



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEMIN - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



INFLUÊNCIA DO TEOR DE SÓLIDOS NA DISPOSIÇÃO DE UM REJEITO FINO DE MINÉRIO DE FERRO

Stéphanie Oliveira Moura e Sá

Ouro Preto

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEMIN - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



INFLUÊNCIA DO TEOR DE SÓLIDOS NA DISPOSIÇÃO DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na
Universidade Federal de Ouro Preto como requisito básico
para conclusão do Curso de Engenharia de Minas

Orientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho

Stéphanie Oliveira Moura e Sá

Ouro Preto
2018

S111i Sá, Stéphanie Oliveira Moura e.
Influência do teor de sólidos na disposição de um rejeito fino de minério de ferro [manuscrito] / Stéphanie Oliveira Moura e Sá. - 2018.

49f.: il.: color; graf; tabs.

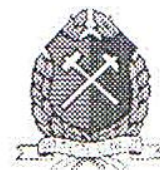
Orientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Rejeitos. 2. Sedimentação e depósitos. 3. Reologia. I. Oliveira Filho, Waldyr Lopes de . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.7.097

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 12 dias do mês de dezembro de 2018, às 10h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“INFLUÊNCIA DO TEOR DE SÓLIDOS NA DISPOSIÇÃO DE UM REJEITO FINO DE MINÉRIO DE FERRO”**, pela aluna **Stéphanie Oliveira Moura e Sá**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho (orientador)**, **M. Sc. Daviély Rodrigues Silva** e **M. Sc. Daniel Geraldo da Cruz**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela *aprovação* da candidata, com a nota *9,7* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.


A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.


Ouro Preto, 12 de dezembro de 2018.


Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


M. Sc. Daviély Rodrigues Silva
Membro da Comissão Avaliadora


M. Sc. Daniel Geraldo da Cruz
Membro da Comissão Avaliadora


Stéphanie Oliveira Moura e Sá


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Trabalho de Conclusão de Curso

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

Primeiramente agradeço a minha família, em especial, aos meus pais e minhas irmãs pelo amor e apoio.

À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino. Ao CNPq e Capes, através do programa Ciência Sem Fronteiras, por me conceder a bolsa de estudos e incentivo a pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. PhD. Waldyr Lopes, por todo o incentivo, dedicação, ensinamentos, e amizade.

Às mestrandas Mariana Queiroz, Mariana Martins e Debora Magalhães pelo companheirismo e ajuda na realização dos ensaios.

À minha turma de engenharia de minas pela amizade e carinho ao longo da graduação.

Ao Bruno pelo amor e compreensão.

À República Bico Doce, pela amizade e acolhimento.

Resumo

Cada vez mais há interesse sobre as formas de disposição de rejeitos de minério devido ao risco associado de ruptura de algumas estruturas destinadas à sua contenção. Dentre as técnicas existentes, o método de disposição subaérea se destaca, onde a disposição da polpa, seja ela espessada ou *in natura*, é feita em ciclos. O conhecimento das características do processo de sedimentação e propriedades reológicas é de suma importância para a definição dos métodos de disposição. A concentração de sólidos das polpas de rejeito tem grande influência nesse comportamento. Neste estudo, foi investigado a influência desta concentração por meio de testes de sedimentação e reologia, simulando concentrações de polpas *in natura* (teor de sólidos de 36%) e polpas espessadas (teor de sólidos de 60%). Foi realizada a caracterização geotécnica do material, determinação de sua tensão limite de cisalhamento, construção de curvas de viscosidade e sedimentação, e cálculo da recuperação de água para recirculação no processo. O rejeito foi caracterizado como um material silto-argiloso, de baixa plasticidade. Polpas de rejeito com teor de sólidos de 36% apresentaram velocidade de sedimentação mais rápida, tiveram uma recuperação final de um volume maior de água, além de apresentarem uma opção barata em relação ao transporte do material por causa de suas propriedades reológicas mais favoráveis, porém instáveis em caso de ruptura de reservatório. Polpas feitas com o teor de sólidos de 60% apresentaram uma baixa velocidade no processo de sedimentação, e a partir da análise dos índices de vazios correspondentes a tensão efetiva nula, foi verificado que a curva do teste de sedimentação é correspondente a curva de adensamento do material. Devido às suas características reológicas, o material apresenta a possibilidade de compor depósitos mais estáveis.

Palavras-chave: rejeito; sedimentação; adensamento; reologia.

Abstract

There is an increasing interest in the disposal of tailings due to the associated risk of rupture of some structures designed to contain them. Among the existing techniques, the subaerial disposal method is highlighted, where the pulp, whether thickened or natural, is disposal in cycles. The knowledge of the behaviour of sedimentation process characteristics and rheological properties is of grand importance for the definition of disposal methods. The solids concentration of the tailings slurry has a great influence on this behaviour. In this study, we will investigate the influence of this concentration on sedimentation and rheology tests, simulating concentrations of natural slurry (solids content of 36%) and thickened slurry (solids content of 60%). The geotechnical characterization of the material, besides the definition of its yield stress, construction of viscosity and sedimentation curves, and calculation of the water recovery for recirculation in the process were performed. The waste was characterized as a low plasticity clay-silt material. Slurry with solids content of 36% showed a faster settling velocity, had a final recovery of a larger volume of water, and presented a cheap option in relation to the transportation of the material due to their favourable rheological properties, however they are also considered unstable in case of rupture of reservoir. Slurry made with the solid content of 60% presented a lower velocity in the sedimentation process, and from the analysis of the void ratios corresponding to the zero effective stress, it was verified that the curve of the sedimentation test corresponds to the consolidation curve of the material. Due to its rheological characteristics, the material presents the possibility of forming more stable deposits.

Keywords: tailings; sedimentation; consolidation; rheology.

Lista de Figuras

Figura 1. Fluxograma típico de beneficiamento do minério de ferro (LUZ; LINS, 2010)	5
Figura 2. Tipos de rejeito em relação a concentração e resistência (GOMES, 2008 apud GOMES, 2009).....	6
Figura 3. Fases do método de disposição subaérea. a) Período de enchimento: sedimentação e adensamento, b) Período de espera: adensamento e ressecamento – (ALMEIDA, 2004 apud LIMA, 2006).....	8
Figura 4. Comportamento da sedimentação obstruída. (RIBEIRO, 2015).....	12
Figura 5. Variação do coeficiente em função dos índices de vazios limites (Adaptado de JEERAVIPOOLVARN, et al, 2009).	14
Figura 6. Exemplo de curva de sedimentação (PANE,1985)	14
Figura 7. Curva de altura do corpo de prova em relação ao tempo de adensamento (Adaptado de LI et al, 2012).....	16
Figura 8. Curva de típica de índice de vazios (Adaptado de MENEZES,2012).	17
Figura 9. Curvas de Fluxo. A) Fluido Newtoniano B) Fluido de Bingham C) Fluido Pseudoplástico D) Fluido Dilatante. (Adaptado de BOGER et al.,2006)	18
Figura 10. Predição de gasto de energia de um sistema de bombeamento em função da concentração da polpa (Adaptado de BOGER et. al., 2006).	20
Figura 11. Distribuição granulométrica do material.....	27
Figura 12. Limite de Liquidez	28
Figura 13. Curva do e_{00} vs. epolpa	29
Figura 14. Curvas de sedimentação dos rejeitos com teor de sólidos de 36% e 60%.	30
Figura 15. Limites dos índices de vazios definidos para a polpa de 60%	31
Figura 17. Novos limites dos índices de vazios definidos para a polpa de 60%.	33
Figura 18. Provetas usadas no teste de sedimentação. a) Presença de mini-vulcões, canais e flocos na polpa de 60%. b) Presença de mini-vulcões na polpa de 36%. c) Presença de vulcões e flocos na polpa de 36%......	34
Figura 19. Teste de sedimentação das polpas de 36% preparadas pelo método A e B.....	35
Figura 20. Limites do índice de vazios da polpa de 36% preparada pelo método A.....	36
Figura 21. Teste de sedimentação da polpa de 36% preparada pelo método A,sem a presença de flocos.....	37
Figura 22. Curvas de Viscosidade.	38
Figura 23 .Curvas de Fluxo.	39

Lista de Tabelas

Tabela 1. Comparação entre os métodos de disposição (Adaptado de LIMA,2006).	9
Tabela 2. Modelos descritivos do comportamento reológico (NASCIMENTO, 2008 apud RIBEIRO, 2015).....	19
Tabela 3. Parâmetros obtidos pela curva de sedimentação - Comparação entre as concentrações.....	31
Tabela 4. Volume total de água recuperado da polpa	33
Tabela 5. Parâmetros observados no testes de sedimentação das polpas de 36% preparadas pelo método A (ensaios 5 e 6) e método B (ensaios 3 e 4).....	36
Tabela 6. Tensão limite de escoamento das polpas e viscosidade referente ao limite de escoamento.	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Tema do trabalho.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo Geral	4
1.2.2. Objetivo Específico	4
1.3. Justificativa	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Minério de Ferro	5
2.2. Rejeitos de minério	6
2.3. Formas de disposição de rejeitos finos	7
2.4. Características geotécnicas dos rejeitos finos	9
2.5. Sedimentação	10
2.5.1 Teorias de sedimentação	11
2.5.2. Curva de sedimentação	11
2.5.3. Sedimentação e adensamento	12
2.5.4. Ensaio de sedimentação	15
2.6. Adensamento	15
2.7. Reologia.....	17
2.7.1 Classificação reológica	17
2.7.2. Ensaio reológico	19
2.7.3. Fatores que influenciam propriedades reológicas	20
2.7.4 Aplicações da reologia na mineração	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1. Amostragem.....	22
3.2. Preparação da Amostra	22
3.3. Porcentagem de sólidos	22

3.4.	Determinação da densidade real dos grãos (Gs).....	22
3.5.	Análise granulométrica	23
3.6.	Índice de Plasticidade (IP)	24
3.7.	Determinação do e_{00}	24
3.8.	Sedimentação em colunas	25
3.9.	Viscosidade da polpa.....	26
4.	RESULTADOS.....	27
4.1.	Densidade dos grãos	27
4.2.	Análise granulométrica	27
4.3.	Índice de Plasticidade	27
4.4.	Determinação do e_{00}	28
4.5.	Sedimentação	29
4.5.1	Ensaio com amostras preparadas pelo método B.....	29
4.5.2	Ensaio com polpa de 36% pelo método A.....	35
4.6.	Viscosidade da polpa.....	37
5.	CONCLUSÃO.....	41
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
7.	APÊNDICE	46

1. INTRODUÇÃO

1.1. Tema do trabalho

Os rejeitos são uma mistura de resíduos sólidos e água, gerados nos processos de beneficiamento do minério. Os rejeitos de minério de ferro são gerados, no beneficiamento, na etapa de concentração, e geram rejeitos finos, ou lama, e rejeitos granulares. As lamas são geralmente dispostas *in natura*, de forma contínua em barragem de rejeitos. No entanto essa disposição pode ser feita por métodos alternativos, como disposição da polpa espessada, pasta ou pela técnica subaérea. Cada vez mais há interesse sobre a forma de disposição de rejeitos, devido ao risco associado de ruptura de algumas estruturas destinadas à sua contenção.

Inúmeros fatores influenciam a tomada de decisão para definir o método de disposição de rejeito, por exemplo, a forma de tratamento do material pós saída da usina, seu transporte até o reservatório, o tempo de enchimento total do local, e a estabilidade das estruturas de contenção.

Dentre as técnicas de disposição que devem prevalecer para rejeitos finos no futuro, o método de disposição subaérea se destaca. Ele consiste na disposição da polpa, seja ela espessada ou *in natura*, em ciclos, onde, após o enchimento de uma camada, é deixado um tempo de espera para que o material sofra os fenômenos físicos de sedimentação, adensamento, drenagem e ressecamento. Esse método permite a recuperação de água da polpa para recirculação no processo de beneficiamento, e devido ao processo de ressecamento, um aumento na resistência das camadas de rejeito e a consequente maior estabilidade do depósito.

Dentre os fenômenos físicos que os rejeitos experimentam na sua disposição, a sedimentação e o adensamento estão quase sempre presentes. O estudo da sedimentação de polpas é vasto, principalmente em relação ao comportamento dessas polpas num sistema de espessamento. Porém, os limites entre sedimentação e o fenômeno que lhe segue, o adensamento do material, não são muito bem definidos, pois se trata de processos que podem ocorrer simultaneamente. O conhecimento deles é de suma importância também para se estimar o enchimento do reservatório, tema bastante atual quando se buscam alternativas de disposição que incluem cavas exauridas de mineração (PINHO et al, 2018).

Relacionado ao tema da disposição de rejeitos finos e fundamental para seu estudo, a reologia da polpa é outra área de conhecimento importante, que está ligada, entre outros processos, ao modo de fluir de um material. Polpas de rejeito com baixa viscosidade simplificam o sistema de transporte e se espalham (ocupam) pelo reservatório com muita mais facilidade. A

desvantagem dessa baixa viscosidade é que, em caso de ruptura de reservatório, esse material, pela sua alta mobilidade, pode alcançar longas distâncias, e cobrir grandes áreas, degradando e colocando em risco todo o meio ambiente.

A concentração de sólidos presentes nas polpas de rejeito tem grande influência nos parâmetros de escolha de métodos de disposição de rejeitos. Neste estudo, foi investigada a influência desta concentração de sólidos em testes de sedimentação e reologia. Foi estudado este comportamento, simulando o regime de fluxo de um sistema de disposição subaérea de polpas *in natura*, com teor de sólidos de 36%, e polpas espessadas, com teor de sólidos de 60%.

1.2. Objetivos

Neste item estão definidos os objetivos gerais e específicos desenvolvidos no estudo.

1.2.1. Objetivo Geral

Simular e avaliar o comportamento de rejeitos de minério de ferro em um sistema de disposição subaérea, com concentrações que simulam um rejeito *in natura* e um rejeito espessado, por meio de testes de sedimentação e reologia.

1.2.2. Objetivo Específico

- Realizar a caracterização geotécnica do rejeito;
- Avaliar a sedimentação da amostra através de ensaios de sedimentação em bancada;
- Analisar o comportamento do rejeito quanto ao início do adensamento de peso próprio;
- Avaliar curva de e_0 do material;
- Caracterizar a amostra quanto a sua viscosidade e tensão de escoamento.

1.3. Justificativa

O estudo visa analisar a influência do teor de sólidos na sedimentação e viscosidade do rejeito e discutir como esses parâmetros podem influenciar na definição do sistema de disposição deste.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Minério de Ferro

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, e um dos mais produzidos e usados. Dentre os minerais que contém esse elemento em alta concentração estão a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita (FeO/OH) e siderita (FeCO_3). A maior parte do material retirado dos minérios de ferro é usada para fabricar aço e ferro fundido (JESUS, 2009).

O Brasil se encontra no quinto lugar entre os países detentores das reservas de minério de ferro. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral a soma das reservas medidas, indicadas e inferidas de minério de ferro reconhecidos são da ordem de 73,7 bilhões de toneladas, representando 7,2% das reservas mundiais (JESUS, 2009).

