

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ALVARO BENATTI DE AMORIM**

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO E  
VISCOSIDADE APARENTE DE POLPA HETEROGÊNEA DE AREIA E ÁGUA**

**SANTOS – SP  
2016**

**ALVARO BENATTI DE AMORIM**

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO E  
VISCOSIDADE APARENTE DE POLPA HETEROGÊNEA DE AREIA E ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como requisito parcial para obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica sob a orientação da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlene Silva de Moraes e a coorientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

**SANTOS – SP  
2016**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

AMORIM, Alvaro Benatti.

Determinação experimental da velocidade de deposição e viscosidade aparente de polpa heterogênea de areia e água / Alvaro Benatti de Amorim - 2016

75 p.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlene Silva de Moraes

Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Jr.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2015.

1. Bombeamento de polpa. 2. Polpa heterogênea. 3. Velocidade de deposição. 4. Areia.

I.MORAES, Marlene Silva. II.MORAES JR., Deovaldo. III. Determinação experimental da velocidade de deposição e viscosidade aparente de polpa heterogênea de areia e água.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha mãe Maria Paula Benatti e aos meus avós Paulo Benatti e Maria José Felipe Benatti, pois sem eles eu não teria vencido as batalhas que travei.*

## AGRADECIMENTO

### Agradeço

E exalto, inicialmente, minha gratidão aos meus queridos amigos e ilustres orientadores Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlene Silva de Moraes e Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior que, com excelência, além de terem me guiado em minha graduação, conduziram-me ao título de mestre.

À Universidade Santa Cecília e sua Faculdade de Engenharia Química pelo espaço e equipamento cedidos e oportunidade de me aprofundar em minha área de formação.

Naturalmente, à minha amada mãe Maria Paula Benatti; obrigado pela compreensão, pelas palavras de carinho e apoio, pelos “puxões de orelha” e por sempre ser incondicionalmente maternal, independente de minhas atitudes.

Aos meus avós Paulo Benatti e Maria José Felipe Benatti pelo apoio e incentivo em todas as escolhas de minha vida.

Ao meu dileto parceiro Giovanni Parize Gama por ter sido extremamente compreensivo, prestativo e acolhedor em mais esta etapa do meu viver.

Por último, e mais importante, a Deus por amparar minha alma, manter a lucidez em minha mente e suprir-me de forças para nunca desistir.

## RESUMO

Na etapa de projeto de uma tubulação de mineroduto, a perda de carga e a velocidade de deposição das partículas em suspensão em polpas heterogêneas são fundamentais para um bom funcionamento do processo. O presente trabalho teve por objetivo construir a curva experimental da perda de carga, em um trecho horizontal reto, em função da velocidade da polpa de água e areia, com granulometrias +16 e -400 mesh, e concentrações volumétricas de sólido de 2 e 5 % e comparar a velocidade de deposição experimental com a calculada com método disposto na literatura. Visou também quantificar a viscosidade aparente pela perda de carga experimental, e equações de Darcy-Weisbach e Swamee. A unidade experimental foi constituída de um tanque com capacidade de 45,35 litros, bomba centrífuga com rotor de 100 mm acoplada a um motor de 1,0 hp, tubulação em acrílico de 27,5 mm de diâmetro interno, dois piezômetros cujas tomadas de pressão encontravam-se à uma distância de 1,20 m entre si, e um impulsor axial com duas pás a 45° acoplado a um motor de 0,25 hp. O tanque de acrílico foi alimentado com a polpa e pela ação do agitador axial, foi mantida em suspensão. Acionou-se a bomba e manteve-se a suspensão em reciclo. Os valores de perda de carga na tubulação foram medidos por leitura piezométrica e as vazões determinadas pelo método de massa por unidade de tempo. A velocidade de deposição calculada foi determinada de acordo com método proposto pela literatura, e foram adicionados 0,3 e 0,5 m/s ao valor calculado, conforme prática industrial. A viscosidade aparente foi calculada utilizando os valores experimentais de perda de carga, velocidade média de escoamento e densidade em conjunto com as equações de Reynolds, Darcy-Weisbach e Swamee. Os desvios padrão entre velocidades experimentais e obtidas por método retirado da literatura, com a adição de 0,3 m/s, para as polpas de 2% e 5% foram respectivamente 4,24% e 6,36% e com a adição de 0,5 m/s para as polpas de 2% e 5% foram respectivamente 9,90% e 7,78%. Os perfis de variação da viscosidade aparente e de perda de carga em função da velocidade foram similares. Concluiu-se que os métodos dispostos na literatura para cálculo da velocidade de deposição são compatíveis com os obtidos experimentalmente.

**Palavras-chave:** Bombeamento de polpa. Polpa heterogênea. Velocidade de deposição. Areia

## ABSTRACT

In the designing phase of a slurry pipeline, the pressure loss and the settling velocity of solid particles in suspension of settling slurries are fundamental for a well-functioning process. The referring paper had as objective build the experimental curve of pressure loss, in a straight horizontal pipeline, by the velocity of water-sand slurry flow with granulometry varying from -#16 to +400# and volumetric concentrations of solids of 2 and 5 % and compare the experimental velocity with the one calculated with method found in the literature. It was also aimed to quantify the apparent viscosity through the experimental pressure loss, and equations of Darcy-Weisbach and Swamee. The experimental unit was made of a 45,35 liter tank, a centrifugal pump with a 100 mm impeller attached to a 1,0 hp motor, acrylic pipeline with internal diameter of 27,5 mm, two piezometers whose openings that connected them to the pipeline were 1,20 m apart, and an axial impeller, with two 45° blades attached to a 0,25 hp motor. The acrylic tank was fed with the slurry and, by the action of the impeller, was kept in full suspension. The pump was turned on and the suspension was kept in recycling. The values for pressure loss were measured on the piezometers and the velocities were determined by mass over time method. The calculated settling velocity were determined according with the method proposed in the literature and values of 0,3 and 0,5 m/s were added to the calculated values as it's done in the industry. The standard deviation values comparing experimental and calculated velocities, when adding 0,3 m/s, for the 2% and 5% pulps were respectively 4,24% and 6,36% and when adding 0,5 m/s for the 2% and 5% pulps were, in this order, 9,90% and 7,78%. The profiles of variation of both apparent viscosity and pressure loss in function of velocity were similar. It was possible to conclude that the methods available in the literature for the calculation of settling velocities were compatible with the values obtained with experiments.

**Keywords:** Slurry pumping. Settling slurry. Settling velocity. Sand

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais Jazidas brasileiras. ....	18
Figura 2.2 - Evolução do valor de investimentos no Setor de Mineração no Brasil... 19	19
Figura 2.3 - <i>Log washer</i> utilizado para desagregação e lavagem do minério de areia. ....	23
Figura 2.4 - Peneira vibratória. ....	23
Figura 2.5 - Mineroduto Minas-Rio. ....	25
Figura 2.6 - (a) Suspensão parcial: algumas partículas estão suspensas e parte delas permanece no fundo do tanque, usado mais comumente em dissolução de sólidos com alto grau de solubilidade; (b) Suspensão completa: Todas as partículas sólidas estão em suspensão, condição mínima para a maior parte dos processos; (c) Suspensão uniforme: sólidos suspensos uniformemente por todo o volume do tanque: condição requerida para processos de cristalização ou reação em meio líquido com catalizador sólido. ....	26
Figura 2.7 - Representação dos regimes de escoamento de um fluido. ....	27
Figura 2.8 - Diagrama de Moody. ....	29
Figura 2.9 - Fator da Equação de Durand em função do diâmetro médio da partícula - Material uniforme. ....	31
Figura 2.10 - Fator da Equação de Durand em função do diâmetro médio da partícula - Material não uniforme. ....	32
Figura 2.11 - a) fluido ideal; b) fluido dilatante; c) fluido newtoniano; d) pseudoplástico; e) plástico de Bingham; f) sólido real; g) sólido ideal. ....	34
Figura 2.12 - Demonstração experimental de fluxo homogêneo. ....	35
Figura 2.13 - Demonstração de fluxo homogêneo. ....	35
Figura 2.14 - Demonstração experimental de fluxo com leito móvel. ....	36
Figura 2.15 - Demonstração de fluxo com leito móvel. ....	36
Figura 2.16 - Demonstração experimental de fluxo com leito fixo. ....	37
Figura 2.17 - Demonstração de fluxo com leito fixo. ....	37
Figura 3.1 - Unidade piloto de mineroduto do Laboratório de Operações Unitárias Santa Cecília. 1) Tanque em acrílico provido de quatro chicanas; 2) Bomba centrífuga; 3) Agitador; 4) Controladores de velocidade da bomba e do agitador; 5) Tomadas de pressão para conexão dos piezômetros; 6) Piezômetros; 7) Tubulação em PVC transparente; 8) Válvulas de esfera para controle da distribuição do fluxo; 9) Mangueira flexível para coleta de polpa. ....	39

