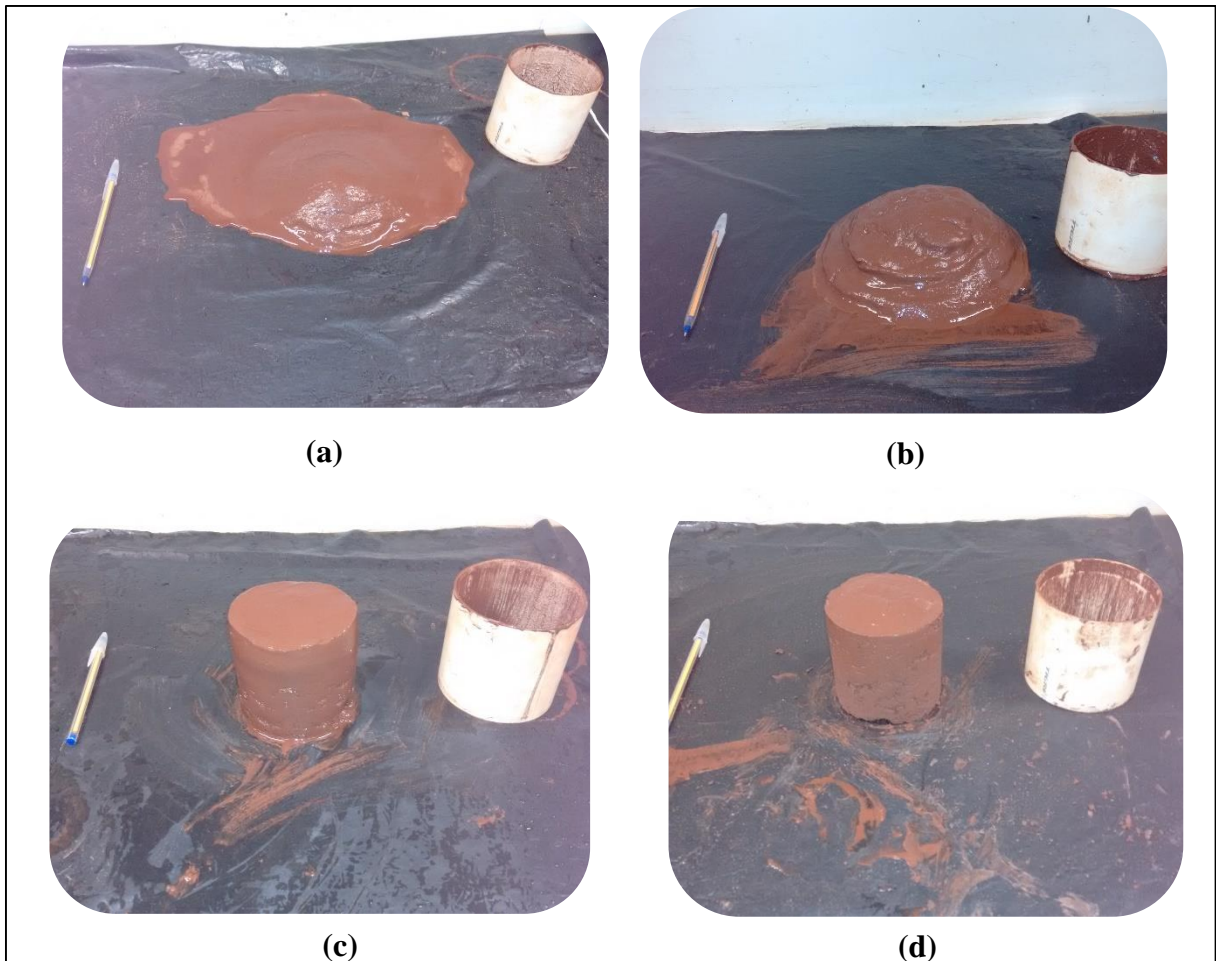


Figura 4.5 – Testes de *Slump* com 20g/t de flocculante. (a) 65% de sólidos; (b) 70% de sólidos; (c) 75% de sólidos; (d) 80% de sólidos.

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados obtidos na presença dos flocculantes. Nota-se que para as polpas mais diluídas a adição do flocculante interferiu positivamente no abatimento da suspensão, diminuindo o espalhamento do material pela superfície e aumentando a consistência do material.

Através do Gráfico 4.6 observa-se que nas polpas com 65% sólidos o abatimento do material passou de 95% para 65%, para as polpas com 70% de sólidos essa redução foi de 84% para 50% na altura de abatimento. Já nas polpas com maior porcentagem de sólidos (75% e 80%) a influência da adição dos flocculantes é menor, pois estas já apresentam um maior adensamento devido à grande porcentagem de sólidos, desse modo, se deformaram menos naturalmente.