O processo de mineração do minério de ferro consiste nas atividades de lavra, beneficiamento, e disposição dos rejeitos. A lavra é a primeira atividade, seguida das operações de beneficiamento, que compreendem as atividades de britagem, peneiramento, moagem, classificação e concentração.

A Figura 1 ilustra o processo típico de beneficiamento de minérios de ferro.

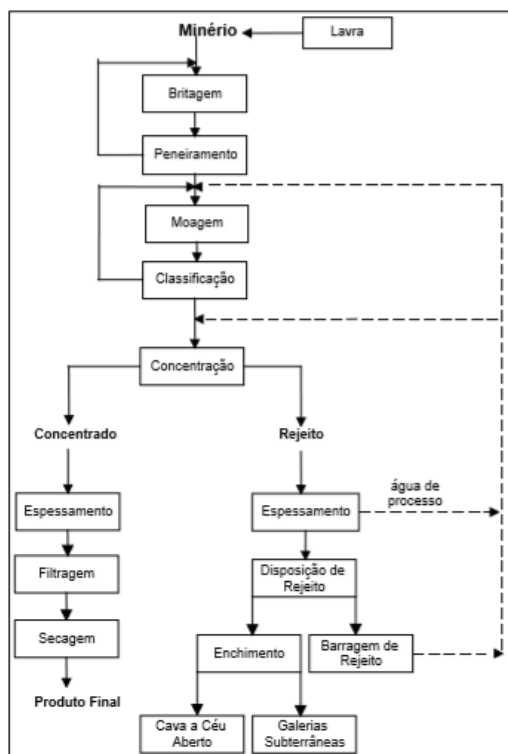


Figura 1. Fluxograma típico de beneficiamento do minério de ferro (LUZ; LINS, 2010)

Normalmente as etapas de concentração são realizadas através de processos a úmido, e é necessário diminuir a quantidade de água do concentrado para seu transporte final ou uso na indústria metalúrgica. Para isso é feita uma etapa de desaguamento do produto e secagem (LUZ; LINS, 2010).

2.2. Rejeitos de minério

Os rejeitos são uma mistura de resíduos sólidos e água gerados nos processos de beneficiamento do minério. Eles podem ter características mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas distintas (IBRAM, 2016). De acordo com a granulometria, há duas classificações geralmente empregadas para os rejeitos: lama, para a granulometria fina e, granulares para rejeitos com tamanho de grãos maiores (DUARTE, 2008 *apud* IBRAM, 2016). Esses rejeitos podem ser descartados na consistência de polpa, pasta, ou torta.

Segundo Figueiredo (2007), os rejeitos em polpa podem ser desaguados parcialmente, sendo estes chamados de rejeitos espessados, apresentam alto teor de sólidos e são possíveis de serem bombeados até o local da disposição. Já os rejeitos em pasta são materiais espessados devido a adição de algum aditivo químico, enquanto os rejeitos em torta são materiais que foram filtrados, e podem estar na forma de uma massa saturada ou não saturada. A consistência do rejeito é geralmente definida em função de suas características de resistência ao cisalhamento e o teor de sólidos (GOMES, 2009). Como mostrado na Figura 2, o teor de sólido tem uma relação direta à resistência.

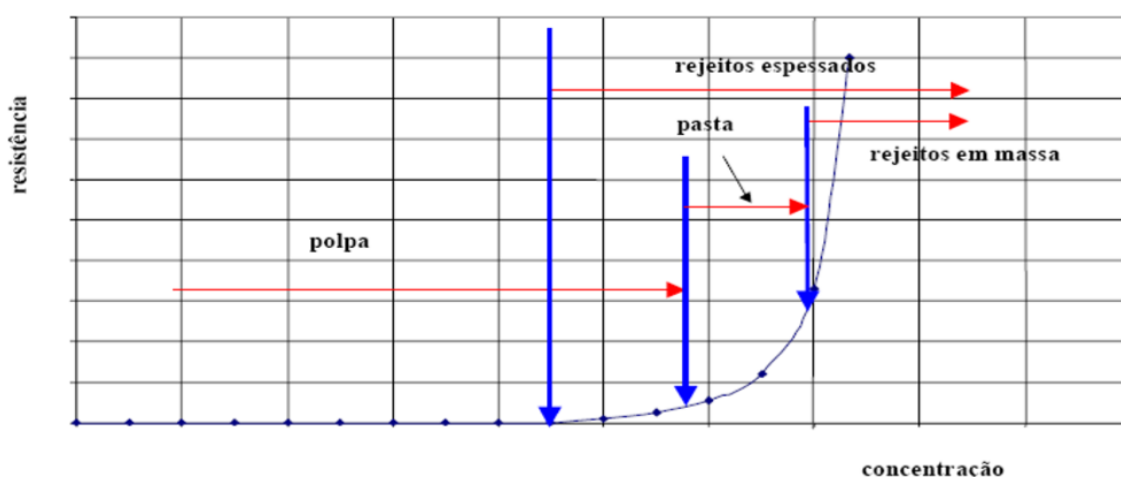


Figura 2. Tipos de rejeito em relação a concentração e resistência (GOMES, 2008 *apud* GOMES, 2009)

Os rejeitos de minério de ferro são geralmente gerados na etapa de concentração do processo de beneficiamento do minério, sendo que há dois tipos de rejeitos, o fino e o arenoso. O

material fino é predominantemente composto de partículas de granulometria fina (menor que 0,074 mm), e resulta do primeiro estágio da concentração, a deslamagem (GOMES,2009). Essa etapa é feita em hidrociclones que visam classificar o material da alimentação em duas porções: o material mais fino, chamado de overflow e um mais grosseiro, denominado underflow. Ao fazer a classificação dentro do material, a porção fina retirada é considerada a lama de rejeito. Segundo Gomes (2009), o material arenoso é predominantemente composto de partículas de granulometria grossa ($0,074\text{mm} < \varnothing < 0,6\text{mm}$), não possui características de plasticidade, e se comporta com rápida sedimentação e adensamento, liberando a água contida na polpa rapidamente. O rejeito fino, ou lama, pode apresentar alguma plasticidade e ser muito menos permeável, e devido a isso a sedimentação é mais lenta e o adensamento por peso próprio pode ir bem além do tempo de formação do depósito.

Em seu modo convencional, a disposição de rejeitos é feita na sua forma natural de produção, ou seja na consistência de polpa. No entanto, os rejeitos espessados ou filtrados vem ganhando interesse e uso, pelo fato de diminuir significativamente a área utilizada para dispor o material, e possibilitarem o aumento da recirculação de água no processo, além de constituírem estruturas mais seguras (OLIVEIRA-FILHO E ABRÃO, 2016).

2.3. Formas de disposição de rejeitos finos

Cada vez mais os métodos alternativos de disposição de rejeito vêm sendo utilizados, devido a vários benefícios, como diminuir o volume da área de disposição, garantir a estabilidade do depósito (com rápida reabilitação das áreas), maior aproveitamento de água para reutilização no processo, entre outros. Dentre esses métodos podemos citar disposição em pasta, disposição da lama espessada e disposição subaérea (LIMA, 2006).

O método de disposição da lama espessada consiste em lançar a lama com alto teor de sólidos em um reservatório, através de um ponto relativamente alto, para que o material forme um talude e apresente a maior parte da sua superfície exposta à evaporação (OLIVEIRA-FILHO ABRÃO,2016). Essa forma de disposição resulta num depósito mais estável e coeso em comparação com os métodos convencionais, permitindo o uso de contenções menores ou, de acordo com a estabilidade do material, até mesmo sem a necessidade do uso dessas estruturas de arrimo (LIMA, 2006).

Os rejeitos espessados são proveniente de processos que podem usar flocculantes, tanques de sedimentação, espessadores especiais, filtros, entre outros, para aumentar o teor de sólidos da

polpa. O uso desses processos pode aumentar consideravelmente o custo do manejo de rejeitos. Em comparação aos métodos convencionais de disposição, a lama espessada pode armazenar quantidades maiores de rejeito na barragem, além de poder ser acomodada em diferentes topografias (LIMA, 2006).

O método de disposição subaérea consiste na disposição de camadas de rejeitos finos na condição normal de descarte (sem espessamentos especiais) onde os processos de sedimentação, adensamento, drenagem e ressecamento possam ocorrer de modo integral, antes que seja feito o lançamento de outra camada no reservatório. Ou seja, o fluxo de disposição do rejeito é feito de forma intermitente (LIMA, 2006). Dessa forma, a camada de material formada é estável, com alta resistência devido a conclusões das etapas de adensamento e ressecamento (SILVA, 2003). A figura 3 ilustra a ocorrência destes fenômenos descritos acima nos reservatório onde há disposição subaérea.



Figura 3. Fases do método de disposição subaérea. a) Período de enchimento: sedimentação e adensamento, b) Período de espera: adensamento e ressecamento – (ALMEIDA, 2004 apud LIMA, 2006)

Comparado ao método de disposição de polpas convencionais, o método de disposição subaérea permite que no mesmo depósito seja estocado uma quantidade muito maior de rejeito, podendo armazenar o dobro da quantidade normal de rejeito (GIPSON, 1998 apud LIMA, 2006). No entanto, para que o lançamento seja feito de forma intermitente, é recomendado que se disponha diferentes reservatórios para permitir o enchimento cíclico do rejeito, além de levar em conta que para a máxima eficiência do método, os tempos de espera, para o início de um novo lançamento, vão aumentando progressivamente (OLIVEIRA-FILHO E ABRÃO, 2016). É necessário destacar, ainda, que os rejeitos espessados dessa forma natural proporcionam a recuperação de água pelo processo de sedimentação da polpa, e também durante o adensamento por peso próprio. Desta forma a recuperação de água pode ser ainda maior que a recuperação de água pelo processo de espessamento de polpas na planta. A tabela 1 apresenta a comparação entre os métodos de disposição subaérea e polpa espessada.

Tabela 1. Comparação entre os métodos de disposição (Adaptado de LIMA, 2006).

	SUBAÉREA	ESPESSADO (TTD)
Densidade final	Média a alta	Média a alta
Segregação	Alta a leve	Leve
Água sobrenadante	Alta a alguma	Alguma a nenhuma
Percolação	Alta a alguma	Alguma
Reabilitação	Após algum tempo	Quase imediata
Permeabilidade	Média a baixa	Baixa
Aplicação	Na superfície	Na superfície
Consumo de água	Alto a médio	Médio
Custos	Médio a alto	Alto

A disposição subaérea pode ser implementada também com lama espessada. Neste caso a sedimentação fica eliminada e o material passa direto aos processos de adensamento por peso próprio e ressecamento.

2.4. Características geotécnicas dos rejeitos finos

O comportamento dos rejeitos nas barragens é diretamente influenciado pela natureza do depósito, a forma de deposição do material e as características do rejeito (SOARES, 2010).

Segundo Gomes (2009), a distribuição granulométrica é fator fundamental para definir o tipo de disposição do rejeito. Rejeitos finos são normalmente dispostos em barragens convencionais ou na consistência de pasta, enquanto os rejeitos granulares podem ser usados no alteamento de barragens, ou dispostos em pilha após serem filtrados. Ambos os materiais podem ainda ser dispostos em conjunto, normalmente em barragens convencionais. Os minérios de ferro são geralmente dispostos separados, com a porção granular disposta em pilhas ou utilizada para construção de barramentos. O rejeito fino é, em geral, disposto em barragens convencionais.

¹ TTD – Thickened Tailings Disposal

Outro fator que pode influenciar no comportamento da massa é a densidade do rejeito, que está relacionada ao tipo de lançamento e posição deste na barragem (SOARES, 2010). Em geral, a densidade aumenta com a profundidade em um depósito.

O índice de plasticidade é outra característica observada. Segundo Soares (2010), os índices de plasticidade de rejeitos são geralmente abaixo de 25%, sendo que muitos rejeitos não apresentam plasticidade.

A capacidade dos reservatórios de rejeitos finos é quantificada através de parâmetros de compressibilidade e adensamento da polpa, expressos nas relações entre índices de vazios (e) e tensões efetivas da polpa (σ'), e índice de vazios e permeabilidade (k) (GOMES, 2009; Oliveira-Filho e Abrão, 2016). O índice de vazios inicial (e_{00}) é considerado como o limite entre a sedimentação da polpa e seu adensamento (SOARES, 2010), onde e é definido pela razão do volume de vazios (V_v) e pelo volume de sólidos (V_s) do material:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.1)$$

Com essas características é possível simular o enchimento do reservatório em função do tempo. No entanto, como Oliveira-Filho e van Zyl (2006) explicam, o adensamento de rejeitos finos (lamas) não se dá de acordo com a teoria clássica de adensamento (infinitesimal), mas requer o uso de modelagem de adensamento a grandes deformações. Para isso é necessário usar procedimentos não usuais para determinar as relações constitutivas do processo de disposição dos rejeitos finos. Dentre os principais testes usados para determinar essas relações, podemos citar ensaios de adensamento com velocidade de deformação constante ou taxa de deslocamento constante, ensaios edométricos, além de ensaios de adensamento induzido por percolação (HCT²) (MENEZES,2010).

2.5. Sedimentação

Os fenômenos da queda de partículas num meio fluido por ação da gravidade, conhecido como sedimentação, e a formação de sedimentos e posterior movimentação das partículas até que um arranjo de equilíbrio seja alcançado, num processo conhecido como adensamento, são observados no lançamento de rejeitos finos em reservatórios especialmente construídos pela indústria de mineração como local de seu armazenamento final. Segundo Ribeiro (2015), estes processos, explicam como os sólidos contidos numa mistura homogênea deixada em

² Hydraulic Consolidation test

repouso se comportam em decorrência do próprio peso. A fase de adensamento começaria após a sedimentação das partículas.

2.5.1 Teorias de sedimentação

Quando a concentração de sólidos da polpa em estudo é baixa, entende-se que os sólidos sedimentam livremente, sem a interação das partículas. A Lei de Stokes foi pioneira em tentar explicar esse fenômeno, ao descrever o comportamento de queda de uma partícula em meio fluido (SILVA, 2008). Essa teoria é muito usada para estudos de granulometria da fração fina dos solos.

No entanto, a teoria de Stokes, por considerar apenas o movimento de partículas individualizadas, tem aplicações limitadas para estudar processos em que a concentração é elevada, comuns na mineração. Kynch (1952, apud Silva, 2008) propôs uma teoria para explicar a chamada sedimentação obstruída onde o comportamento de uma partícula em queda, em um meio fluido, não depende apenas das características da partícula e do fluido, sendo necessário considerar a concentração de partículas da mistura.

Na mesma linha de estudos, McRoberts e Nixon (1976) avançaram a discussão abordando os processos atuantes quando se observa a sedimentação de dispersões. Segundo eles, a partir do momento em que há formação de solo, dá-se início a uma transmissão de tensão efetiva, e assim a teoria de adensamento poderia explicar o comportamento da coluna de sólidos formada. Tanto o processo de sedimentação quanto o de adensamento poderiam ocorrer simultaneamente, já que o adensamento se inicia pela formação da primeira camada de solo.