Figura 3.2 - Tanque de acrílico provido de chicanas com capacidade de 45,35 L. ..	40
Figura 3.3 - Bomba centrífuga com rotor de 100 mm e motor de 1 hp.....	40
Figura 3.4 - Agitador do tipo turbina com duas pás inclinadas a 45° acoplado a motor de 0,25 hp. ....	41
Figura 3.5 - Tubos piezométricos com demonstração de leitura da perda de carga. ....	41
Figura 3.6 - Mangueira flexível para coleta de polpa.....	42
Figura 3.7 - Caixa acrílica com areia estocada e cristais de sílica. ....	42
Figura 3.8 - Peneiramento vibratório (Aberturas decrescentes de cima para baixo). ....	43
Figura 3.9 - Tanque de acrílico preenchido com polpa de água e areia até a demarcação determinada experimentalmente para evitar respingos.....	44
Figura 3.10 - Aplicação do critério de Zwietering com a utilização de espelho e luminária.....	47
Figura 3.11 - demonstração da caixa de coleta de polpa. ....	48
Figura 4.1 - Perda de Carga em função da velocidade para a polpa de 2%. ....	54
Figura 4.2 - Perda de Carga em função da velocidade para a polpa de 5%. ....	55
Figura 4.3 - Entupimento na tubulação devido à alta concentração de sólidos gerou necessidade de interrupção do experimento para manutenção da planta piloto.....	56
Figura 4.4 - Fator FL para as condições trabalhadas.....	56
Figura 4.5 - Viscosidade aparente em função da velocidade média para a polpa de 2%. ....	58
Figura 4.6 - Viscosidade aparente em função da velocidade média para a polpa de 5%. ....	58
Figura 4.7 - Perda de carga e viscosidade aparente em função da velocidade para a polpa de 2%. ....	59
Figura 4.8 - Perda de carga e viscosidade aparente em função da velocidade para a polpa de 5%. ....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção de Bens Minerais no Brasil em 2014.....	19
Tabela 2.2 - Grau de uniformidade de sólidos.....	22
Tabela 2.3 - Relação de vantagens e desvantagens dos minerodutos. ....	25
Tabela 3.1 - Valores de massa e volume estudados.....	46
Tabela 4.1 - Desvios padrão entre perda de carga experimental e teórica para água. .....	53
Tabela 4.2 - Dimensões das aberturas das peneiras e coeficiente de uniformidade das amostras de areia. ....	54
Tabela 4.3 – Desvios padrão – Ensaio com polpa de 2 % .....	57
Tabela 4.4- Desvios padrão - Ensaio com polpa de 5 %.....	57

## SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do tubo (m <sup>2</sup> )
Cu	Coefficiente de Uniformidade de partículas (adimensional)
D	Diâmetro interno da tubulação (m)
d <sub>10</sub>	Diâmetro teórico da peneira em que 10% da massa peneirada é passante (mm)
d <sub>50</sub>	Diâmetro teórico da peneira em que 50% da massa peneirada é passante (mm)
d <sub>60</sub>	Diâmetro teórico da peneira em que 60% da massa peneirada é passante (mm)
f	Fator de atrito (adimensional)
FL	Fator de Durand em função da granulometria da partícula e concentração volumétrica da polpa (adimensional)
g	Aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
H	Altura manométrica (m.c.a)
l <sub>w</sub>	Perda de carga (m.c.a)
m <sub>ÁGUA</sub>	Massa da água (kg)
m <sub>AREIA</sub>	Massa da areia (kg)
P	Pressão (kgf/m <sup>2</sup> )
Q	Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /s)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
v	Velocidade de escoamento do fluido (m/s)
V	Volume (m <sup>3</sup> )
V <sub>ÁGUA</sub>	Volume da água (L)
V <sub>AREIA</sub>	Volume da areia (L)

$V_C$	Volume da chicana de acrílico (L)
$V_D$	Velocidade de Deposição de Durand (m/s)
$V_T$	Volume total do tanque de acrílico (L)
$V_U$	Volume útil do tanque de acrílico (L)
$z$	Desnível no ponto estudado (m.c.a.)
$\gamma$	Peso específico do fluido (kgf/m <sup>3</sup> )
$\varepsilon$	Rugosidade relativa (m)
$\mu$	Viscosidade Dinâmica (kg/(m.s) ou cP)
$\rho$	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_L$	Densidade do líquido (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_P$	Densidade da polpa (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_S$	Densidade do sólido (kg/m <sup>3</sup> )

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	GENERALIDADES.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	INDÚSTRIA MINERADORA.....	18
2.2	AREIA.....	20
2.3	CLASSIFICAÇÃO DA AREIA.....	21
2.4	BENEFICIAMENTO DA AREIA.....	22
2.4.1	LAVAGEM E DESAGREGAÇÃO.....	22
2.4.2	PENEIRAMENTO.....	23
2.4.3	CLASSIFICAÇÃO.....	24
2.4.4	DESAGUAMENTO.....	24
2.5	MINERODUTO.....	24
2.5.1	BOMBEAMENTO DE POLPA.....	26
2.6	TIPOS DE POLPA.....	34
2.6.1	POLPA HOMOGÊNEA.....	34
2.6.2	POLPA HETEROGÊNEA.....	34
2.7	REGIMES DE ESCOAMENTO DE POLPAS.....	35
2.7.1	FLUXO HOMOGÊNEO.....	35
2.7.2	FLUXO HETEROGÊNEO.....	36
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1	MÉTODO EXPERIMENTAL.....	38
3.1.1	RELAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO.....	38
3.1.2	CONDICIONAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DA AREIA.....	42
3.1.3	PREPARAÇÃO DA POLPA.....	43
3.1.4	PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS.....	46
3.1.5	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO.....	48
3.1.6	DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA PELO BALANÇO DE ENERGIA MECÂNICA.....	49
3.1.7	DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE.....	50

3.1.8	CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA.....	51
3.1.9	CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE .....	52
3.2	MÉTODO TEÓRICO .....	52
3.2.1	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO TEÓRICA.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1	VALIDAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL .....	53
4.2	CLASSIFICAÇÃO DA AREIA.....	53
4.3	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO EXPERIMENTAL..	54
4.4	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO TEÓRICA .....	56
4.5	DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VISCOSIDADE APARENTE .....	57
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	61
5.1	CONCLUSÕES .....	61
5.2	SUGESTÕES.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
	APÊNDICE A –Classificação de Areia após 15 minutos em agitação.....	66
	APÊNDICE B – Classificação de Areia após 20 minutos em agitação.....	68
	APÊNDICE C – Tabelas de Dados Experimentais.....	70
	APÊNDICE D – Velocidades de Deposição Teóricas para as polpas com 2% e 5% de teor de sólidos respectivamente.....	72
	APÊNDICE E – Tabela de Valores de Viscosidade Aparente .....	73
	APÊNDICE F – Demonstração de Cálculo da Viscosidade Aparente .....	74

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 GENERALIDADES

A areia de sílica, também chamada de areia de construção civil, é um dos bens de consumo mais produzidos no Brasil. Estima-se que a produção de agregados de construção civil – areia e brita – tenha sido na faixa de 673 milhões de toneladas para o ano de 2014, enquanto o minério de ferro, *commodity* brasileira amplamente explorada, contou com uma produção de 400 milhões de toneladas no mesmo ano (IBRAM, 2015).