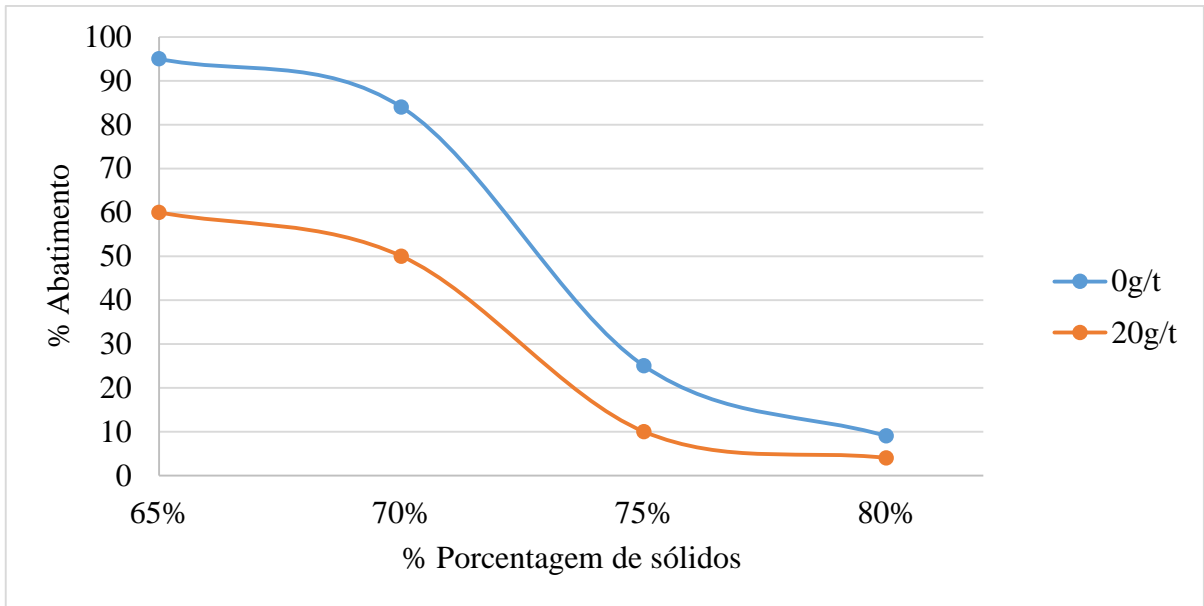


Figura 4.6 - Gráfico % de abatimento da altura “slump” em função do adensamento de pasta.



## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como propósito caracterizar a amostra de rejeito de minério de ferro e avaliar o efeito da adição de reagente agregante fornecido pela empresa Clariant sobre a consistência de polpas minerais visando sua futura disposição na forma de pasta mineral, visto que a utilização de barragens gera grandes riscos ambientais e novas formas de disposição podem evitar estes acontecimentos.

De acordo com a análise granulométrica, a amostra é constituída por partículas de granulometria fina, essa é característica dos rejeitos de minério de ferro, sendo compatível para a obtenção de pastas minerais. A massa específica da amostra utilizada foi determinada por picnometria simples, cuja média foi de 2,701g/cm<sup>3</sup>.

A partir dos testes de sedimentação, conclui-se que a dosagem igual a 20g/t corresponde à mais indicada para ser empregada na execução de testes de sedimentação e conseqüentemente para a aplicação nas pastas minerais.

Quando comparados os resultados obtidos nos testes de abatimento na ausência e na presença de floculante, a adição do reagente agregante Flotacor FL 7130 na dosagem de 20g/t se mostrou eficiente para as condições com 65% e 70% de sólidos, reduzindo consideravelmente a altura de abatimento. Para polpas com porcentagens de sólidos acima de 75,00% a adição de floculante não apresentou mudança significativa em relação aos testes com ausência de floculantes, visto que estes apresentaram menor tendência de abatimento e espalhamento.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Analisar a sedimentação e a consistência da pasta em outras condições operacionais, tais como diferentes tipos de floculantes e coagulantes, bem como em outras dosagens.

Avaliar a influência do pH no meio.

Analisar a influência dos floculantes no ângulo de repouso e na viscosidade escoamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁVILA, J.P. **Acidentes em barragens de rejeitos no Brasil**. Palestra ministrada sobre Segurança de Barragens de Rejeitos em evento promovido pelo Governo do Estado de São Paulo e coordenado pela Secretaria de Energia e Mineração em 2016, São Paulo. Disponível em: <http://www.energia.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/07/ACIDENTES-EM-BARRAGENS-Joaquim-Pimenta-Pimenta-de-%C3%81vila-Engenharia.pdf> >. Acesso em: 11 nov. 2016.

ARAÚJO A.C., SOUZA C.C., AMARANTE S.C. **Rejeitos adensados para disposição em superfície - nova tecnologia em minério de ferro**. In: Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, Brasil. (v.1; n. 4). p. 60-63. 2005.

BALTAR, C. A. M. Processos de agregação. In: LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MTC, 2010. Cap. 13, p. 557-594.

BARREDA, R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral para aproveitamento de rejeitos das lamas calcárias e diminuição do impacto ambiental**. 2012. 133 f. Tese. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.