2.5.2. Curva de sedimentação

A Figura 4 ilustra as fases pelo qual passa uma coluna com polpa, inicialmente homogênea, em função do tempo: ocorre a sedimentação na camada de dispersão, representada pela curva azul, e o adensamento, na camada formada pelo solo, representada pela curva em vermelho. Ribeiro (2015) explica que há 3 estágios dentro do processo de sedimentação: o primeiro é onde ocorre a taxa constante de sedimentação das partículas, e teoricamente representa a sedimentação das partículas. O segundo, a partir do ponto A, representa o período onde há uma queda na taxa de sedimentação, e representaria a fase de transição. O estágio final é observado a partir do ponto B onde há uma queda maior na taxa de sedimentação e é considerado o início do processo de adensamento de peso próprio. Há uma dificuldade em definir qual o ponto onde o adensamento começa (SALFATE, 2011 *apud* RIBEIRO, 2015).

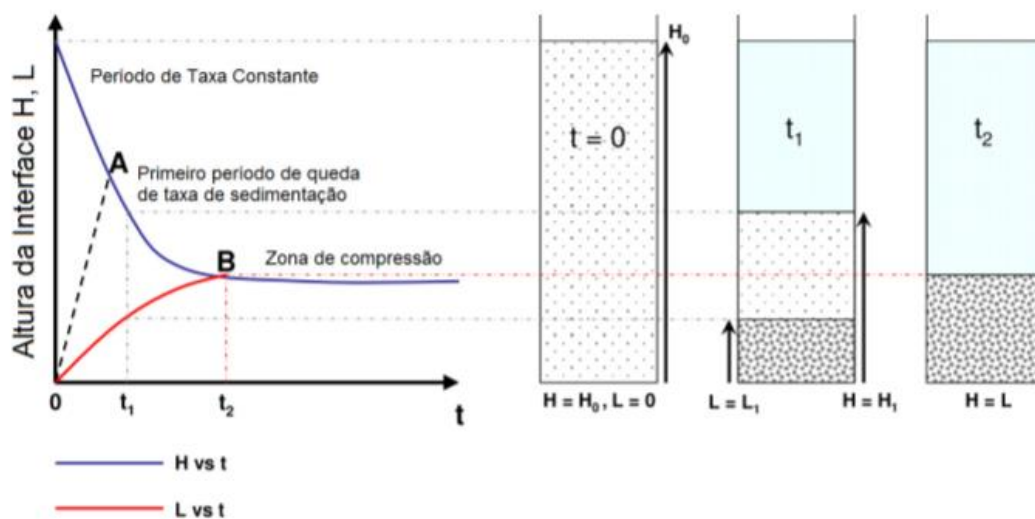


Figura 4. Comportamento da sedimentação obstruída. (RIBEIRO, 2015)

A curva de sedimentação também é estudada pela área de tratamento de minérios, para dimensionamento de espessadores, que também descreve a presença de 3 fases (MASSARANI; FRANÇA, 2010). A primeira seria a fase de líquido clarificado, em seguida sedimentação livre e por último a região de compactação, ou adensamento. O início da curva é explicado pela sedimentação livre, onde não há interação entre as partículas enquanto no fundo da proveta, a região de compactação vai sendo formada e as partículas terão contato entre si, e, portanto a concentração irá variar assim como a velocidade de descida das partículas. Essa descrição está de acordo com a apresentada por Ribeiro (2015), no entanto não é admitido que há sedimentação livre em polpas com concentrações altas. Além disso, há uma menor compreensão do processo de adensamento, já que no processo de dimensionamento de espessadores, essa fase não é estudada.

2.5.3. Sedimentação e adensamento

McRoberts & Nixon (1976) discutiram sobre o efeito da concentração de sólidos na dispersão observada. Polpas com concentrações de sólidos suficientemente baixas apresentarão um movimento governado pela teoria de sedimentação, enquanto que polpas com concentrações altas apresentaram movimento governado pela teoria do adensamento. Ribeiro (2015) comenta ainda sobre outros fatores que podem ter efeito sobre o processo de sedimentação, como a natureza do material, método de disposição, granulometria, entre outros. Nam et al (2008) discorreram sobre o efeito da floculação no processo de sedimentação. Segundo eles,

quando as partículas estão em um sistema na qual as forças de atração são positivas, as partículas são atraídas umas às outras e formam flocos.

Nam et al (2008) explicam, ainda, a existência de outros fenômenos no processo, como a formação de canais de água. Esses canais são construídos pela água ao longo do corpo de sólidos como canais preferenciais de caminho do fluido, e pode aumentar a dissipação do excesso de poropressão no processo de adensamento. Ao chegar na superfície do material, o fluido pode desenvolver mini-crateras e mini-vulcões. Segundo Nam et al (2008), materiais floculados têm a velocidade de sedimentação maior, e formação de canais de água extensos. Esses canais permitem o aumento do coeficiente hidráulico ao longo do corpo de sólidos, dissipando o excesso de poropressão, e acelerando o processo de adensamento.

Levando em conta os fatores que podem ter efeito sobre os processos de sedimentação, observa-se que a teoria de sedimentação de Kynch não explica todos os fenômenos que ocorrem durante a sedimentação em coluna de polpas. Os estudos de Pane (1985) uniram as teorias de Kynch e de adensamento por meio de uma equação geral que governa o movimento de sedimentação. Segundo ele, a diferença entre a fase da coluna em que há dispersão do material e a que está sofrendo adensamento é explicada pela presença da tensão efetiva no meio. Em qualquer ponto da coluna de sedimentação, a tensão é dada por:

$$\sigma = \beta(e)\sigma' + u_w \quad (1.2)$$

Onde,

σ é a tensão efetiva total

$\beta(e)$ é um coeficiente função de e , índice de vazios

σ' é a tensão efetiva

u_w é a poropressão da água

Segundo Pane (1985) o coeficiente β varia de 0 a 1, considerando o valor do índice de vazios (e). Quando há um índice de vazios suficientemente alto na coluna de sedimentação a tensão efetiva é inexistente, e a tensão total é considerada igual a poropressão do fluido. Assim, o coeficiente β assume o valor nulo. Considera-se o índice de vazios e_m como o índice limite a partir do qual a mistura se comporta como dispersão. Quando há índices de vazios suficientemente baixos, considera-se que há contato entre as partículas e que o movimento entre as partículas está sendo controlado pela teoria de adensamento. Desse modo e assume o valor limite e_s , e β o valor de 1. A equação geral proposta por Pane (1985) assume então a forma da equação proposta por Kynch quando $e > e_m$, e assume a forma da equação geral da teoria de adensamento quando $e < e_s$. Além disso, a equação de Pane também explicaria a

fase intermediária do processo de sedimentação, que Ribeiro (2015) assume como sendo a fase onde há uma queda na velocidade de sedimentação. A literatura em geral assume que nessa fase o processo de sedimentação é concomitante ao processo de adensamento. A Figura 5 explica a variação do coeficiente β em função de e durante essas fases.

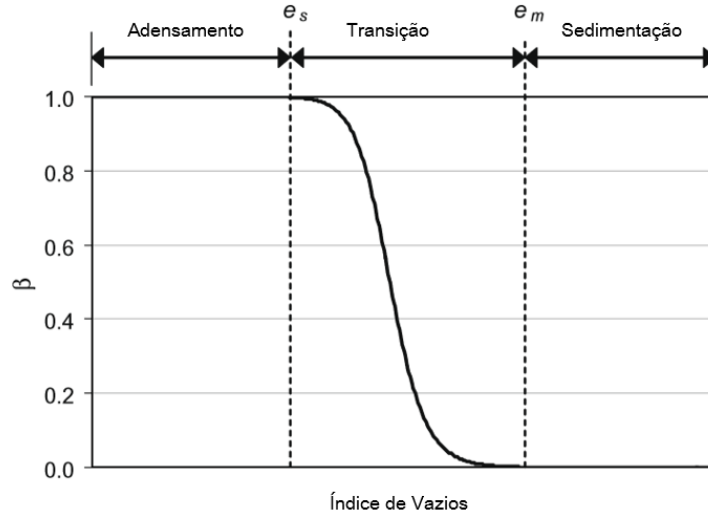


Figura 5. Variação do coeficiente em função dos índices de vazios limites (Adaptado de JEERAVIPOOLVARN, et al, 2009).

Após a determinação dos índices de vazios limites podemos observar pela curva de sedimentação o comportamento da polpa de acordo com as fases descritas. A Figura 6 exemplifica como é feita essa definição.

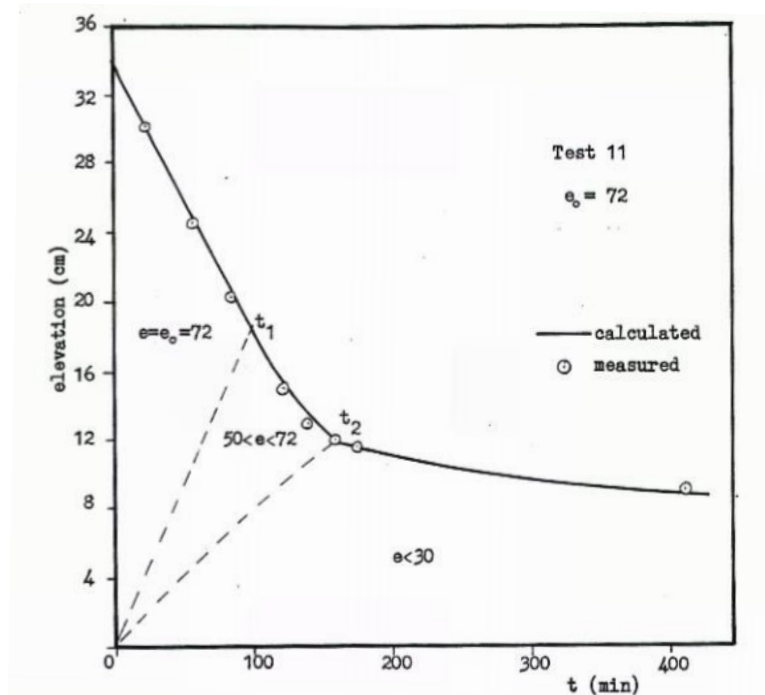


Figura 6. Exemplo de curva de sedimentação (PANE, 1985)

Nesse exemplo foram definidos os seguintes limites:

$$e_0=72, e_m < 72, e_s < 50, e_f < 30$$

Onde o e_0 é o valor do índice de vazios inicial da polpa e, segundo Pane (1985), é constante até a sedimentação atingir a fase intermediária da suspensão. Até então é considerado que a concentração da solução permaneça constante. O valor de e_f (índice de vazios final) é assumido como o índice de vazios resultante da fase de adensamento por peso próprio.

Nos estudos de adensamento de lamas para fins de disposição de rejeitos finos é comum assumir que aqueles limites de índice de vazios possam ser definidos com o auxílio de uma curva de e_{00} vs. e_{polpa} , onde e_{00} significa valores do índice de vazios numa situação de tensão efetiva nula para diversas concentrações.

2.5.4. Ensaios de sedimentação

Ensaios de sedimentação em colunas são feitos em colunas de 1 litro. Eles podem ser usados para estudos geotécnicos para determinar as propriedades necessárias para analisar a sedimentação do material (SILVA, 2008).

Ao estudar-se a curva de sedimentação e definir-se como se dá o comportamento do material em diferentes concentrações, busca-se uma maior compreensão do comportamento dessas polpas após sua disposição em uma barragem de rejeitos. Como o teste é feito em um espaço confinado limitado e a amostra tem tempo para passar pelas três fases da sedimentação sem ser disposto outra quantidade de rejeito acima da coluna adensada, ele apenas simula o comportamento de um rejeito que é disposto em regime intermitente, ou seja, após ser disposto na barragem, a polpa teria tempo para sedimentar e adensar antes que um novo fluxo de rejeito fosse lançado novamente no depósito.

2.6. Adensamento

Ao observar o processo de sedimentação da polpa, considera-se a última fase como a etapa de adensamento. Este adensamento na verdade tem seu início desde a formação das primeiras camadas de sólidos no fundo da coluna ou do reservatório. Todo o material que constitui as camadas superiores está comprimindo o material mais abaixo na coluna, processo que é considerado como adensamento por peso-próprio.

A teoria clássica de adensamento proposta por Terzaghi *apud* Pereira (2017) não é indicada para se estudar a disposição de rejeitos finos. A teoria usada para explicar este fenômeno foi desenvolvida por Mikasa (1963) e Gibson (1967) *apud* Pereira (2017) e é chamada de teoria

do adensamento com deformações finitas. Nesta teoria, a espessura da camada é dada como variável em relação a um tempo de deposição, devido a dissipação do excesso de poropressão da água, onde o solo fica sujeito a tensões efetivas (AHMED & SIDDIQUA, 2014).

Segundo Li *et al* (2012), o índice de vazios inicial durante o adensamento por peso-próprio é alto e as tensões efetivas são relativamente baixas e por isso o material sofre grandes deformações. O índice de vazios inicial é de suma importância para estudar o adensamento do material. Para definir as relações constitutivas do processo de adensamento por disposição dos rejeitos finos, é necessário realizar testes em laboratório com o material. O ensaio de adensamento induzido por percolação (HCT) usa o adensamento induzido por forças de percolação para definir essas relações. No ensaio o corpo de prova é submetido a forças de percolação e carregamento, provocando assim, o adensamento por percolação e carregamento (PEREIRA, 2017).

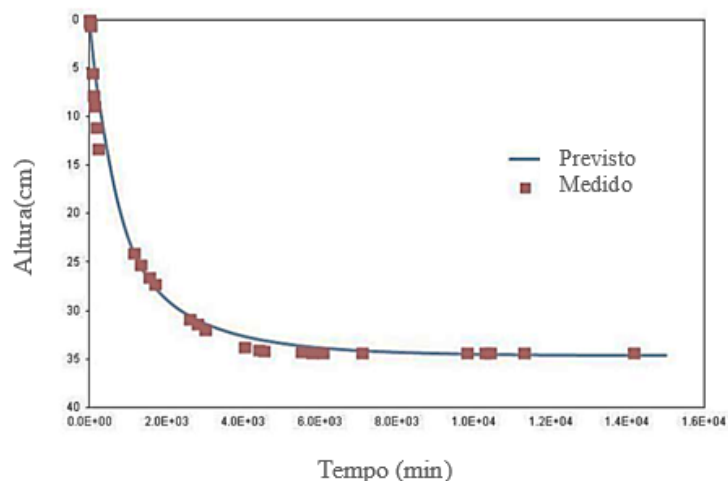


Figura 7. Curva de altura do corpo de prova em relação ao tempo de adensamento (Adaptado de LI *et al*, 2012).

A Figura 7 mostra o resultado de um ensaio de adensamento, onde é possível ver a curva da altura do corpo em função do tempo. É possível observar uma semelhança entre a curva de adensamento e a de sedimentação. Por isso é preciso ter claro se o que está se observando num experimento é devido a um fenômeno ou a outro. O índice de vazios da tensão efetiva nula (e_{00}) é sugerido por vários pesquisadores como marcando esse limite. Assim, a pesquisa dos índices de vazios limite na sedimentação de polpas a diferentes concentrações (e_{00} vs e_{polpa}) permite estabelecer essa divisão de estudos, sedimentação/adensamento.