Areia é amplamente utilizada como matéria-prima nas indústrias de vidro, cerâmicas, construção civil e outras. Também é um dos materiais manuseados nas indústrias de dragagem (MESSA et al., 2014).

Devido às grandes distâncias entre as jazidas, de onde a areia é explorada, até os locais em que é utilizada, o transporte deste bem acaba por encarecer o preço do produto final, o que pode inviabilizar os transportes rodoviários e ferroviários (IBRAM, 2015; CHAVES, 2012).

Por conta desse empasse, o uso de técnicas de bombeamento de polpas de sólidos via tubulação, seja nos processos de dragagem e nas engenharias de mineração, industrial ou civil, tem se tornado cada vez mais comum (MESSA et al., 2014).

A prática da utilização do bombeamento via mineroduto – nome dado ao equipamento de transporte de minério via bombas, através da suspensão ou mistura do material sólido em meio líquido – mostrou-se mais economicamente viável e tem se tornado cada vez mais corriqueira (NABIL et al., 2013).

No caso das polpas heterogêneas, ou suspensões, em que o material sólido não é miscível no meio líquido, propriedades como velocidade de deposição, interação entre partículas e turbulência devem ser consideradas no projeto da tubulação e do sistema de bombeamento em instalações de mineroduto (ELNAHHAS et al., 2009).

Devido à escassez de referências na literatura atual, poucos modelos de perda de carga e perfis de velocidade foram desenvolvidos, o que motiva os

pesquisadores, pois maiores estudos implicariam na otimização do consumo energético dos complexos em que minerodutos operam (WILSON et al., 1992; FUSHEND et al., 2007; MESSA & MALAVASI, 2012).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

O presente estudo teve por objetivo geral quantificar experimentalmente a perda de carga, velocidade de deposição e a viscosidade aparente de uma polpa heterogênea de água e areia.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Visou o presente trabalho, como objetivos específicos:

- a) Determinar experimentalmente a perda de carga e a velocidade de deposição de polpas heterogêneas, de areia e água, com concentração volumétrica de sólidos de 2 e 5%, e compará-las com os valores calculados.
- b) Verificar o comportamento da variação de viscosidade aparente das polpas em estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INDÚSTRIA MINERADORA

O propósito dos processos de mineração é de trazer à superfície bens minerais localizados no subsolo para que possam ser aproveitados em outras atividades. (CHAVES, 2012)

O Brasil é um país com grandes jazidas minerais abrangendo 72 substâncias, 23 de origem metálica, 45 não metálicas e 4 para fins energéticos (IBRAM, 2015). A Figura 2.1 mostra alguns dos principais depósitos minerais no Brasil e seus respectivos produtos.

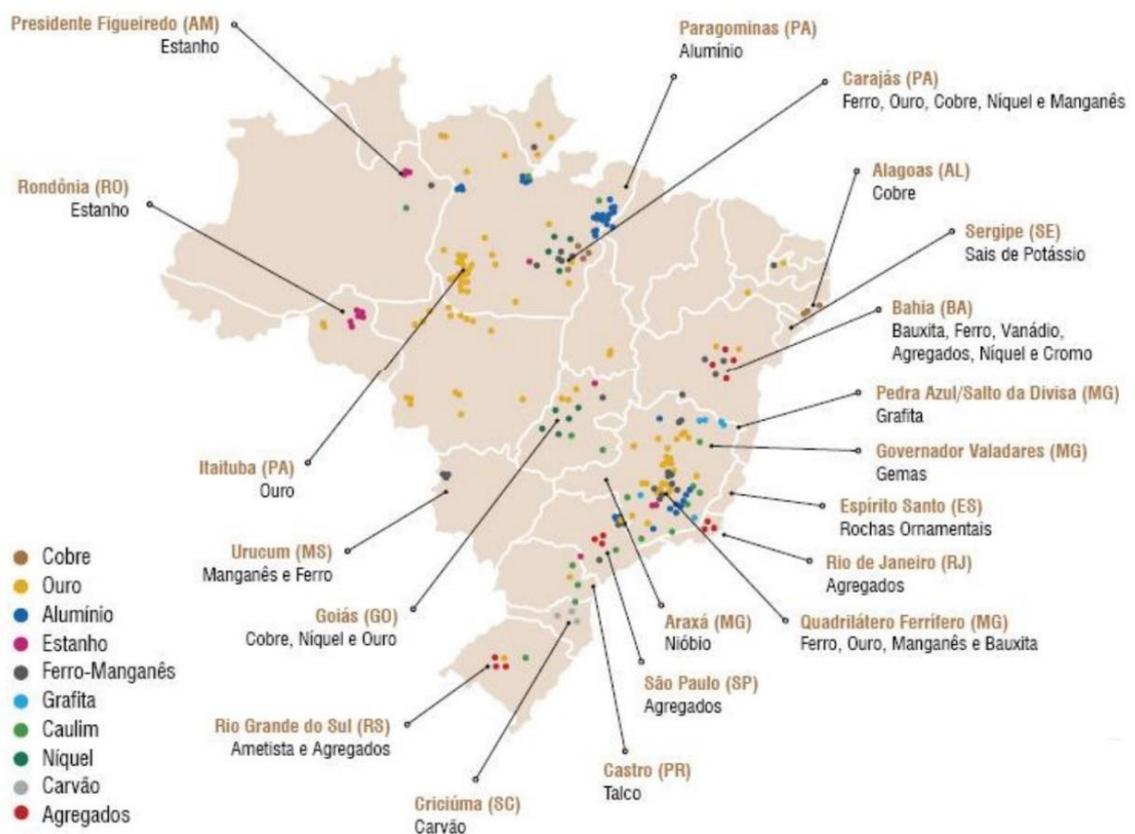
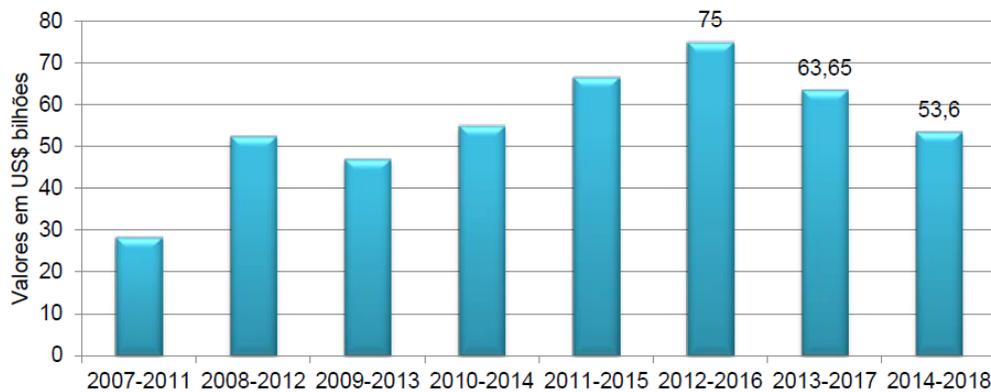


Figura 2.1 - Principais Jazidas brasileiras.

Fonte: IBRAM, 2015.

A mineração ainda é um setor que atrai um grande número de investidores privados. A Figura 2.2 mostra a evolução dos investimentos no setor da indústria brasileira de mineração. Do total dos investimentos, 63,73 % serão destinados aos estados de Minas Gerais e Pará, aproximadamente US\$ 34,16 bilhões já que são

grandes produtores de minério de ferro, ouro e cobre, minérios que correspondem a 87 % do total mineral exportado do Brasil (IBRAM, 2015).



**Figura 2.2 - Evolução do valor de investimentos no Setor de Mineração no Brasil.**

Fonte: IBRAM, 2015.

Apesar de ser um grande produtor de minério de ferro e outros, a produção de agregados da construção civil ainda lidera o ranking de produção de bens minerais no país. A Tabela 2.1 mostra que a produção desta *commodity* superou a de minério de ferro, no ano de 2014, em 273.000.000 toneladas (IBRAM 2015).