BRACKEBUSCH, F.W. **Basics of paste backfill systems**. Mining Engineering. Society for mining, metallurgy, and exploration, inc. Apresentação da Reunião Anual da SME, Nevada, 1993.

BRANDÃO, P.R.G. **Interações interfaciais entre partículas no meio aquoso – Parte 2**. Agregação e dispersão. Programa de Pós -Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 200?. Notas de aula.

CARVALHO, W.R. **Flotação colunar reversa de minério de ferro: o efeito da granulometria da sílica.** 2003. 80f. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2003.

CORNEJO, C.; BARTORELLI, A. **Minerais e pedras preciosas do Brasil.** São Paulo: Solaris Edições Culturais. Primeira reimpressão, 2014.

CLAYTON, S.; GRICE, T. G.; BOGER, D. V. **Analysis of the Slump Test for on-site Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions.** International Journal of Mineral Processing, V. 70, 2003.

DANA, J. D. **Manual de Mineralogia.** (Revisto por Cornelius S. Hurlbult, Jr., Tradução de Rui Ribeiro Franco). Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1981. 2v

DNPM. Ferro. **Sumário Mineral Brasileiro,** Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, p. 66-67, 2015.

DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas,** Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2016.

EIMCO. **Deep Cone Paste Thickeners.** Minerals Processing Technology Center. FLSmidth Salt Lake City, Inc, p. 4, 2010.

ESPÓSITO, T.J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico.** 2000. 363f. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

FALCUCCI, A. **A influência de flocculantes poliméricos na formação de pastas minerais.** 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2007.

FALCUCCI, A. **Abordagem prática para o uso de pastas minerais como forma de disposição de rejeitos.** Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

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, Vol 58, pp 267-304, 2000.

KARLA, F.A. **Efeito da adsorção de surfactantes catiônicos e aniônicos nas propriedades superficiais, reológicas e eletrocinética, de suspensões de bentonita.** 2009. 47 f. Relatório de estágio. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

LINS, F.F.; ADAMIAN, R. **Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais.** Série Tecnologia Mineral, CETEM, n. 78, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

LOPES, G. M.; LIMA, R. M. F. **Flotação direta de minério de ferro com oleato de sódio.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 323-329, set. 2009.

MILONAS, J. G. **Análise do Processo de Reconstituição de Amostras para Caracterização do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro em Aterro Hidráulico.** 2006. 146 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

NUNES, C.I.G. **Co-deposição em pasta de resíduos de tratamento de minérios de ouro com incorporação de cinzas de carvão.** 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de

Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e filtragem**. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2004.

OMACHI, G.Y. **Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG

OSORIO, C. A. H. **Caracterização de Pastas Minerai**s. 2005. 177 f. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Eng. Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2005.

OSORIO, C. A. H. **Efeito da Adição de Reagentes Agregantes e de Ligantes sobre a Consistência em Pastas Minerai**s. 2007. 153 f. Tese (Doutorado em Pós-Graduação em Eng. Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2007

PEREIRA, E. L. **Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estático**. 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2005.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. 154 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.

REZENDE, M.C. **Estudo de pastas minerais a partir do espessamento de lamas de processamento fosfático**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2016.

SÁNCHEZ, L.E. **Manejo de Resíduos Sólidos en Minería**. Capítulo 15. II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, UNESCO, vol.1, pp.239-250, 1995.

SOFRÁ F.; BOGER D.V. **Environmental rheology for waste minimization in the minerals industry**. Chemical Engineering Journal 86. p. 319-330, 2002.

VAZ, J.; SILVA, A.C.; SILVA, E.M.S.; ARAUJO, V.R. **Desaguamento de lama de rocha fosfática: pasta mineral**. In: Seminário de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação da Regional Catalão. Coletânea Interdisciplinar em Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação. v. 3, cap. 11, p. 170-186, 2014.

## ANEXO A: TÉCNICA DE PICNOMETRIA

### Materiais necessários:

- Picnômetro de 50 mililitros;
- Balança analítica (0,01 g);
- Pisseta;
- Amostra do sólido;
- Água.

### Metodologia:

- Pesar o picnômetro seco e vazio (A1).
- Adicionar uma certa quantidade de material recobrimdo o fundo do picnômetro, em seguida, pesar o picnômetro com a amostra (A2).
- Adicionar água, ao picnômetro com a amostra e pesar novamente (A3).
- Lavar o picnômetro e secá-lo.
- Encher o picnômetro com água até transbordar, secar a água que molhar a superfície externa do mesmo e, em seguida, pesar o picnômetro apenas com a água (A4).

Por fim, com todas as pesagens anotadas é realizado o cálculo para determinação da densidade, através da utilização da Equação [1]:

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad [1]$$

Onde:

- $d_s$       densidade dos sólidos;
- A1      massa do picnômetro;
- A2      massa do picnômetro + amostra;
- A3      massa do picnômetro + amostra + água;
- A4      massa do picnômetro + água.