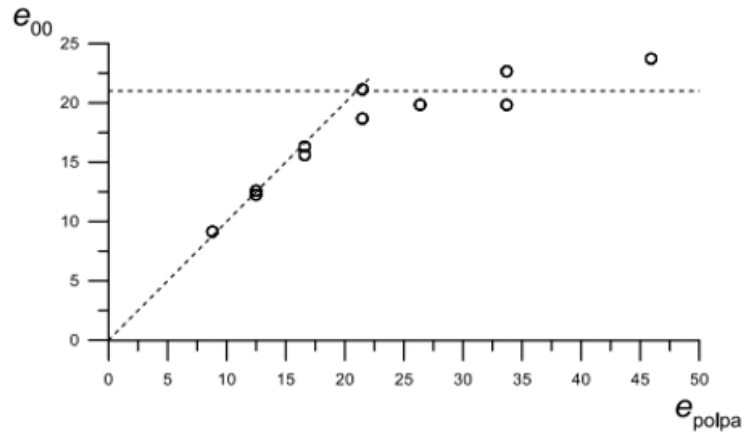


Figura 8. Curva de típica de índice de vazios (Adaptado de MENEZES,2012).

A figura 8 ilustra uma curva típica de índice de vazios a tensão efetiva nula relacionado ao índice de vazios de polpas com diferentes concentrações, obtido em testes de sedimentação dessas polpas (MENEZES, 2010).

2.7. Reologia

A reologia é a ciência que estuda a deformação e escoamento de materiais. Para se caracterizar polpas de minério, geralmente precisam ser definidas a viscosidade (η) e a tensão de escoamento (τ_0) desses materiais. A viscosidade é a característica que determina a resistência do fluido à deformação, e pode ser definida pela razão entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) (POSSA e NASCIMENTO, 2010).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1.2)$$

A viscosidade foi um conceito introduzido por Newton, ao realizar experimentos sobre o fluxo de um fluido entre duas placas paralelas, uma fixa e a outra em movimento (RIBEIRO, 2015).

2.7.1 Classificação reológica

De acordo com suas propriedades reológicas, os fluidos hoje são classificados em Newtonianos e não-newtonianos. Os fluidos Newtonianos são aqueles que mantêm a viscosidade constante, independente da taxa de cisalhamento ou tensão aplicada. A relação entre esses dois parâmetros se mantém linear (BOGER et al., 2006). Os fluidos não-newtonianos são aqueles que possuem uma tensão limite de cisalhamento (τ_0) que deve ser excedida para que o fluido comece a escoar. Eles podem ser classificados como fluido plástico

de Bingham, pseudoplásticos e dilatantes. A figura abaixo exemplifica o comportamento desses fluidos:

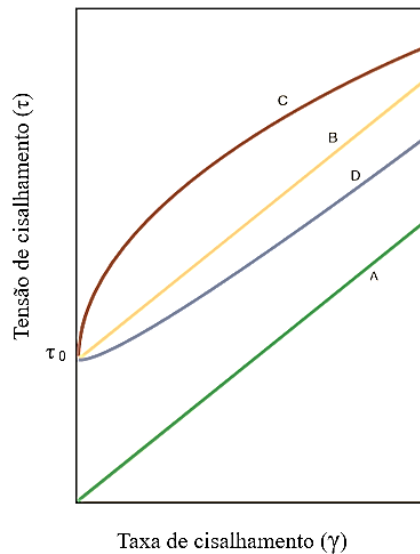


Figura 9. Curvas de Fluxo. A) Fluido Newtoniano B) Fluido de Bingham ($\dot{\gamma}$) C) Fluido Pseudoplástico D) Fluido Dilatante. (Adaptado de BOGER et al., 2006)

Os fluidos de Bingham, após terem excedido a tensão limite de escoamento passam a se comportar com uma viscosidade constante. Já os fluidos pseudoplásticos e dilatantes apresentam uma variação em sua viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Enquanto os materiais com comportamento pseudoplástico apresentam uma diminuição na viscosidade com o aumento da taxa, os materiais dilatantes apresentam um aumento de viscosidade (BOGER et al., 2006).

Rejeitos apresentam um comportamento pseudoplástico devido à natureza das partículas em se alinhar na direção do cisalhamento quando há um aumento da taxa de cisalhamento. Isso significa que o material terá uma diminuição na sua viscosidade, ou seja, irá apresentar baixa resistência para fluir. A tensão limite de cisalhamento para rejeitos de minérios tipicamente varia entre 30 e 100 Pa (BOGER et al., 2006).

Existem diversos modelos matemáticos que descrevem o comportamento reológico dos materiais (RIBEIRO, 2015). Dentre estes podemos destacar os principais, descritos na tabela abaixo.

Tabela 2. Modelos descritivos do comportamento reológico (NASCIMENTO, 2008 apud RIBEIRO, 2015)

TIPO DE FLUIDO	MODELO	EQUAÇÃO
Newtoniano	Newton	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Pseudoplástico	Lei das potências	$\tau = k_p \dot{\gamma}^{n_p}$
Dilatante	Lei das potências	$\tau = k_p \dot{\gamma}^{n_p}$
Bingham	Bingham	$\tau = \tau_o + \eta \dot{\gamma}$
Plástico	Herchel-Bulkley	$\tau = \tau_o + k_h \dot{\gamma}^{n_h}$

Onde n_p , n_h , são os índices de potência e k_p e k_h são as constantes para os respectivos modelos, $\dot{\gamma} = dv/dy$.

Os materiais podem ainda apresentar um comportamento dependente do tempo. Esses materiais tem a viscosidade dependente não só da taxa de cisalhamento, mas também do tempo em que esta taxa é imposta. Boger et al.(2006) explicam que esses materiais podem ser classificados como reopéticos, que são fluidos que tem um aumento na sua viscosidade dependente da taxa e tempo, enquanto os tixotrópicos apresentam uma diminuição na viscosidade com a taxa de cisalhamento e tempo. Os materiais com comportamento tixotrópicos são os mais comuns.

2.7.2. Ensaios reológicos

Para determinar as propriedades reológicas dos materiais são utilizadas técnicas de viscosimetria e reometria. A viscosimetria consiste nas determinação da resistência ao fluxo para um determinado parâmetro, enquanto a reometria é capaz de medir grandes taxas de cisalhamento, construindo reogramas característicos do material de estudo. Por meio de métodos rotacionais, o fluido é cisalhado com a variação da tensão ou da taxa de deformação (RIBEIRO, 2015). A partir dos resultados acompanhados por esse método é possível traçar as curvas de fluxo, onde é feito o estudo da variação da tensão de cisalhamento em função da taxa e obtido o valor limite da tensão cisalhante, além das curvas de viscosidade onde é possível observar o comportamento da viscosidade em relação a variação das taxas de deformações. É possível ainda estudar sobre o comportamento dependente do tempo com os perfis gerados pelo reogramas.

Os instrumentos utilizados para fazer a medições das propriedades são um geralmente um copo onde fica a amostra e o uso de uma geometria rotacional e/ou oscilatória. De acordo com Boger et al. (2006), a maioria dos dados sobre rejeitos são obtidos através do reômetro capilar ou uso do copo e geometria cilíndrica. No entanto, o uso da geometria vane é o mais indicado para se definir as propriedades reológicas de lamas minerárias.

2.7.3. Fatores que influenciam propriedades reológicas

A variação da concentração dos rejeitos tem impacto visível no valor da tensão limite de cisalhamento. Os materiais mais diluídos apresentam baixa tensão limite para começarem a se comportar como fluido (POSSA e NASCIMENTO, 2010). A distribuição granulométrica, tamanho das partículas, pH, entre outros, também exercem influência considerável sobre a variação nas propriedades reológicas de polpas. No entanto, o aumento na concentração se destaca podendo aumentar exponencialmente as tensões de cisalhamento limite dos materiais (BOGER et al., 2006). O aumento nas tensões limites impactam na energia gasta no sistema de bombeamento dessas soluções. A Figura 10 exemplifica como o aumento da concentração influencia no gasto de energia do sistema de bombeamento de polpas.

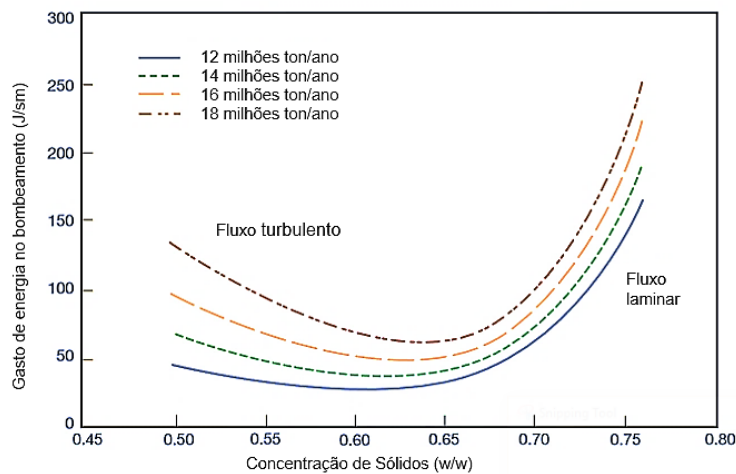


Figura 10. Predição de gasto de energia de um sistema de bombeamento em função da concentração da polpa (Adaptado de BOGER et al., 2006).

Em baixas concentrações, o fluxo turbulento rege o movimento das partículas dentro do sistema de bombeamento. A maioria das tubulações transportam seus materiais com esse tipo de fluxo. No entanto, com o aumento da concentração, temos uma mudança para o fluxo laminar, que apesar de ter a capacidade de levar a polpa com alta concentração a um gasto de energia relativamente igual a outro de concentração menor, pode apresentar problemas de entupimento da tubulação devido à rápida sedimentação do material (BOGER et al., 2006).

2.7.4 Aplicações da reologia na mineração

As propriedades reológicas são importantes parâmetros para se definir o comportamento das polpas, tanto em seu transporte quanto em sua estabilidade no sistema de deposição. A forma como esse material irá fluir e se espalhar no reservatório também é influenciada pela

viscosidade da polpa. Polpas em altas concentrações podem apresentar uma tensão de escoamento limite maior, ou seja, irão fluir menos pelo depósito (influenciado também pela geometria deste), mas podem apresentar maior estabilidade após sua disposição. Apresentam também uma maior resistência a fluir pelo sistema de bombeamento e pode ocasionar problemas de entupimento na tubulação. Enquanto isso, polpas de baixa concentração apresentam menor resistência para fluir, mas devido à sedimentação e ao adensamento do material após sua disposição, apresentarão um maior volume na lâmina d'água sobrenadante ao rejeito, que pode ocasionar em uma diminuição da estabilidade do reservatório, visto que a água é considerada um fluido newtoniano. Em caso de ruptura das barragens, polpas com altas tensões limites de cisalhamento escoam com velocidade mais baixa ao sair do reservatório, e têm, assim, menor mobilidade, representando menores riscos (RIBEIRO,2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Amostragem

A amostragem foi feita retirando-se material na praia de uma barragem de rejeitos pela equipe técnica da mineradora. Todas as amostras foram secadas em estufa antes de serem enviadas ao laboratório de Resíduos de Mineração do DEMIN/UFOP. A amostra total recebida foi quarteada em alíquotas de cerca de 3 kg cada no quarteador tipo carrossel, com teor de umidade médio de 18%.

3.2. Preparação da Amostra

Antes da execução de quaisquer dos ensaios descritos a seguir, as alíquotas das amostras foram reduzidas novamente por quarteamento até a quantidade mínima usada para cada ensaio, em um quarteador Jones, e secadas em estufa por no mínimo 12 h.

3.3. Porcentagem de sólidos

Para o estudo da sedimentação e viscosidade da polpa, a concentração inicial de sólidos foi variada em dois teores: 36% e 60%. O uso dessas concentrações é justificado pelo tipo de processo que o rejeito será submetido. O teor de 36% simula o teor de um material que é disposto logo após sair da usina de beneficiamento. Se o material passar por uma etapa de espessamento especial, seu teor de sólidos irá aumentar. Logo, simulou-se esse teor de sólidos como sendo uma lama de 60%.

3.4. Determinação da densidade real dos grãos (Gs)

Para determinar a densidade real dos grãos (Gs), foi utilizado o picnômetro a gás de Hélio marca Quantachrome modelo *ULTRAPYC 1200e* Versão 4.00, que se encontra no Laboratório de Propriedades Interfaciais no DEMIN/UFOP.

O equipamento operou com pressão alvo de 17,0 psig, tempo de purga de 4,0 minutos, tempo de equilíbrio automático, fazendo três corridas para a amostra ensaiada. Após a análise efetuada pelo equipamento, é fornecido três valores para a densidade da amostra. O valor com

a média dos resultados de densidade, também fornecido pelo relatório do Picnômetro a gás, foi o valor adotado para as análises desse trabalho.

3.5. Análise granulométrica

A análise granulométrica do material foi feita em duas partes para a amostra. Realizou-se primeiramente o peneiramento utilizando as peneiras de 270# e de 400#, em que a peneira de 270# foi usada para alívio de carga. O material passante na peneira de abertura de 400# foi secado em na estufa e encaminhado para análise granulométrica no granulômetro a laser, Cilas 1064, que se encontra no Laboratório de Propriedades Interfaciais no DEMIN/UFOP. O material a ser analisado no granulômetro a laser foi misturado ao agente dispersante hexametáfosfato de sódio, e usou-se o ultrassom por 1 minuto para desagregar as partículas.

O material retido em #400 foi removido com o auxílio de uma pisseta de água, recolhido em um tabuleiro. Depois esse material passou por outro peneiramento a úmido. Utilizou-se para tal as peneiras da série Tyler de abertura: 65#, 100#, 150#, 200#, 270#, 325# e 400#.

Os dados provenientes do granulômetro a laser nos fornecem duas informações: a frequência acumulada que passa e o diâmetro das partículas. Como o peneiramento gera a relação entre o tamanho das partículas pela massa e o granulômetro a laser pelo volume, deve-se fazer uma compatibilidade entre os dois métodos para que haja uma equivalência entre os diâmetros. Isso é feito obtendo um fator de correção dividindo o valor dos dois diâmetros extremos da faixa que sobrepõe a mesma porcentagem de volume passante (LIMA, 2012, apud MENEZES, 2013). Nos procedimentos realizados utilizaram-se duas correções. A primeira correção para compatibilidade que feita foi da relação de frequência acumulada. O granulômetro fornece a frequência acumulado como se a amostra representasse 100% do peneiramento. No entanto, ela representa 100% da massa passante na peneira de 400 mesh. Para que ela retorne o valor verdadeiro de frequência foi usada a fórmula a seguir:

$$Fr(x) = \frac{f(x) \times m}{100} \quad (2.1)$$

Onde,

Fr (x) = frequência acumulada que passa real, para dado tamanho x da partícula;

F (x) = frequência acumulada que passa do granulômetro, para dado tamanho x da partícula;

M= massa passante na peneira de #400.