**Tabela 2.1 - Produção de Bens Minerais no Brasil em 2014.**

Fonte: IBRAM 2015.

Bens Minerais	Valores em Toneladas
Agregados Construção Civil	673.000.000
Minério de Ferro	400.000.000
Bauxita	32.000.000
Fosfato	6.800.000
Alumínio Primário	962.000
Potássio Concentrado	460.000
Zinco concentrado	250.000
Cobre	219.000
Liga de Nióbio	80.000
Níquel Contido	80.000
Ouro	80

Caracterizam-se como agregados da construção civil a areia de construção e a brita, produtos de baixo valor relativo e demanda por grandes quantidades. Devido à alta demanda, o transporte destes insumos está limitado à sua participação final no custo do produto, o que pode caracterizar de 30 a 70 % do seu custo final. São consideradas distâncias máximas de 100 km para brita e 300 km para a areia. Tendo como base este fundamento, a logística de transporte é de suma importância para redução do custo final do minério (IBRAM, 2015).

O estado de São Paulo lidera a produção de agregados no Brasil, em 2013, sua produção era de aproximadamente 23 % de todo o produto nacional, seguido por Minas Gerais com 12 %, Rio de Janeiro com 8 %, Paraná e Bahia com 6 % e Rio Grande do Sul com 5 % (KULAIF, 2015).

Segundo TEMPESTA (2016) a exploração de areia no Brasil rendeu uma produção de 346,77 milhões de toneladas em 2011 aumentando para 368,96 milhões de toneladas em 2012 e 377,25 milhões de toneladas em 2013.

Agregados na construção civil constituem um setor singular da mineração, pois atendem diretamente as áreas urbanas (IBRAM, 2015).

## **2.2 AREIA**

Areia é o termo dado ao material mineral cuja composição tem predominância de dióxido de silício e distribuição granulométrica variando entre 2 e 0,06 mm (KULAIF, 2015).

Pode ser empregada na construção civil, em moldes de fundição, na fabricação de vidros, nas indústrias siderúrgicas, de cimento e de ferro-ligas, no tratamento de água de esgoto, entre outros. Segundo a TEMPESTA, a quantidade de empresas que produz areia é da ordem de 2000 e no Brasil há cerca de 740 lavras (QUARESMA, 2009).

O mineral pode ser extraído de locais com decomposição de rochas, depósitos, leitos de rios, várzeas e lacustres. No estado de São Paulo, 45 % da areia provém de várzeas, 35 % de leito de rios e o restante de outras fontes. No que diz respeito a areia produzida no Brasil, 70 % do total provém dos leitos de rios (QUARESMA, 2009).

Dentre as características da exploração deste minério, destacam-se:

- a) A ocupação e utilização de solo temporário com alteração temporária do ecossistema;
- b) O processo produtivo não utiliza químicos poluentes, ou quando utilizados são em quantidade muito pequena quando comparado com outros ramos industriais;
- c) A proximidade de comunidades;
- d) Os impactos ambientais conhecidos, como alteração do ambiente, presença de ruídos devido ao funcionamento das máquinas, emissão de material particulado (principalmente durante o transporte rodoviário);
- e) A utilização de água no processo de produção, o que pode gerar efluentes com material particulado podendo ter esta quantidade controlada ou operar em regime fechado.

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DA AREIA

Durand (1952 apud Chaves, 2012) classificou os materiais sólidos, de acordo com sua granulometria, em não uniforme, uniforme e muito uniforme. Ao realizar a classificação granulométrica do material sólido trabalhado, utilizando peneiras de diferentes aberturas (mesh), deve-se estimar os valores teóricos, por meio de interpolação linear, das aberturas das peneiras em que 60%, 50% e 10% ( $d_{60}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{10}$  respectivamente) do material passante.

O coeficiente de uniformidade do material ( $C_U$ ), proposto por Caputo (1973 apud Chaves, 2012), define o grau de distribuição de material, fino, médio e grosso em uma amostra e pode ser calculado pela Equação 2.1.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.1)$$

Em que,

$C_U$  é o coeficiente de uniformidade.

$d_{60}$  é o diâmetro interpolado de 60% do material passante, em mm;

$d_{10}$  é o diâmetro interpolado de 10% do material passante, em mm;

A Tabela 2.2 mostra o grau de uniformidade do material com base no resultado obtido no cálculo do  $C_U$ .

**Tabela 2.2 - Grau de uniformidade de sólidos.**

Fonte: Chaves, 2012.

$C_U$	Uniformidade
$C_U < 5$	Muito uniforme
$5 \leq C_U < 15$	Uniforme
$C_U \geq 15$	Não uniforme

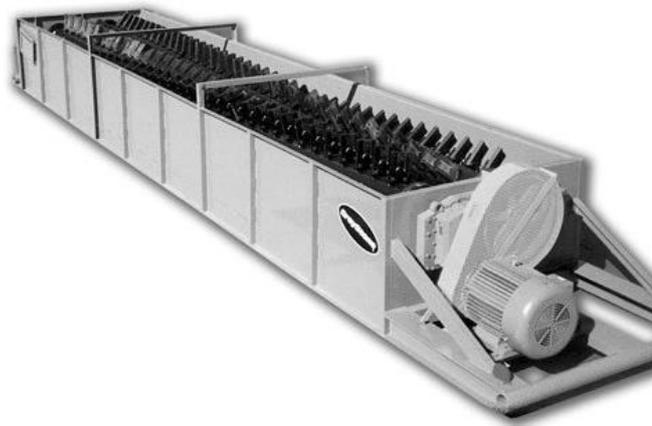
## 2.4 BENEFICIAMENTO DA AREIA

O beneficiamento é a etapa que sucede a lavra (ou extração) e tem a função de fazer o condicionamento físico, físico-químico e/ou químico do minério trabalhado no processo (REGO, 2005).

Segundo Chaves (2012), o processo pode ser basicamente, dividido em quatro etapas: Lavagem e desagregação, peneiramento, classificação e desaguamento. Quando há a presença de frações mais grossas, é necessário incluir o processo de britagem.

### 2.4.1 LAVAGEM E DESAGREGAÇÃO

Assim que o minério deixa a frente da lavra, ele é alimentado pelo fundo do *log washer* (Figura 2.3) que tem a função de esfregar os grãos de areia, removendo partículas de argila e desintegrando grãos grossos conforme o material sofre o atrito gerado pela ação das palhetas presas a dois eixos rotativos no interior do tanque (corpo) do equipamento.



**Figura 2.3 - Log washer utilizado para desagregação e lavagem do minério de areia.**

**Fonte: Indofab Industries, 2016.**

Com o movimento, o material contaminante segue pelo *overflow* enquanto os grãos limpos seguem pelo *underflow* (CHAVES, 2012).

*Scrubbers* e lavadores de rosca tem a mesma função do *log washer*, e podem também ser utilizados, alternativamente, nesta etapa do processo.

#### **2.4.2 PENEIRAMENTO**

A etapa de peneiramento é caracterizada pela separação da areia em diferentes frações granulométricas que passam por estruturas metálicas, com aberturas fixas e de tamanho predeterminado, localizadas dentro das peneiras vibratórias (Figura 2.4).



**Figura 2.4 - Peneira vibratória.**

**Fonte: B2b Máquinas, 2016.**

O tamanho das partículas trabalhadas é importante nesta etapa do processo, pois partículas de tamanhos pequenos podem necessitar de equipamentos com maior grau de sofisticação (CHAVES, 2012).

### **2.4.3 CLASSIFICAÇÃO**

O processo de classificação é caracterizado pelo uso de equipamentos como ciclones, cones e caixas de sedimentação (CHAVES, 2012).

### **2.4.4 DESAGUAMENTO**

As pilhas de desaguamento, geralmente, são criadas em grupos de três. Enquanto uma está sendo formada, outra está secando e a última, está seca, e pronta para ser encaminhada para os clientes (CHAVES, 2012).

Hoje em dia existem equipamentos com filtros capazes de fazer o desaguamento de maneira mais rápida.