A segunda correção foi feita dividindo o diâmetro da peneira de #400 com o diâmetro extremo equivalente a 100% da frequência acumulada passante, obtendo assim o fator de forma. Esse fator é então multiplicado pelos diâmetros resultantes da análise do granulômetro.

3.6. Índice de Plasticidade (IP)

A plasticidade do rejeito fino foi examinada por meio dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). O índice de plasticidade (IP) foi calculado subtraindo o limite de liquidez pelo limite de plasticidade, conforme a equação a seguir:

$$IP = LL - LP \quad (2.2)$$

O limite de liquidez foi realizado de acordo com a norma NBR 6459/84. Antes do ensaio, o aparelho de Casagrande foi inspecionado e calibrado de acordo com as especificações da norma. Após o teste terminar, as amostras foram pesadas, e colocadas na estufa para secar. Após o período de 12 h, elas foram retiradas da estufa e pesadas novamente para se obter o teor de umidade das amostras referente a cada número de golpes. Essas informações foram plotadas em gráfico (ver em Resultados), e a partir disso foi obtida uma reta de melhor ajuste, e identificado o teor de umidade referente a 25 golpes, que representa o limite de liquidez do solo.

O limite de plasticidade foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 7180/84. A amostra foi preparada com secagem prévia. Após o ensaio terminar, as amostras foram pesadas e colocadas na estufa para secar. Após o período de 12 h, elas foram retiradas da estufa e pesadas novamente para se obter o teor de umidade das amostras. Foi feita uma média, e as amostras que divergiam mais que 5% do valor dessa média foram descartadas. Foi feita uma nova média, até que se obteve um valor médio representativo. Essa umidade média é o Limite de Plasticidade.

3.7. Determinação do e_{00}

Para obter a curva e_{00} (índice de vazios correspondente a tensão efetiva nula da amostra sedimentada), prepararam-se quatro polpas com os teores de sólidos de 10%, 20%, 30% e 40%. Para cada teor de sólidos utilizou-se 50g de amostra seca e destorroada, que depois de

homogeneizadas com água deaerada foram reservadas em pequenos potes, seguindo-se da coleta de material superficial sedimentado nos potes para posterior determinação do teor de sólidos à tensão efetiva nula. A partir da densidade das partículas sólidas foram então calculados os índices de vazios das polpas (e_{polpa}) e do material superficial sedimentado (e_{00}).

3.8. Sedimentação em colunas

O estudo da sedimentação foi feito com o material em diferentes concentrações. Por meio deste ensaio, foi possível obter o índice de vazios inicial e velocidade de sedimentação para as concentrações feitas.

O ensaio foi realizado em provetas de 1 litro graduadas, nas quais eram feitas medições de altura da coluna de polpa em relação ao tempo. O ensaio foi realizado num tempo de no mínimo 12 h.

A polpa foi obtida ao misturar o solo seco com água. As quantidades de cada material foram calculadas para obter 1 litro de polpa a dada concentração. A mistura foi então vertida na proveta, e a boca desta foi tampada para começar um movimento de rotação, semelhante a operação realizada para estudo de análise granulométrica por meio de sedimentação. Esse movimento foi realizado pelo menos 10 vezes para cada concentração. Assim que o movimento acaba e a proveta é colocada na bancada, dá-se início ao teste.

Foram realizados 2 tipos de preparação para as amostras desse ensaio, método A e B, descritos abaixo:

- Método A: O material seco foi cominuído com o auxílio de almofariz, e depois colocado no copo do aparelho de dispersão. A quantidade de água pré-determinada foi vertida no mesmo copo, após um tempo de espera de cerca de 1 minuto, a mistura foi dispersada pelo aparelho por no mínimo 5 minutos ou até a polpa apresentar uma textura homogênea.

- Método B: O solo seco foi cominuído com o auxílio de uma almofariz, e misturado a quantidade de água pré-determinada. A polpa era então misturada manualmente com o auxílio de uma espátula.

A concentração de 60% foi preparada do primeiro modo, enquanto que as polpas de 36% foram preparadas dos dois modos.

Para calcular o índice de vazios e_m e e_f foi usado as seguintes equações:

$$H_s = \frac{M_s}{G_s A}, e = \frac{H_s}{H} - 1 \quad (2.3)$$

Onde,

M_s = massa seca (g)

G_s = densidade do material (g/cm³)

A = área da amostra (cm²)

H_s = altura de sólidos (cm)

Também foi calculado o total de volume de água liberado pelas polpas. Na polpa 36% usamos as seguintes equações:

$$V_w = H_w A \quad (2.4)$$

Onde,

V_w = volume de água (cm³)

H_w = altura da coluna de água (cm)

Porém na polpa de 60% adicionamos a quantidade de água recuperada a partir da polpa de 36%:

$$V_{wr} = V_{w36\%} - V_{w60\%} \quad (2.5)$$

Onde,

V_{wr} = volume de água recuperada (cm³)

$V_{w36\%}$ = volume de água contida na polpa de 36% (cm³)

$V_{w60\%}$ = volume de água contida na polpa de 60% (cm³)

3.9. Viscosidade da polpa

A viscosidade da polpa foi determinada por uma reômetro da Antoon-Parr, modelo MRC 90, usando os instrumentos copo e geometria vane. Foi usado o teste de Curva de Fluxo para a determinação da variação da tensão de cisalhamento e viscosidade em função da variação da taxa de cisalhamento aplicada na polpa.

A preparação das amostras seguiu os mesmos procedimentos realizados para o teste de sedimentação, sendo que ambas concentrações tiveram suas preparações feitas pelos métodos A e B.

4. RESULTADOS

4.1. Densidade dos grãos

A densidade real dos grãos obtida pelo ensaio do Picnômetro a gás foi de $3,8744 \text{ g/cm}^3$.

4.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi feita em duas etapas, por meio do peneiramento a úmido e utilizando o granulômetro a laser Cilas 1064, de acordo com os procedimentos citados anteriormente. Os gráficos da análise granulométrica obtidos para as amostras original e sua réplica foram plotados na Figura 11, usando o diâmetro da peneira equivalente.

Segundo pode-se observar, a amostra pode ser classificada como um material silto-argiloso.

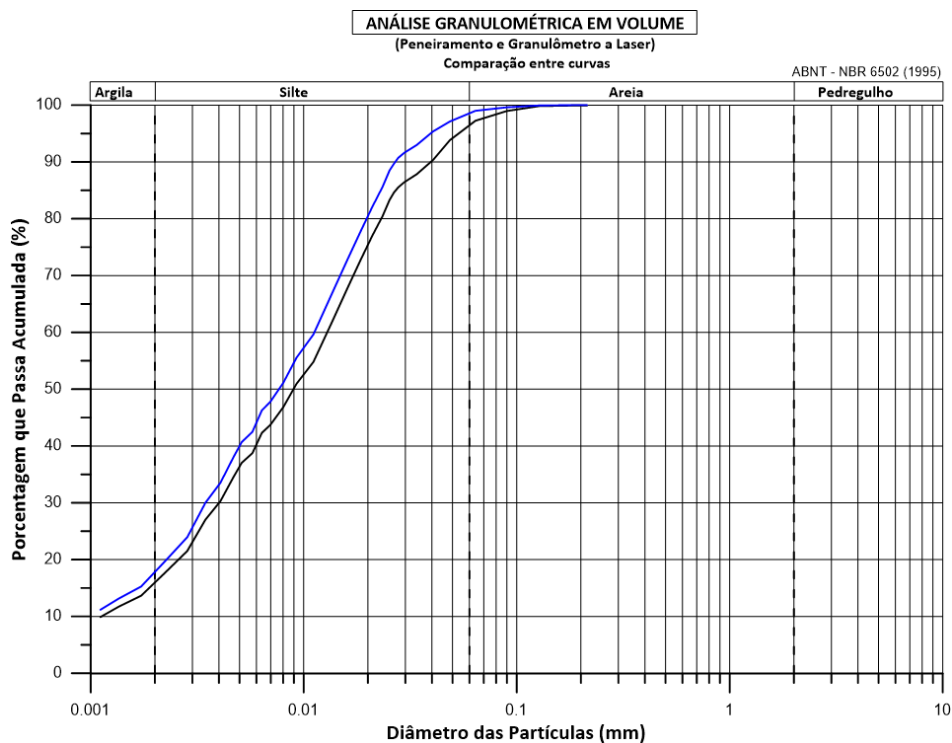


Figura 11. Distribuição granulométrica do material.

4.3. Índice de Plasticidade

O limite de Plasticidade obtido foi de 15% a partir de 3 ensaios para cada amostra. O resultado escolhido foi um valor médio dos que foram obtidos. Os resultados do ensaio de

limite de liquidez estão apresentados na Figura 12 e mostram que o teor de umidade referente a 25 golpes é de 18%.

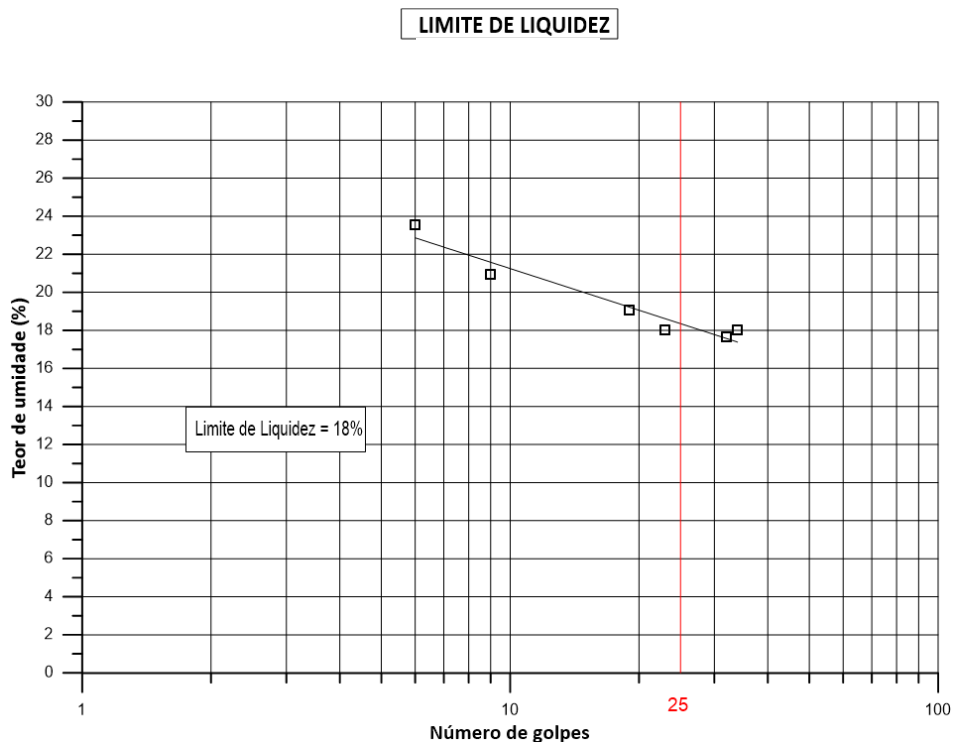


Figura 12. Limite de Liquidez

Segundo os valores obtidos para o LL e LP, temos que o valor de Índice de Plasticidade para a amostra foi de 3%. O Índice de Plasticidade determina a plasticidade de um solo. Segundo Jenkins, os solos são classificados em (JENKINS *apud* CAPUTO, 1988):

- Fracamente plásticos..... $1 < IP < 7$
- Medianamente plásticos..... $7 < IP < 15$
- Altamente plásticos..... $IP > 15$

Portanto, segundo esta classificação apresentada, as amostras do material em estudo são fracamente plásticas.

4.4. Determinação do e_{00}

A curva, mostrada na Figura 13, determina o índice de vazios correspondente a tensão efetiva nula da amostra sedimentada.

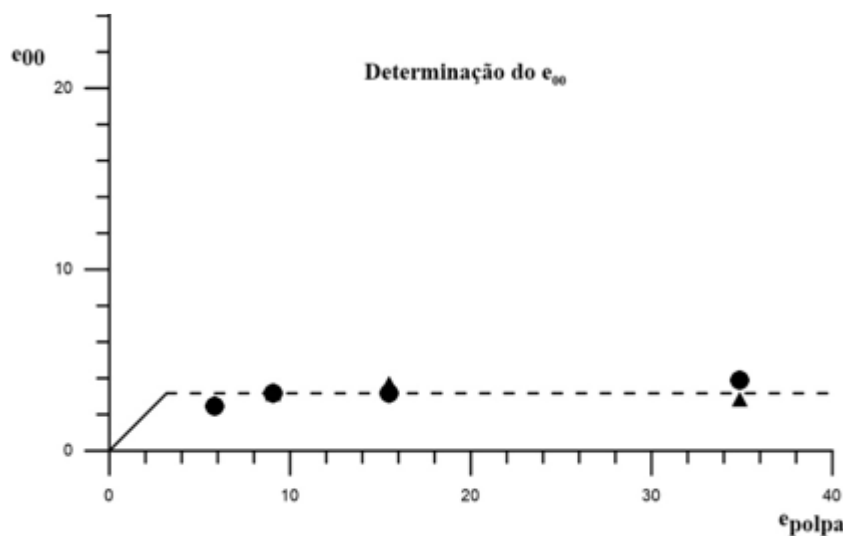


Figura 13. Curva do e_{00} vs. e_{0polpa}

Segundo esses resultados temos que o índice de vazios correspondente a tensão efetiva nula é igual a 3,17. Esse índice corresponde a uma concentração de 59% de teor de sólidos. Polpas com concentrações menores que 59% irão se comportar igual a polpas deste teor após ter sua fase de sedimentação finalizada e a coluna de água sobrenadante retirada. Polpas com concentrações maiores não terão uma fase de sedimentação propriamente dita, e sim uma fase de transição, onde há somente adensamento. É preciso destacar que a tendência da reta contínua correspondente a tensão efetiva nula é ser uma curva de baixa inflexão (como visto na Figura 8), chegando a admitir valores de e_{00} de 3,8 em média.

4.5. Sedimentação

4.5.1 Ensaio com amostras preparadas pelo método B

Os resultados dos ensaios de sedimentação em coluna estão disponíveis na Figura 14 em termos da altura *versus* tempo. Para interpretação dos ensaios foi traçada a reta que descreve a velocidade da sedimentação no trecho inicial da curva e que passa tangenciando a curva de sedimentação do material. O processo que marca a queda na taxa da velocidade de sedimentação foi admitido nesse estudo a partir do ponto em que a curva se distancia da reta que descreve a velocidade.

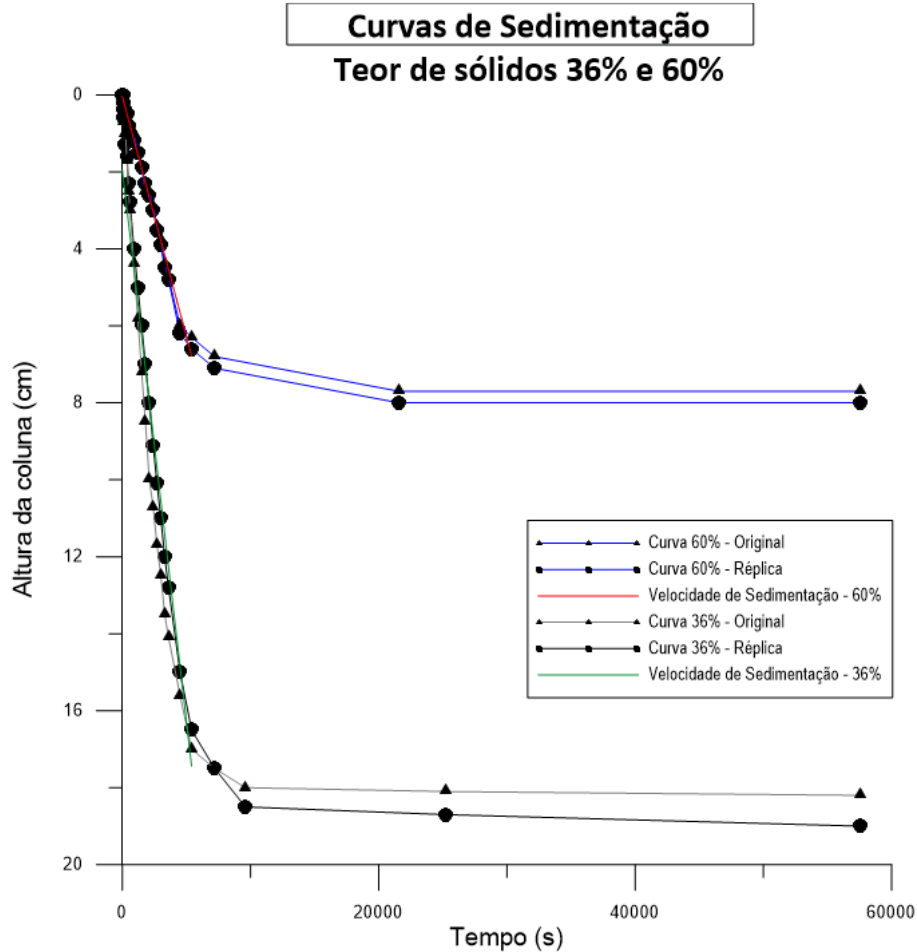


Figura 14. Curvas de sedimentação dos rejeitos com teor de sólidos de 36% e 60%.

A escala de altura plotada foi feita crescente para garantir que as amostras estejam no mesmo ponto inicial. Para realizar os cálculos dos índices de vazios, usou-se a altura observada na proveta.

As duas curvas mostram resultados bem distintos, com a concentração de 60% parecendo atingir o processo de adensamento logo nos primeiros momentos, apesar de que somente pela teoria da sedimentação, este fato não ser totalmente compreensível. A seguir passa-se a determinação dos pontos notáveis que definem as fases de sedimentação presentes nos ensaios. Esses pontos irão ser definidos inicialmente apenas pelo comportamento da curva de sedimentação.

A altura h_1 , correspondente a altura em que há a primeira queda na velocidade de sedimentação, e a altura h_2 , quando a curva começa a ser uma reta, caracterizando o início da fase de adensamento. Estimando essas alturas, pode-se calcular respectivamente o índice de vazios e_s e e_m . Observando ainda o comportamento da polpa ao longo do tempo pode-se

determinar a altura final h_f , que corresponde à altura da amostra após o fim do seu adensamento. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos.

Tabela 3. Parâmetros obtidos pela curva de sedimentação - Comparação entre as concentrações

Ensaio	Teor de sólidos	Velocidade (cm/s)	h_0	e_0	h_1	e_s	h_2	e_m	h_f	e_f
1	60%	1,24E-03	31	2,68	25,7	2,052	23,4	1,778	23,3	1,76
2	60%	1,24E-03	31,2	2,59	25,9	1,981	23,2	1,671	22,2	1,55
3	36%	2,86E-03	31	7,10	16	3,182	13	2,398	12,8	2,34
4	36%	2,86E-03	31	6,85	16,2	3,105	12,5	2,167	12	2,04

Os gráficos das Figuras 15 e 16 indicam os limites e_s e e_m nas curvas de sedimentação de teores de 60% e 36 %, respectivamente. Foi admitido que os limites seriam valores médios dos valores da tabela de acordo com a concentração da mistura.

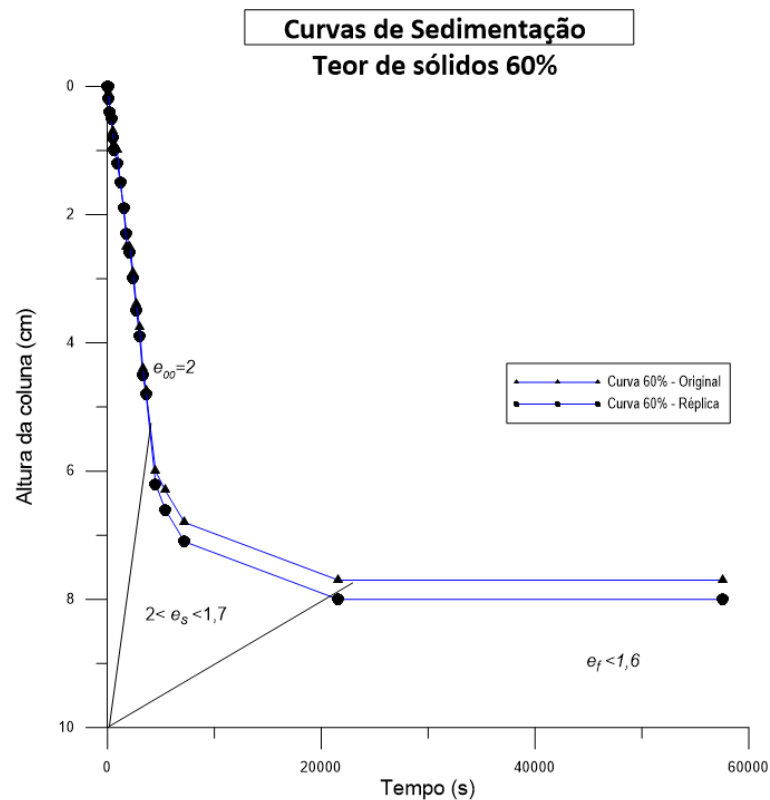


Figura 15. Limites dos índices de vazios definidos para a polpa de 60%

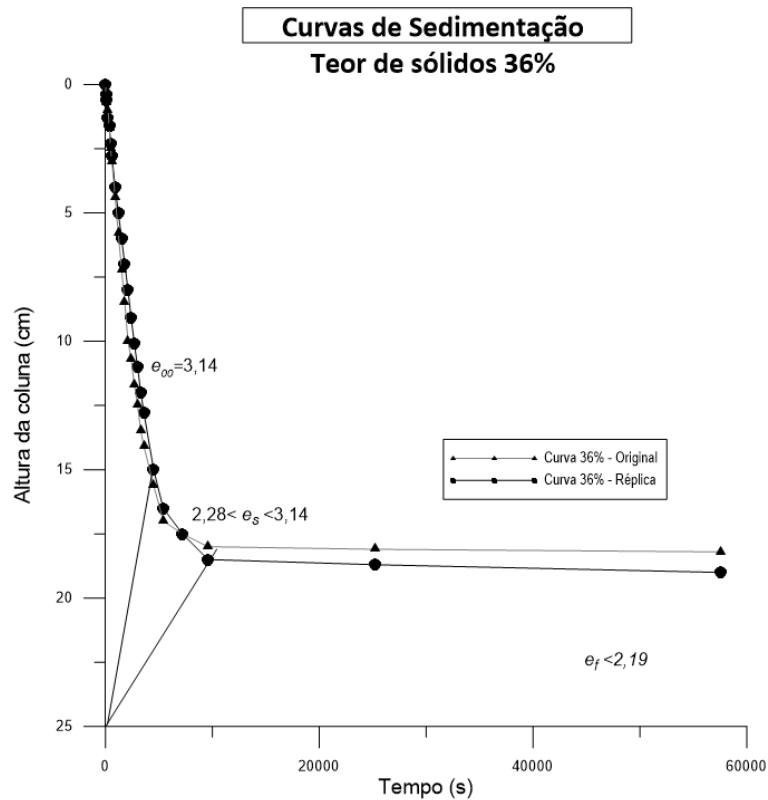


Figura 16. Limites dos índices de vazios definidos para a polpa de 36%

O índice de vazios correspondente a h_1 para a amostra de 36% resultou em um valor aproximado de 3.17, correspondente a e_s , sendo o valor limite obtido na curva e_{00} vs e_{polpa} . No entanto, o índice de vazios correspondente ao valor de h_1 para a polpa de 60% resultou em um valor muito abaixo do valor limite de tensão efetiva nula. Devido a essa divergência de valores, é assumido que a análise da sedimentação do material de 60% não pode ser explicada pela observação da inflexão da curva. Uma nova análise foi feita, considerando que esta curva (Figura 15) na verdade é uma curva de adensamento, onde, portanto, podemos definir a fase de transição (onde há adensamento e sedimentação concomitantes), e adensamento. A figura 17 mostra os novos limites de índices de vazios traçados.

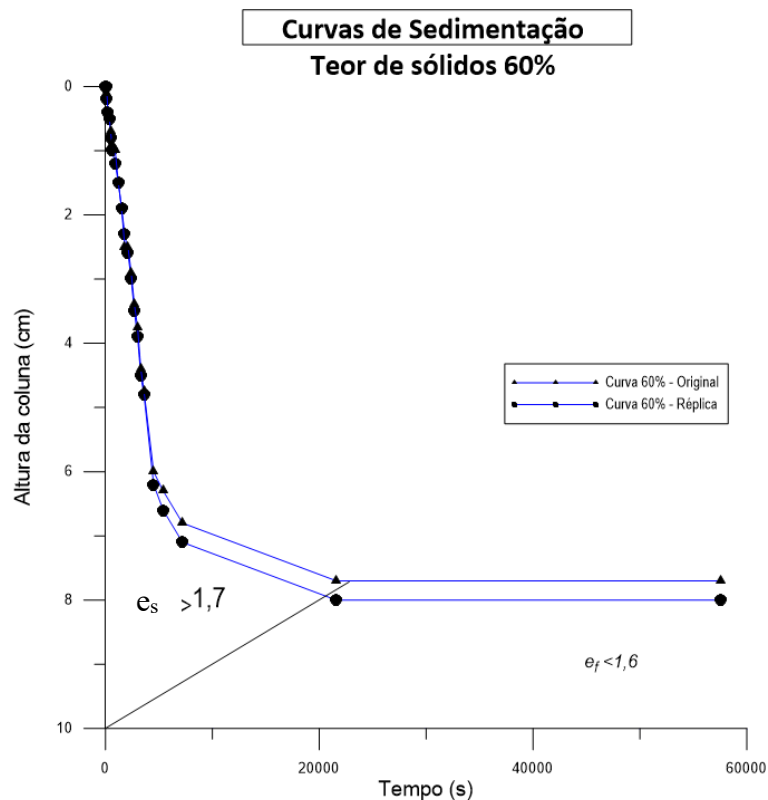


Figura 16. Novos limites dos índices de vazios definidos para a polpa de 60%.

O índice de vazios final da amostra de 36% não foi próximo ao resultado de 60%, pois o adensamento médio final da camada é dependente da altura de sólidos. Como a amostra de teor 60% tem mais material sólido consequentemente resulta em maior altura final da coluna, mas menor índice de vazios médio final.

Além disso, foi feito o cálculo de volume de água recuperada da polpa pelos processos de sedimentação e adensamento. Os resultados podem ser vistos na tabela abaixo.

Tabela 4. Volume total de água recuperado da polpa

Ensaio	Teor de sólidos	Água recuperada (cm ³)	Água recuperada (%)
1	60%	407,80	47%
2	60%	450,92	52%
3	36%	603,63	69%
4	36%	610,92	70%

A recuperação de água da polpa de 36% foi de 20% a mais que a recuperação de água da polpa espessada, considerando ainda o volume retirado da polpa de 36% pelo processo de espessamento, ou seja, o volume inicial de água foi considerado de 873,09 cm³ para todas as

amostras. Essa recuperação foi limitada pela escala de tempo de 12 h em que a sedimentação em proveta foi realizada. Provavelmente se a coluna de água da polpa de 36% tivesse sido removida, após mais de 24h de sedimentação, esse volume de água recuperável teria sido ainda maior.

Foi observado durante os testes a formação de flocos no fundo da proveta, a formação de canais ao longo da altura do corpo de sólido formado e mini-vulcões nas superfícies do material. Essas estruturas podem ser observadas nas imagens apresentadas na figura 18.

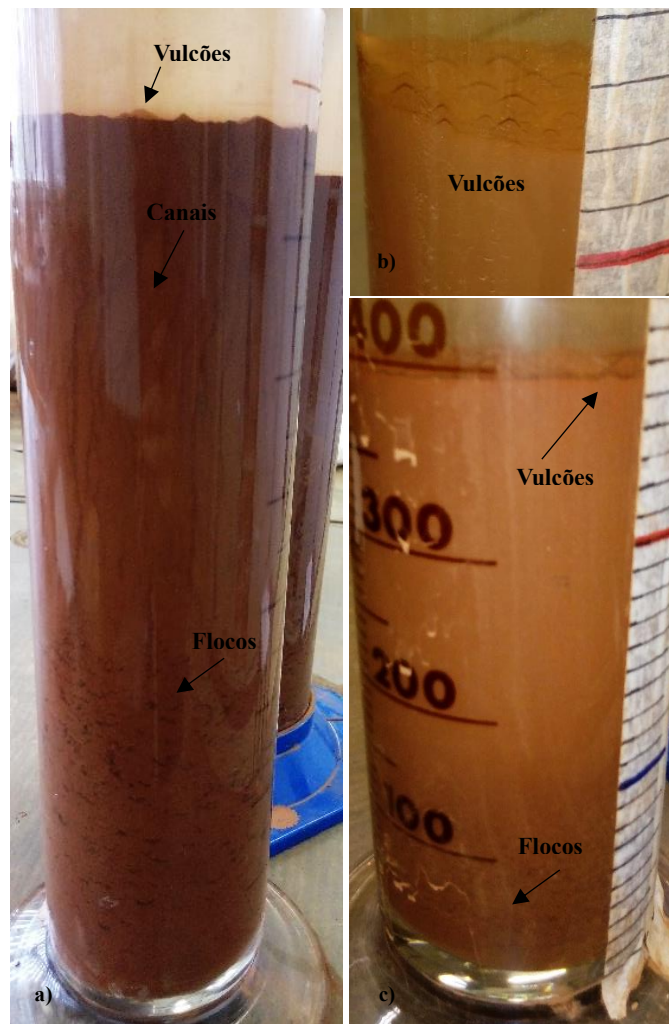


Figura 17. Provetas usadas no teste de sedimentação. a) Presença de mini-vulcões, canais e flocos na polpa de 60%. b) Presença de mini-vulcões na polpa de 36%. c) Presença de vulcões e flocos na polpa de 36%.