## **2.5 MINERODUTO**

Segundo IBRAM (2015) o custo do transporte de areia desde o beneficiamento até o cliente final pode totalizar de 30% a 70% do valor final da areia comprada, logo transportes para longas distâncias pode encarecer demais o valor do sólido.

O mineroduto é um tipo de operação unitária capaz de transportar, através da suspensão em líquidos, material sólido particulado ou granulado por grandes distâncias, com um custo relativamente baixo. A prática da utilização do bombeamento de minérios em suspensões líquidas mostrou-se mais economicamente viável e tem se tornado cada vez mais corriqueira. (NABIL et al., 2013).

Pesquisadores têm trabalhado em modelos e simulações de perda de carga e perfis de velocidade, pois estudos implicariam na otimização do consumo energético em instalações de minerodutos (WILSON et al., 1992; FUSHEND et al., 2007; EL-NAHHAS et al., 2009; MESSA & MALAVASI, 2012).

Entre os sólidos normalmente transportados, destacam-se: minério de ferro, carvão, brita, areia, rocha fosfática, entre outros. O líquido utilizado para o transporte

dos sólidos deve ser quimicamente compatível com o material e de baixo custo, normalmente utiliza-se água (CHAVES, 2012).

A Tabela 2.3 relaciona algumas vantagens e desvantagens da utilização do mineroduto.

**Tabela 2.3 - Relação de vantagens e desvantagens dos minerodutos.**

Fonte: CHAVES, 2012 - Adaptado.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo custo operacional e de manutenção	Alto investimento inicial
Menor consumo de combustíveis fósseis	Uso de grandes quantidades de água
Alta confiabilidade	Geração de rejeitos
Menor risco de perdas de material	Menor versatilidade
Pequeno impacto ambiental	

Atualmente, o maior mineroduto do mundo, medindo 525 km, encontra-se no Brasil e faz parte do projeto Minas-Rio da Anglo American (Figura 2.5) e transporta polpa de minério de ferro e água (MELLO, 2014).



**Figura 2.5 - Mineroduto Minas-Rio.**

Fonte: ANGLO AMERICAN, 2016.

## 2.5.1 BOMBEAMENTO DE POLPA

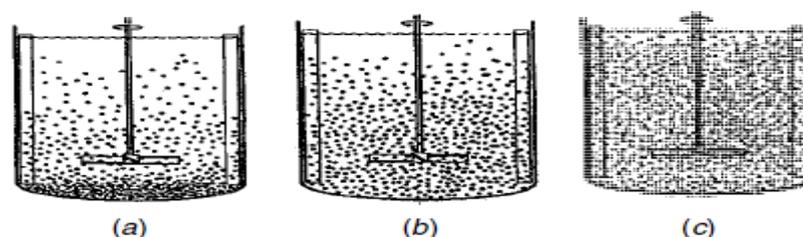
### 2.5.1.1 AGITAÇÃO

A agitação e a mistura de sólidos e líquidos são operações amplamente utilizadas em indústrias químicas e petroquímicas em processos como suspensão de catalisadores, mistura de polpas heterogêneas, agitação de biorreatores. Polpas heterogêneas são caracterizadas por conterem partículas imiscíveis e que, sem a agitação necessária podem decantar para o fundo do tanque. Portanto é de fundamental importância que a taxa de agitação em tanques contendo sólidos e líquidos seja suficiente (MONTANTE et al., 2012; PAUL et al., 2004).

Conforme a quantidade e/ou granulometria de sólidos aumenta, a velocidade de rotação do agitador também deve ser aumentada o que implica em maior consumo energético, portanto é necessário saber a velocidade mínima do agitador para que haja suspensão plena sem gastos energéticos exagerados (WANG, 2010).

O método de suspensão chamado *off-bottom* ou suspensão completa, representado na figura 2,6 (b), é caracterizado pela completa movimentação das partículas, em que nenhuma partícula permanece no fundo do tanque por um período maior que 1 ou 2 segundos. Seguindo este método, também chamado de critério de Zwietering, a área máxima da superfície das partículas fica em contato com o líquido no qual elas estão suspensas (PAUL et al., 2004).

A Figura 2,6 mostra a representação dos diversos graus de suspensão de partículas em polpas heterogêneas.



**Figura 2.6 - (a) Suspensão parcial: algumas partículas estão suspensas e parte delas permanece no fundo do tanque, usado mais comumente em dissolução de sólidos com alto grau de solubilidade; (b) Suspensão completa: Todas as partículas sólidas estão em suspensão, condição mínima para a maior parte dos processos; (c) Suspensão uniforme: sólidos suspensos uniformemente por todo o volume do tanque: condição requerida para processos de cristalização ou reação em meio líquido com catalisador sólido.**

Fonte: Paul et al., 2004 – Adaptado.

### 2.5.1.2 NÚMERO DE REYNOLDS

O número de Reynolds é um adimensional que relaciona forças de inércia com forças viscosas. É utilizado para estimar o tipo de regime de um escoamento e é dado pela Equação 2.1.

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (2.1)$$

Em que:

Re é o número de Reynolds (adimensional);

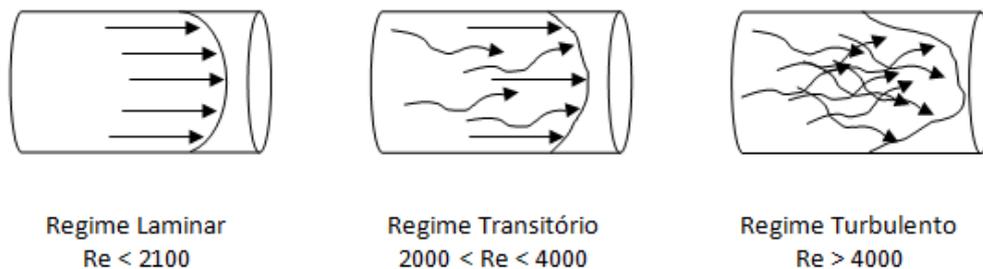
D é o diâmetro interno da tubulação (m);

v é a velocidade d escoamento do fluido (m/s);

$\rho$  é a densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );

$\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ).

A Figura 2.7 relaciona os perfis de regime de escoamento de um fluido.



**Figura 2.7 - Representação dos regimes de escoamento de um fluido.**

**Fonte: Autor, 2016.**

Um escoamento que apresente número de Reynolds inferior a 2100 é considerado laminar, entre 2000 e 4000 é considerado regime transitório e acima de 4000 é considerado turbulento (PEREIRA & SEGUIM, 2012).

### 2.5.1.3 PERDA DE CARGA

Segundo Pereira e Seguin (2012) um fluido dentro de uma tubulação fluirá sempre do ponto de maior pressão ao ponto de menor pressão, e esta movimentação faz com que ele perca energia, esta perda é chamada de perda de carga e pode ser estimada pela equação de Darcy-Weisbach (Equação 2.2)

$$l_w = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.2)$$

Em que:

$l_w$  é a perda de carga entre os pontos estudados (m);

$f$  é o fator de atrito na tubulação (adimensional);

$L$  é o comprimento da tubulação entre os dois pontos estudados (m);

$D$  é o diâmetro interno da tubulação (m);

$v$  é a velocidade de escoamento do fluido (m/s);

$g$  é a aceleração gravitacional local (9,81 m/s<sup>2</sup>).

Em instalações que operam com água limpa e fria (até 70°C) e em tubulações lisas de ½" até 2", como recomendado pela NBR 5626, a equação de Fair-Whipple-Hsiao (Equação 2.3) pode ser utilizada para cálculo da perda de carga (MORAES JR. & MORAES, 2011).

$$l_w = L \cdot 0,00086 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (2.3)$$

Em que:

$l_w$  é a perda de carga entre os pontos estudados (m.c.a.);

$L$  é o comprimento da tubulação entre os dois pontos estudados (m);

$D$  é o diâmetro interno da tubulação (m);

$Q$  é a vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s)

### 2.5.1.4 FATOR DE ATRITO

O fator de atrito é uma grandeza adimensional utilizado na equação da perda de carga de Darcy-Weisbach que relaciona o regime do fluido (número de Reynolds) com a rugosidade relativa no tubo (PEREIRA & SEGUIM, 2012).

Pode ser obtido através do diagrama de Moody (Figura 2.8):

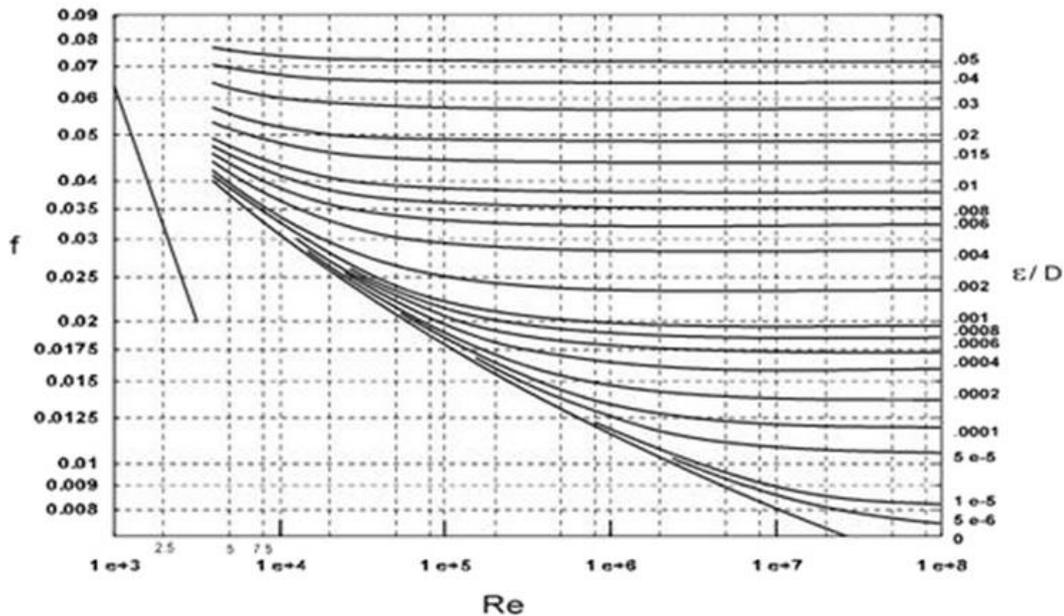


Figura 2.8 - Diagrama de Moody.

Fonte: PEREIRA & SEGUIM, 2012.

Segundo Sousa & Neto (2014) a equação de Swamee (Equação 2.4) pode ser usada para quaisquer tipos de fluxo além de ser uma forma explícita de se estimar o fator de atrito.

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (2.4)$$

Em que:

f é o fator de atrito na tubulação (adimensional);

$\varepsilon$  é a rugosidade equivalente (m);

D é o diâmetro interno da tubulação (m);

Re é o número de Reynolds (adimensional).

### 2.5.1.5 VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO

A velocidade de bombeamento de uma polpa heterogênea deve ser elevada o bastante para manter o material em suspensão, porém não muito elevada para não causar efeitos abrasivos nas paredes da tubulação por onde é transportada. Também não pode ser muito baixa, pois, sem a devida turbulência, o material em suspensão decantaria para o fundo da tubulação (AMORIM et al., 2015; CHAVES, 2012)

O cálculo da velocidade de deposição, velocidade mínima para que o conteúdo sólido não decante durante o transporte, pode ser feito pelo uso do método algébrico proposto por Durand (1952 apud Chaves, 2012) (Equação 2.5).

$$V_D = FL \cdot \sqrt{\left[ 2 \cdot g \cdot D \cdot \left( \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L} \right) \right]} \quad (2.5)$$

Em que:

$V_D$  é a velocidade de deposição (m/s);

$FL$  é o fator em função da granulometria e concentração de sólidos, retirado das figuras 2.9 e 2.10 (adimensional);

$g$  é a aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);

$D$  é o diâmetro interno da tubulação (m);

$\rho_S$  é a densidade do sólido (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_L$  é a densidade do líquido de transporte (kg/m<sup>3</sup>).

A partir do coeficiente de uniformidade ( $C_U$ ) proposto por Caputo (1978 apud Chaves, 2012) pode-se utilizar a Figura 2.9, caso os sólidos tenham distribuição granulométrica do material sólido uniforme ou muito uniforme, ou a Figura 2.10, caso a distribuição seja não uniforme, para determinação do fator  $FL$  que é função da concentração volumétrica ( $C_v$ ) utilizada e do valor de  $d_{50}$ , diâmetro teórico interpolado em que 50% do material sólido empregado é passante.

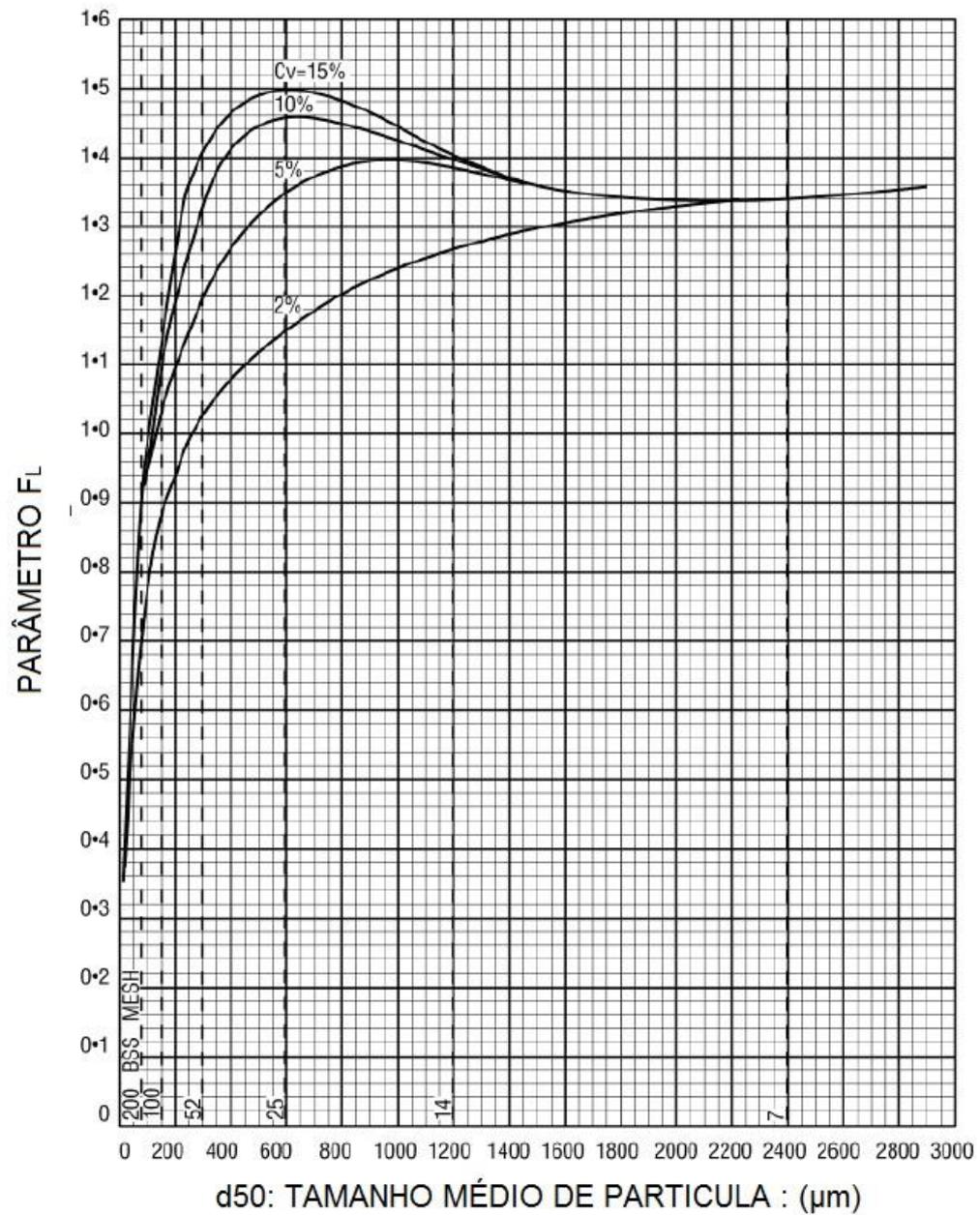


Figura 2.9 - Fator da Equação de Durand em função do diâmetro médio da partícula - Material uniforme.