A presença dos flocos, canais e mini-vulcões é mais acentuada na polpa espessada, devido ao aumento do teor de sólidos do material. A polpa de 36% apresentou a formação de canais finos, não perceptíveis pelas fotos.

4.5.2 Ensaio com polpa de 36% pelo método A

Como forma de investigar a formação dos flocos no fundo da proveta, foi realizado outro ensaio com a concentração de 36%, desta vez preparada pelo método A, ou seja, submetendo a amostra ao processo de dispersão mecânica, para que a mistura ficasse mais homogênea. Os resultados das curvas e interpretação de fase podem ser vistos nas Figuras 19 e 20, e Tabela 5.

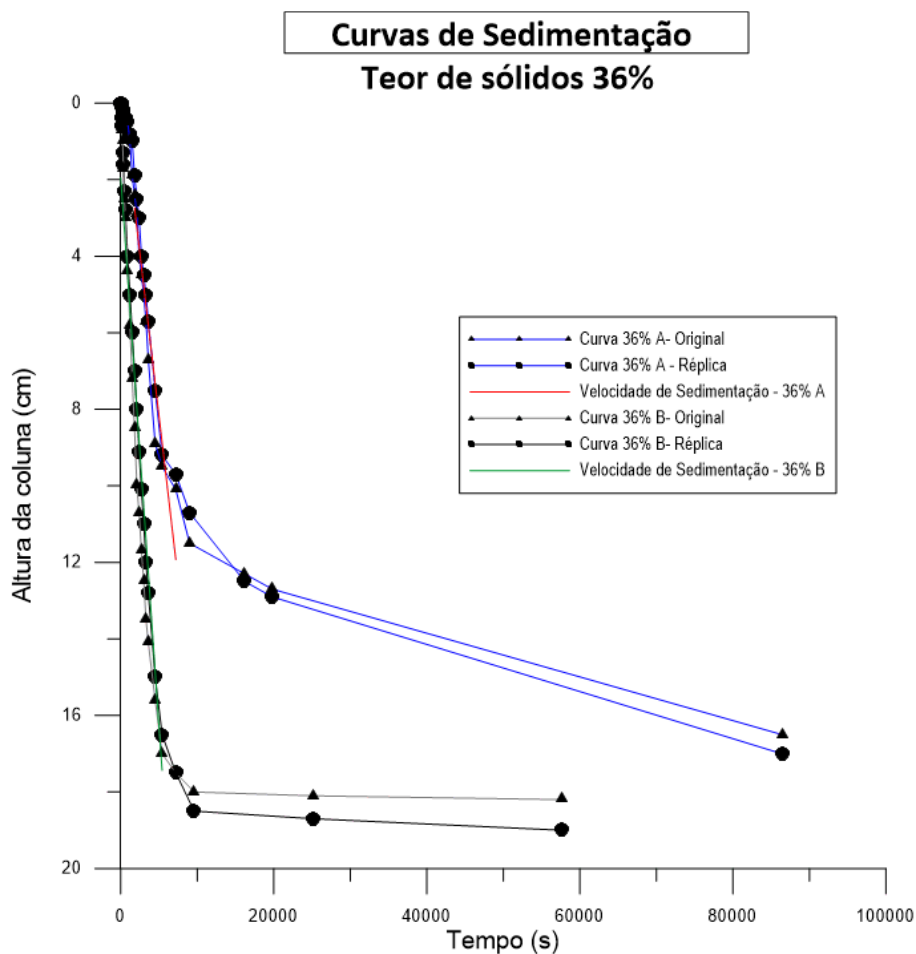


Figura 18. Teste de sedimentação das polpas de 36% preparadas pelo método A e B.

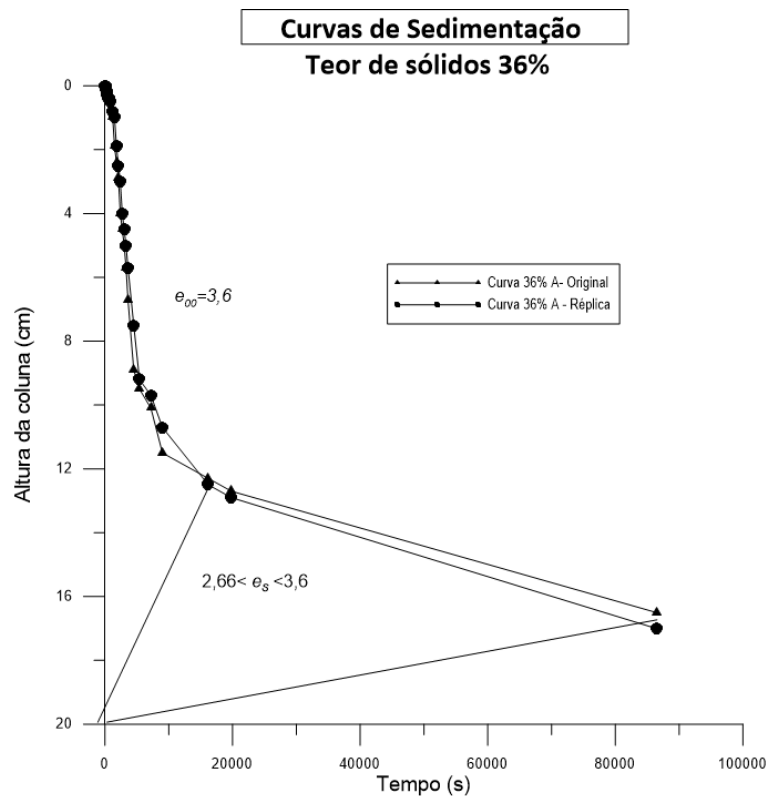


Figura 19. Limites do índice de vazios da polpa de 36% preparada pelo método A.

Tabela 5. Parâmetros observados no testes de sedimentação das polpas de 36% preparadas pelo método A (ensaios 5 e 6) e método B (ensaios 3 e 4).

Ensaio	Teor de sólidos	Velocidade (cm/s)	h_0	e_0	h_1	e_s	h_2	e_m	h_f	e_f
3	36%	2,86E-03	31	7,10	16	3,182	13	2,398	12,8	2,34
4	36%	2,86E-03	31	6,85	16,2	3,105	12,5	2,167	12	2,04
5	36%	1,70E-03	30,5	6,97	18	3,704	14	2,659	-	-
6	36%	1,70E-03	30,5	6,73	18,2	3,611	13,5	2,674	-	-

A curva de sedimentação mostra que houve uma significativa mudança na velocidade de sedimentação do rejeito. Provavelmente é devido ao fato da polpa preparada sem o aparelho dispersor ter partículas maiores e mais pesadas, já que só a mistura manual não consegue desagregar todos os grãos formados durante a secagem do material. O e_s da amostra foi admitido ser mais alto. A análise da curva de sedimentação foi feita analisando o índice de vazios limite de tensão efetiva nula. Também foi possível constatar que a polpa preparada

pelo método A não apresenta a formação de canais, pelo menos não a olho nu, e as crateras formadas em cima do material são menores (Figura 21).



Figura 20. Teste de sedimentação da polpa de 36% preparada pelo método A, sem a presença de flocos.

Devido ao tempo inadequado dos intervalos de observação, não foi possível registrar o começo da fase de adensamento do rejeito preparado pelo método A, como se pode notar pela curva de sedimentação. Pelo mesmo motivo não foi feito (neste caso, tempo insuficiente) os cálculos de volume de água liberado pelo material, pois ainda haveria adensamento a ocorrer.

4.6. Viscosidade da polpa

Os ensaios de viscosidade e tensão de cisalhamento limite foram executados sobre amostras preparadas pelos métodos A e B indicados no estudo de sedimentação em colunas e seus resultados podem ser vistos nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

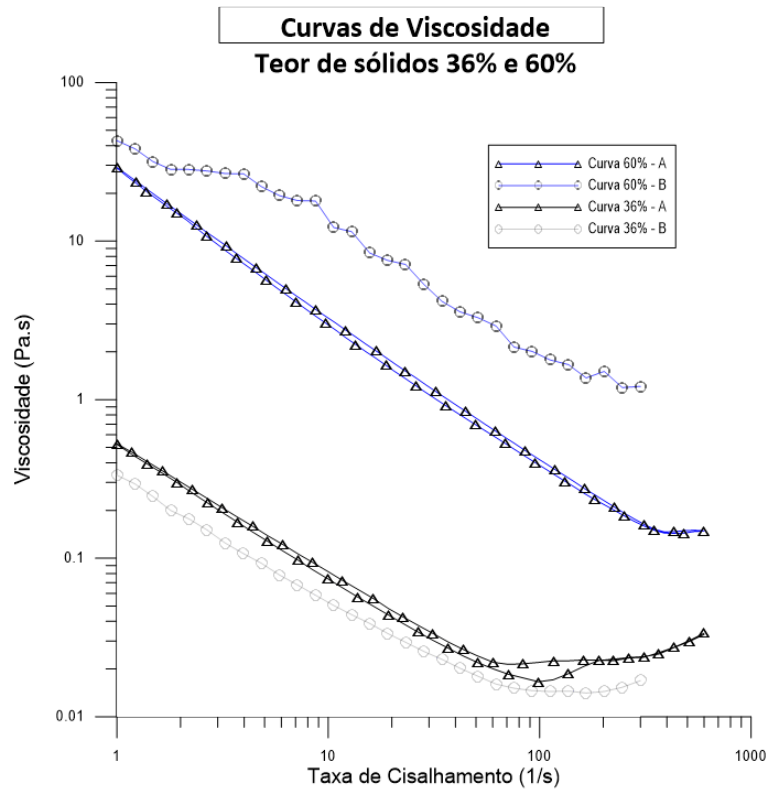


Figura 21. Curvas de Viscosidade.

As curvas dos materiais preparados pelo método B não são uniformes e se deve ao fato que na preparação das amostras, alguns grânulos do material que ficou agregado após sua secagem não se desagregaram na presença da água. Esse fato pode influenciar a velocidade de sedimentação da amostra. Além disso nas amostras preparadas pelo método B a taxa de cisalhamento foi variada de 1/s a 300/s, sem fase de pré-agitação da amostra.

Nas amostras preparadas pelo método A, as amostras tiveram uma etapa de pré-agitação no aparelho para evitar a sedimentação da amostra dentro do copo. A taxa imposta variou primeiro de 600/s a 1/s, e em seguida, foi imposta a taxa variando de 1/s a 600/s. Essa variação foi feita desta maneira para garantir que a taxa usada na pré-agitação não influencie na determinação da viscosidade em baixas taxas de cisalhamento.

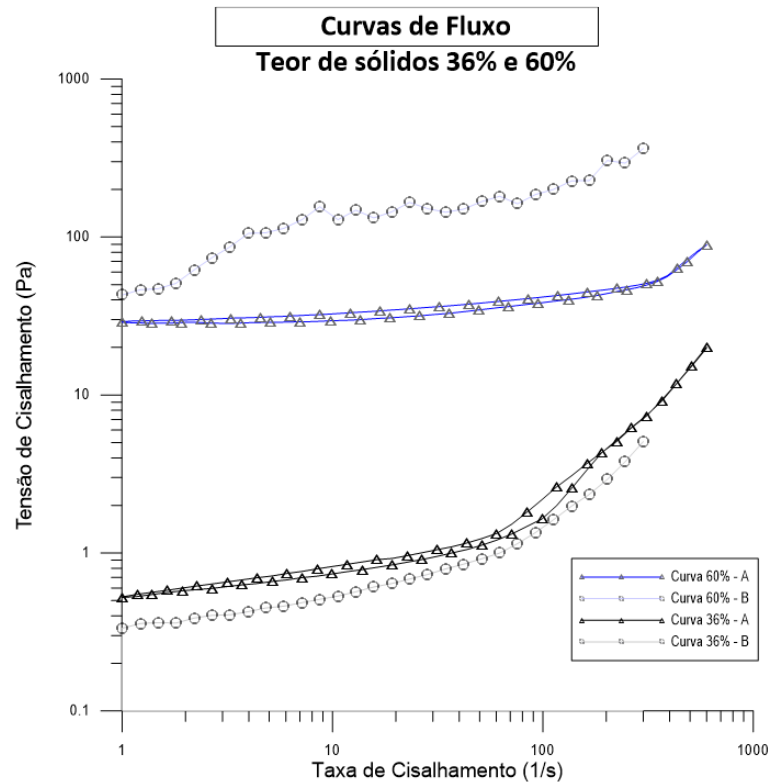


Figura 22 .Curvas de Fluxo.

As curvas obtidas (Figura 22) demonstram um comportamento pseudoplástico da amostra, onde há um decréscimo da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Além disso, a concentração da amostra aumenta significativamente a viscosidade do material (10 vezes). Por análise da equação de Bingham, que, segundo Boger et al. (2006), é a equação mais indicada para esses tipos de materiais, temos a tensão limite de escoamento (Tabela 6).

Tabela 6. Tensão limite de escoamento das polpas e viscosidade referente ao limite de escoamento.

Teor de sólidos (%)	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade(mPa.s)
36%	0,6672	10,647
60%	30,455	106,44

Conforme já foi discutido, a tensão limite de escoamento é um importante parâmetro para definir o sistema de bombeamento do rejeito até seu ponto de disposição. As polpas de alta concentração terão uma tensão limite muito maior que as polpas mais diluídas, o que pode ocasionar num encarecimento do sistema de bombeamento desses materiais. É preciso considerar, ainda, o gasto de energia e manutenção do sistema de espessamento da polpa, que deverá ser espessado, para alcançar o teor de 60% de sólidos. No entanto, ao serem dispostas

podem ser consideradas estáveis, pois em caso de ruptura do reservatório essas polpas não irão adquirir significativa velocidade de escoamento.

As polpas foram preparadas para os teste de sedimentação e propriedades reológicas de duas formas diferentes e apresentaram resultados diversos. Isso levanta um debate quanto ao modo com que as amostras chegam aos laboratórios para a determinação de suas características. Materiais muito finos, como os rejeitos, ao serem secos em estufa, se agregam e se transformam em grãos resistentes e de difícil desagregação. No entanto, a desagregação feita no laboratório por meio de aparelhos de dispersão para produzir uma polpa homogênea, pode não ser fiel às características reais do rejeito.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho se dispôs a avaliar o comportamento de rejeitos de minério de ferro em um sistema de disposição subaérea simulado através de testes de sedimentação em proveta, com concentrações que representam um rejeito *in natura* e um rejeito espessado.

Foi feita a caracterização geotécnica básica da amostra seca de rejeito, onde se observou que esta apresenta uma granulometria de material fino silto-argiloso. A densidade real dos grãos foi de 3,87 g/cm³ e o rejeito apresentou uma baixa plasticidade, cerca de 3%, caracterizando-se como um material fracamente plástico.

As amostras passaram por testes de sedimentação e determinação das propriedades reológicas, na forma de polpas com concentração de 36% e 60% para determinar seu comportamento.