Fonte: WARMAN, 2009.

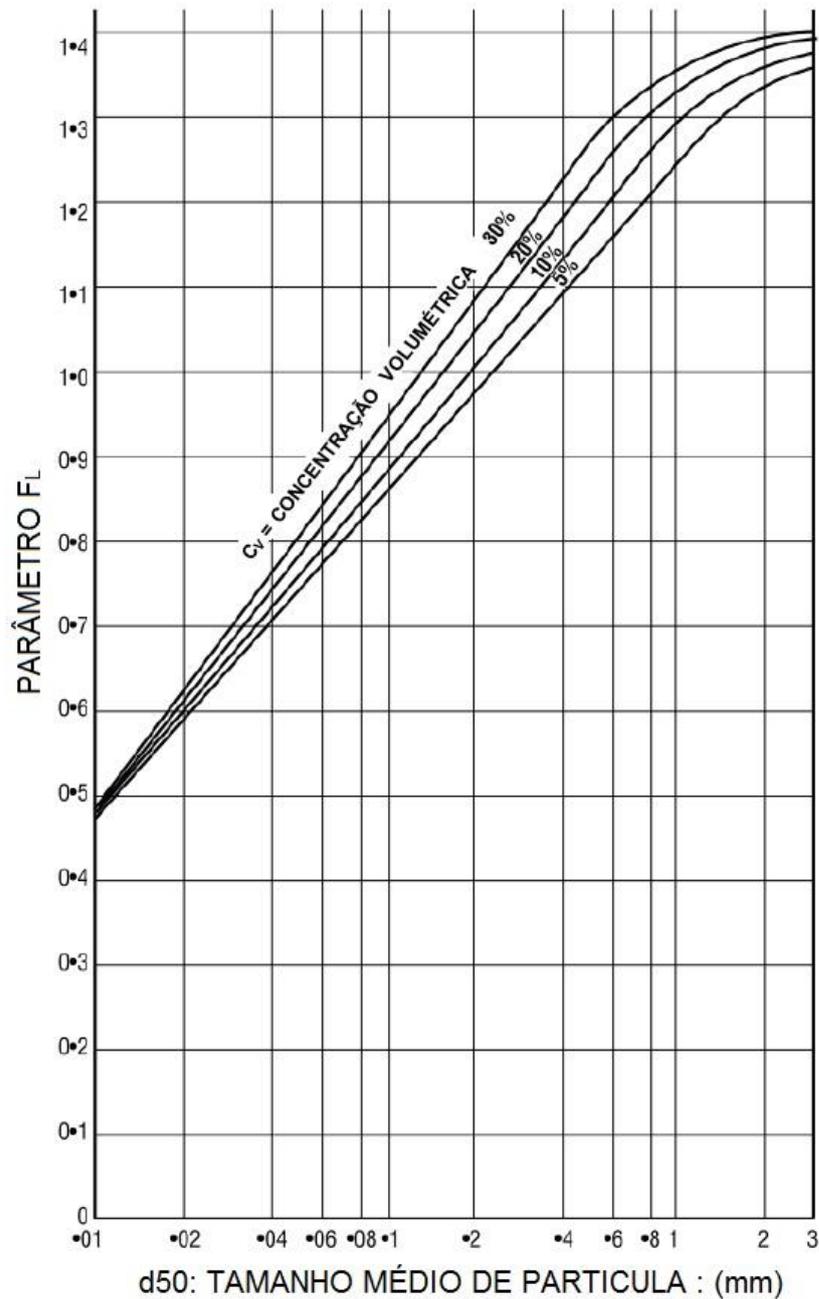


Figura 2.10 - Fator da Equação de Durand em função do diâmetro médio da partícula - Material não uniforme.

Fonte: WARMAN, 2009.

Hoje, sabe-se que o efeito causado pela formação de canais preferenciais entre as partículas mais grossas e a polpa homogênea formada pela água e as partículas mais finas de areia deve ser levado em consideração, portanto o termo equivalente à densidade da água ( $\rho_L$ ) deve ser substituído por  $\rho_P$ , (densidade da polpa) como demonstrado na Equação 2.6 (CHAVES, 2012).

$$V_D = FL \cdot \sqrt{\left[ 2 \cdot g \cdot D \cdot \left( \frac{\rho_S - \rho_P}{\rho_P} \right) \right]} \quad (2.6)$$

Em que:

$V_D$  é a velocidade de deposição (m/s);

FL é o fator em função da granulometria e concentração de sólidos, retirado das figuras 2.9 e 2.10 (adimensional);

g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);

D é o diâmetro interno da tubulação (m);

$\rho_S$  é a densidade do sólido (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_P$  é a densidade da polpa (kg/m<sup>3</sup>).

Chaves (2012) recomenda também que seja acrescentado um valor de 0,3 a 0,5 m/s no resultado da velocidade de deposição encontrada para estimar-se a velocidade de projeto de uma linha.

### 2.5.1.6 VISCOSIDADE APARENTE

O termo viscosidade aparente é a denominação dada pela razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa cisalhante. Em fluidos não-newtonianos, como nas polpas de areia e água, essa taxa não é constante e depende das condições do fluxo (CHHABRA & RICHARDSON, 2008).

Segundo Çengel (2006) a mistura de areia e água é classificada como fluido dilatante, pois o valor da tensão cisalhante aumenta conforme o fluido recebe mais estresse. A Figura 2.11 mostra o perfil da taxa tensão de cisalhamento pela taxa cisalhante de alguns fluidos não-newtonianos. O coeficiente angular das curvas representadas no perfil resulta na viscosidade dinâmica.

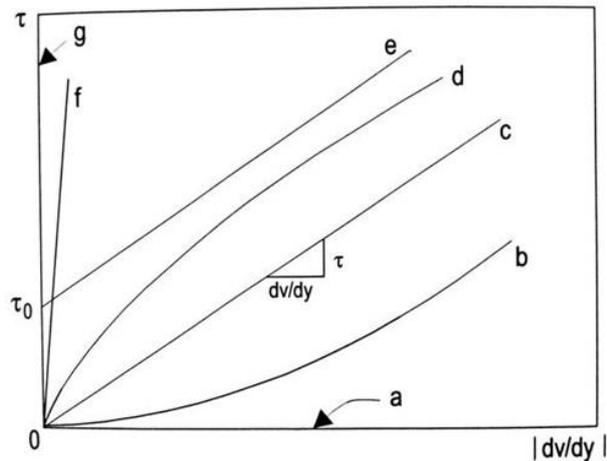


Figura 2.11 - a) fluido ideal; b) fluido dilatante; c) fluido newtoniano; d) pseudoplástico; e) plástico de Bingham; f) sólido real; g) sólido ideal.

Fonte: MORAES JR., D; SILVA, E. L., MORAES, M. S., 2011.

## 2.6 TIPOS DE POLPA

De maneira generalizada, há dois tipos de polpa, as chamadas polpas homogêneas, também referidas como veículo, e as polpas heterogêneas, ou correntes de Durand (WASP, 1993).

### 2.6.1 POLPA HOMOGÊNEA

Uma polpa pode ser classificada como homogênea quando, mesmo sob efeitos inerciais menores, o transporte é possível, pois as partículas não decantam, o que não causa restrição da tubulação (CHAVES, 2012).

Após sair da fase laminar, o fluido tem sua perda de carga elevada linearmente conforme a velocidade de escoamento aumenta (CHAVES, 2012).

### 2.6.2 POLPA HETEROGÊNEA

Quando o fluxo de polpas heterogêneas é laminar, ou seja, quando os efeitos inerciais das partículas são mais evidentes, existe a possibilidade de haver deposição de material, pois as partículas não estão misturadas, e sim suspensas. Após atingir fase de turbulência, as partículas conseguem manter-se em suspensão parcial até que o leito fixo se torne móvel (CHAVES, 2012).