Polpas com teor de sólidos de 36% apresentaram maior velocidade de sedimentação, tiveram uma recuperação final de um volume maior de água, além de apresentarem uma opção barata em relação ao transporte do material por conta de suas propriedades reológicas mais favoráveis, porém instáveis em caso de ruptura de reservatório. Polpas feitas com o teor de sólidos de 60% apresentaram uma baixa velocidade no processo de sedimentação, e a partir da análise dos índices de vazios correspondentes a tensão efetiva nula, foi verificado que a curva do teste de sedimentação foi correspondente à curva de adensamento do material.

Os métodos de preparação das polpas para os testes de sedimentação e propriedades reológicas resultaram em amostras com comportamento diversos, devido ao grau de desagregação do material. Tendo isso em vista, é recomendado que, para a análise de rejeito, as amostras sejam entregues ao laboratório no estado em que foi colhido no campo. Desta forma, é possível reproduzir resultados mais confiáveis.

Com relação a influência do teor de sólidos na disposição de rejeitos, foi verificado que a concentração é de suma importância para se definir o método de disposição.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, **NBR. 6457**. Amostras de solo-Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas,1986.
- ABNT, **NBR. 6508**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas,1984.
- ABNT, **NBR. 7181**.Solo – Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas,1984.
- ABNT, **NBR. 7180**. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas,1984.
- ABNT, **NBR.6459**. Determinação do Limite de Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.
- AHMED,S.I.;SIDDIQUA,S.A review on consolidation behavior of tailings, **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 8 n.1,p. 102-111,2014.
- BOGER, D. V., SCALES, P. J., & SOFRA, F. Rheological concepts. In: JEWELL,R.J.; FOURIE,A.B., **Paste and Thickened Tailings-A Guide** . Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2006,p 25-37.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6 ed,1988. Rio de Janeiro. LTC.
- FIGUEIREDO, M. **Estudo de Metodologias Alternativas de Disposição de Rejeitos para a Mineração Casa de Pedra - Congonhas/MG**. 2007.100f.Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto,Ouro Preto.2007
- GOMES, M. F. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro**.2009.193f.Dissertação(Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto,Ouro Preto.2009.
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília, 2016.
- JESUS, C. A. G. **Ferro/Aço**. Economia mineral do Brasil-2009. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2009.
- JEERAVIPOOLVARN, S., CHALATURNYK, R. J., & SCOTT, J. D. Sedimentation–consolidation modeling with an interaction coefficient. **Computers and Geotechnics**. v.36, n.5, p. 751-761,2009.
- LI, A.L et al. Tailings initial consolidation and evaporative drying after deposition.2012

LIMA, L. D. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo.**2006.125 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.2006

LUZ, A. B.;LINS,F.A.F. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ,A.B.;SAMPAIO,J.A.; FRANÇA,S.C.A. **Tratamento de minérios** . Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2010,5 ed., p. 1-20.

MASSARANI, G.; FRANÇA, S.C.A. Separação Sólido Líquido. In: LUZ,A.B.;SAMPAIO,J.A.; FRANÇA,S.C.A. **Tratamento de minérios** . Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2010,5 ed., p. 637-682.

MCROBERTS, E. C.; NIXON, J. F. A theory of soil sedimentation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 13, n. 3, p. 294-310, 1976.

MENEZES, L. P. **Levantamento das Características Reológicas de Resíduos de Minérios para Fins de sua Destinação Final em Depósitos.**2010. 56 f. Monografia (Graduação). Departamento de Engenharia Ambiental. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto,Ouro Preto, 2010.

MENEZES, L. P. **Determinação da curva de retenção de água em solos utilizando bomba de fluxo.**2013. 72 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.2013

NAM, S., GUTIERREZ, M., & DIPLAS, P. Channeling during settling and self-weight consolidation of cohesive sediments. **Canadian Geotechnical Journal** . v.45,n.6, p. 867-876, 2008. doi:10.1139/T08-031

OLIVEIRA-FILHO, W.L.; ABRÃO,P. Disposição de Rejeitos de Mineração. In: ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo. Ed. Campus, 2015.p.261-306.

OLIVEIRA FILHO, W. L., MENEZES, L.P. **Consolidation Relationships for Different Ore Tailings in Brazilian Mines**. 16th International Conference On Tailings And Mine Waste Keystone, Colorado, USA, 2012, p. 205-215.

OLIVEIRA-FILHO, W.L.;VAN ZYL, D. Modeling discharge of interstitial water from tailings following deposition - Part 2. **Solos e Rochas**. v.29, n.2, 2006, p. 211-221.

PANE, V. **Sedimentation and consolidation of clays.**1985.302 f.Tese(Doutorado).Department of Civil Engineering, University of Colorado,Boulder.1985

PEDROSA, G. J. **Modelação física da disposição de rejeitos de bauxita por meio de diques-testes**. 2012. 120f. Dissertação(Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto,Ouro Preto,2012.

PENNA, L.R. **Estudo da construção de aterros sobre depósitos estratificados de rejeitos de mineração**. 2008.182 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

PEREIRA, E. **Estudo das características de compressibilidade e adensamento de rejeitos de fosfato de baixa densidade com o uso de técnicas experimentais de laboratório e de campo**. 2017. 254 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

PINHO, M. Q.; OLIVEIRA-FILHO, W.L.; SÁ, S.O.M. Estimativa da Capacidade de uma Cava de Mineração por meio de Simulações Numéricas. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 2018, Salvador. **Anais...** Salvador: ABMS, 2018.

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

POSSA, M.; NASCIMENTO, C. R.. Reologia no Tratamento de Minérios. In: . LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. **Tratamento de minérios** . Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2010, 5 ed., p. 597-635.

PRESOTTI, E.S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 2002. 153f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

RIBEIRO, V. **Proposta de metodologia para avaliação do efeito de rupturas de estruturas de contenção de rejeitos**. 2015. 267f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

RODRIGUES, A. B. **Riscos da disposição de rejeitos de mineração e técnicas alternativas de disposição**. 2017. 39 f. Monografia (Graduação). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SILVA, D.R. **Estudos do processo de ressecamento de um rejeito fino de minério de ferro em uma área teste**. 2003. 141 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

SILVA, W. R. **Nova Metodologia para Determinação de Propriedades de Sedimentação e Adensamento de Rejeitos de Mineração**. 2008. 136f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SOARES, L. Barragem de Rejeito. In: . LUZ, A.B.; SAMPAIO,J.A.; FRANÇA,S.C.A.
Tratamento de minérios . Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2010,5 ed., p. 831-896.

7. APÊNDICE

Análise Granulométrica - PC 20 02							
	#	µm	Tamanho médio(µm)	Massa	Frequência(%)		
				Retida (g)	Simples	Acumulado >	Acumulado <
Peneiramento	65	210	213.70	0.00	0.00	0.00	100.00
	100	150	180	0.00	0.00	0.00	100.00
	150	105	127.5	0.14	0.06	0.06	99.94
	200	75	90	0.73	0.32	0.38	99.62
	270	53	64	1.41	0.62	1.00	99.00
	325	44	48.5	4.30	1.88	2.88	97.12
	400	37	40.5	3.99	1.75	4.63	95.37
Granulômetro		30.8	33.915	5.44	2.38	7.01	92.99
		28.4	29.60	3.18	1.39	8.41	91.59
		27.1	27.75	2.03	0.89	9.29	90.71
		25.9	26.52	2.35	1.03	10.32	89.68
		24.7	25.29	2.72	1.19	11.51	88.49
		22.2	23.44	6.56	2.87	14.38	85.62
		19.7	20.97	8.15	3.57	17.95	82.05
		17.3	18.50	9.71	4.25	22.21	77.79
		14.8	16.04	11.37	4.98	27.18	72.82
		12.3	13.57	13.63	5.97	33.15	66.85
		9.9	11.10	16.49	7.22	40.37	59.63
		8.6	9.25	9.34	4.09	44.47	55.53
		7.4	8.02	10.11	4.43	48.89	51.11
		6.5	6.97	7.60	3.33	52.22	47.78
		6.2	6.36	3.46	1.52	53.74	46.26
		5.3	5.74	8.67	3.80	57.53	42.47
		4.9	5.12	4.09	1.79	59.32	40.68
		4.4	4.69	5.95	2.60	61.93	38.07
		3.7	4.07	10.32	4.52	66.45	33.55
		3.2	3.46	8.08	3.54	69.99	30.01
	2.5	2.84	13.85	6.07	76.05	23.95	
	2.0	2.22	9.87	4.32	80.37	19.63	
	1.5	1.73	9.98	4.37	84.74	15.26	
	1.2	1.36	4.81	2.11	86.85	13.15	
	1.0	1.11	4.53	1.98	88.83	11.17	
	>1	1.48	25.50	11.17	100.00	0.00	
Total				228.37	100	100.00	0.00

Análise Granulométrica - PC 20 02 Réplica							
	#	µm	Tamanho médio(µm)	Massa	Frequência(%)		
				Retida (g)	Simples	Acumulado >	Acumulado <
Peneiramento	65	210	213.70	0.12	0.05	0.05	99.95
	100	150	180	0.07	0.03	0.08	99.92
	150	105	127.5	0.23	0.09	0.17	99.83
	200	75	90	2.18	0.86	1.03	98.97
	270	53	64	4.35	1.72	2.75	97.25
	325	44	48.5	8.63	3.42	6.17	93.83
	400	37	40.5	8.77	3.47	9.65	90.35
Granulômetro		30.8	33.915	6.34	2.51	12.16	87.84
		28.4	29.60	3.60	1.43	13.59	86.41
		27.1	27.75	2.28	0.90	14.49	85.51
		25.9	26.52	2.28	0.90	15.39	84.61
		24.7	25.29	3.33	1.32	16.71	83.29
		22.2	23.44	7.14	2.83	19.54	80.46
		19.7	20.97	8.83	3.50	23.04	76.96
		17.3	18.50	10.58	4.19	27.23	72.77
		14.8	16.04	12.57	4.98	32.21	67.79
		12.3	13.57	15.08	5.97	38.18	61.82
		9.9	11.10	17.74	7.03	45.21	54.79
		8.6	9.25	9.72	3.85	49.06	50.94
		7.4	8.02	10.38	4.11	53.17	46.83
		6.5	6.97	7.85	3.11	56.28	43.72
		6.2	6.36	3.58	1.42	57.70	42.30
		5.3	5.74	9.03	3.58	61.27	38.73
		4.9	5.12	4.29	1.70	62.97	37.03
		4.4	4.69	6.23	2.47	65.44	34.56
		3.7	4.07	10.72	4.25	69.69	30.31
		3.2	3.46	8.26	3.27	72.96	27.04
	2.5	2.84	13.94	5.52	78.48	21.52	
	2.0	2.22	9.90	3.92	82.40	17.60	
	1.5	1.73	9.99	3.96	86.36	13.64	
	1.2	1.36	4.84	1.92	88.27	11.73	
	1.0	1.11	4.63	1.83	90.11	9.89	
	>1	1.20	24.97	9.89	100.00	0.00	
Total				252.43	100	100.00	0.00

QUANTACHROME CORPORATION
Ultrapyc 1200e Version 4.00
Analysis Report

Mon Aug 21 14:34:15 2017
User ID: UFOP

Sample Parameters

Sample ID: PC20 21 Aluna Stéphanie Oliveira
Weight: 23.1093 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium
V Added - Large: 80.8468 cc
V Cell: 58.4203 cc
Analysis Temperature: 23.8 C
Target Pressure: 17.0 psig
Equilibration Time: Auto
Flow Purge: 4.0 min.
Maximum Runs: 3
Number Of Runs Averaged: 3
Deviation Requested: 0.0050 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.2204 %
Average Volume: 5.9647 cc
Volume Std. Dev.: 0.0150 cc
Average Density: 3.8744 g/cc
Density Std. Dev.: 0.0097 g/cc
Coefficient of Variation: 0.2509 %

----- Run Data -----		
RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	5.9844	3.8616
2	5.9615	3.8764
3	5.9482	3.8851

Sedimentação em coluna - 60% Método B				Sedimentação em coluna - 36% Método B				Sedimentação em coluna - 36% Método A			
Original - d=65mm		Réplica - d=64mm		Original - d=65mm		Réplica - d=64mm		Original - d=65mm		Réplica - d=64mm	
Tempo(s)	Altura (cm)	Tempo(s)	Altura (cm)	Tempo(s)	Altura (cm)	Tempo(s)	Altura (cm)	Tempo(s)	Altura (cm)	Tempo(s)	Altura (cm)
0	31.00	0	31.20	0	31.00	0	31.00	0	30.50	0	30.50
60	31.00	60	31.20	60	30.50	60	30.60	60	30.50	60	30.50
120	30.90	120	31.00	120	30.30	120	30.40	120	30.50	120	30.40
240	30.60	240	30.80	240	30.00	240	29.70	240	30.40	240	30.30
360	30.50	360	30.70	360	29.30	360	29.40	360	30.30	360	30.20
480	30.30	480	30.40	480	28.50	480	28.70	480	30.20	480	30.10
600	30.10	600	30.20	600	28.00	600	28.20	600	30.10	600	30.10
900	30.00	900	30.00	900	26.60	900	27.00	900	30.00	900	30.00
1200	29.50	1200	29.70	1200	25.20	1200	26.00	1200	29.50	1200	29.70
1500	29.10	1500	29.30	1500	23.80	1500	25.00	1500	28.60	1500	29.50
1800	28.50	1800	28.90	1800	22.50	1800	24.00	1800	28.10	1800	28.60
2100	28.50	2100	28.60	2100	21.00	2100	23.00	2100	27.60	2100	28.00
2400	28.10	2400	28.20	2400	20.30	2400	21.90	2400	26.50	2400	27.50
2700	27.60	2700	27.70	2700	19.30	2700	20.90	2700	26.00	2700	26.50
3000	27.25	3000	27.30	3000	18.50	3000	20.00	3000	25.50	3000	26.00
3300	26.60	3300	26.70	3300	17.50	3300	19.00	3300	24.80	3300	25.50
3600	26.25	3600	26.40	3600	16.90	3600	18.20	3600	23.80	3600	24.80
4500	25.00	4500	25.00	4500	15.40	4500	16.00	4500	21.60	4500	23.00
5400	24.70	5400	24.60	5400	14.00	5400	14.50	5400	21.00	5400	21.30
7200	24.20	7200	24.10	7200	13.50	7200	13.50	7200	20.40	7200	20.80
21600	23.30	21600	23.20	9600	13.00	9600	12.50	9000	19.00	9000	19.80
57600	23.30	57600	23.20	25200	12.90	25200	12.30	16200	18.20	16200	18.00
				57600	12.80	57600	12.00	19800	17.80	19800	17.60
								86400	14	86400	13.5



Universidade Federal de Ouro Preto
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN
Repositório Institucional
monografias@ufop.edu.br



Certifico que o aluno Stéphanie Oliveira Moura Sá, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado
“INFLUÊNCIA DO TEOR DE SÓLIDOS NA DISPOSIÇÃO DE UM REJEITO FINO DE MINÉRIO DE FERRO”,
efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que
estou de acordo com a versão final do trabalho.

Waldyr Lopes de Oliveira Filho
Orientador

Ouro Preto, 13 de Dezembro de 2018.