A formação de leito móvel ou fixo é uma situação indesejável, pois, conforme o processo varia (como oscilação na rede elétrica e variação do tamanho da partícula), existe a possibilidade de um leito móvel evoluir para fixo e causar entupimentos e paradas (CHAVES, 2012).

## 2.7 REGIMES DE ESCOAMENTO DE POLPAS

### 2.7.1 FLUXO HOMOGÊNEO

O fluxo homogêneo é caracterizado pela distribuição homogênea da granulometria do sólido em suspensão (Figura 2.13). Normalmente os sólidos encontram-se com partículas com diâmetro menor que 0,15 mm, ou com tamanhos maiores, porém densidade menor (CHAVES, 2012).

A Figura 2.12 mostra, em equipamento de mineroduto piloto, fluxo homogêneo de polpa de água com a fração fina de areia.



Figura 2.12 - Demonstração experimental de fluxo homogêneo.

Fonte: Autor, 2016.

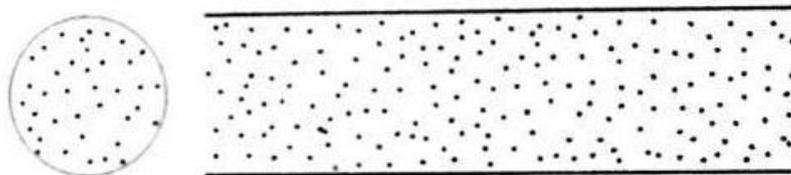


Figura 2.13 - Demonstração de fluxo homogêneo.

Fonte: Chaves, 2012 - Adaptado.

## 2.7.2 FLUXO HETEROGÊNEO

O fluxo heterogêneo é caracterizado pela variação da concentração de partículas ao longo da seção transversal do tubo. Ocasionalmente, mesmo quando em suspensão plena, partículas mais pesadas se dirigem para o fundo enquanto partículas mais leves se mantêm na porção superior da corrente (CHAVES, 2012).

Os fluxos heterogêneos podem exibir uma complexa variação de padrões de escoamento dependendo da velocidade do fluido, propriedades do líquido e dos sólidos, velocidade e concentração de sólidos (EL-NAHHAS et al. 2009).

De maneira generalizada, o fluxo heterogêneo pode ser dividido em fluxo com leito fixo ou móvel.

### 2.7.2.1 FLUXO COM LEITO MÓVEL

O fluxo com leito móvel ocorre quando parte da corrente de partículas sólidas se acumula no leito da tubulação, porém continua em movimento (Figura 2.15). Partículas mais grossas apresentam potencial de rolar por cima das partículas mais finas já depositadas (CHAVES, 2012).

A Figura 2.14 mostra, em equipamento de mineroduto piloto, fluxo com leito móvel de polpa de água com areia.

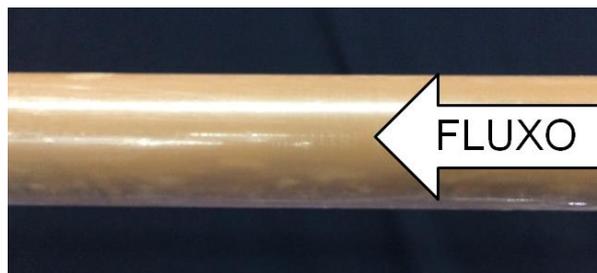


Figura 2.14 - Demonstração experimental de fluxo com leito móvel.

Fonte: Autor, 2016.



Figura 2.15 - Demonstração de fluxo com leito móvel.

Fonte: Chaves, 2012 - Adaptado.

### 2.7.2.2 FLUXO COM LEITO FIXO

O fluxo com leito fixo é uma das situações mais indesejadas no transporte de polpas heterogêneas, pois ocorre mediante depósito gradativo de material sólido no leito da tubulação (Figura 2.17), o que pode ocasionar obstrução da tubulação (CHAVES, 2012).

Segundo Amorim et al. (2015), em seus experimentos, foi possível verificar que a formação de leito fixo faz com que a perda de carga aumente devido a redução no diâmetro da tubulação causada pela deposição do material.

A Figura 2.16 mostra, em equipamento de mineroduto piloto, fluxo com leito fixo de polpa de água com a fração fina de areia.

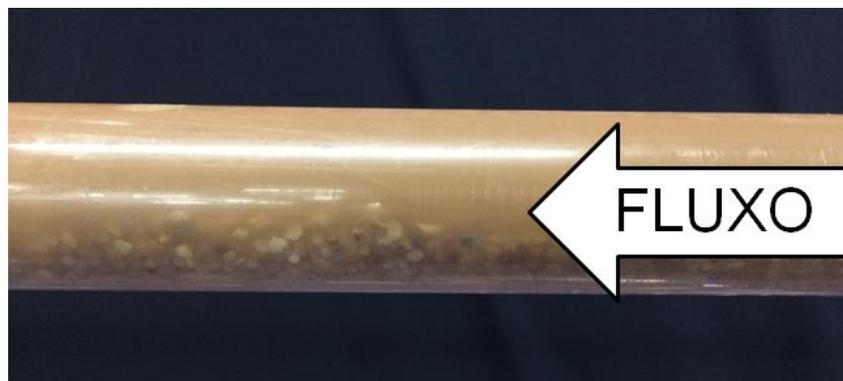


Figura 2.16 - Demonstração experimental de fluxo com leito fixo.

Fonte: Autor, 2016.

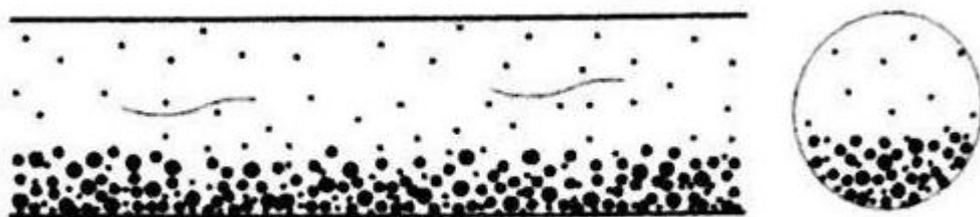


Figura 2.17 - Demonstração de fluxo com leito fixo.

Fonte: Chaves, 2012 - Adaptado.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 MÉTODO EXPERIMENTAL

##### 3.1.1 RELAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO

O experimento foi realizado em uma unidade piloto de mineroduto (Figura 3.1), localizada no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília, Santos – SP.

A unidade era composta por:

- a) Um tanque em acrílico transparente com capacidade de 45,35 L provido de quatro chicanas feitas do mesmo material e construídos de acordo com a geometria de Rushton (MORAES JR., D & MORAES, M. S., 2011), ou seja, a medida do diâmetro interno do tanque era igual à altura máxima que o conteúdo do tanque ocupava, e a largura das chicanas possuíam 1/10 da medida do diâmetro interno do tanque (Figura 3.2).
- b) Uma bomba centrífuga contendo rotor aberto de 100 mm e acoplada a motor de 1 hp (Figura 3.3).
- c) Agitador do tipo turbina com duas pás inclinadas a 45°, acoplado a motor de 0,25 hp. O agitador foi construído de acordo com a geometria proposta por Rushton (MORAES JR., D & MORAES, M. S., 2011), ou seja, a medida do diâmetro do impelidor do agitador era igual a 1/3 da medida do diâmetro interno do tanque (Figura 3.4).
- d) Tubulação de PVC transparente de 1 (uma) polegada, e diâmetro interno 27,5 mm e seus acessórios
- e) Tubos piezômetros conectados, via mangueiras de borracha, na porção superior da tubulação por meio de tomadas distando 1,20 m entre si (Figura 3.5).
- f) Mangueira flexível para coleta de material (Figura 3.6), que permitiu com que o fluxo de polpa pudesse ser desviado para fora do tanque e coletado em um recipiente para pesagem e determinação do volume.

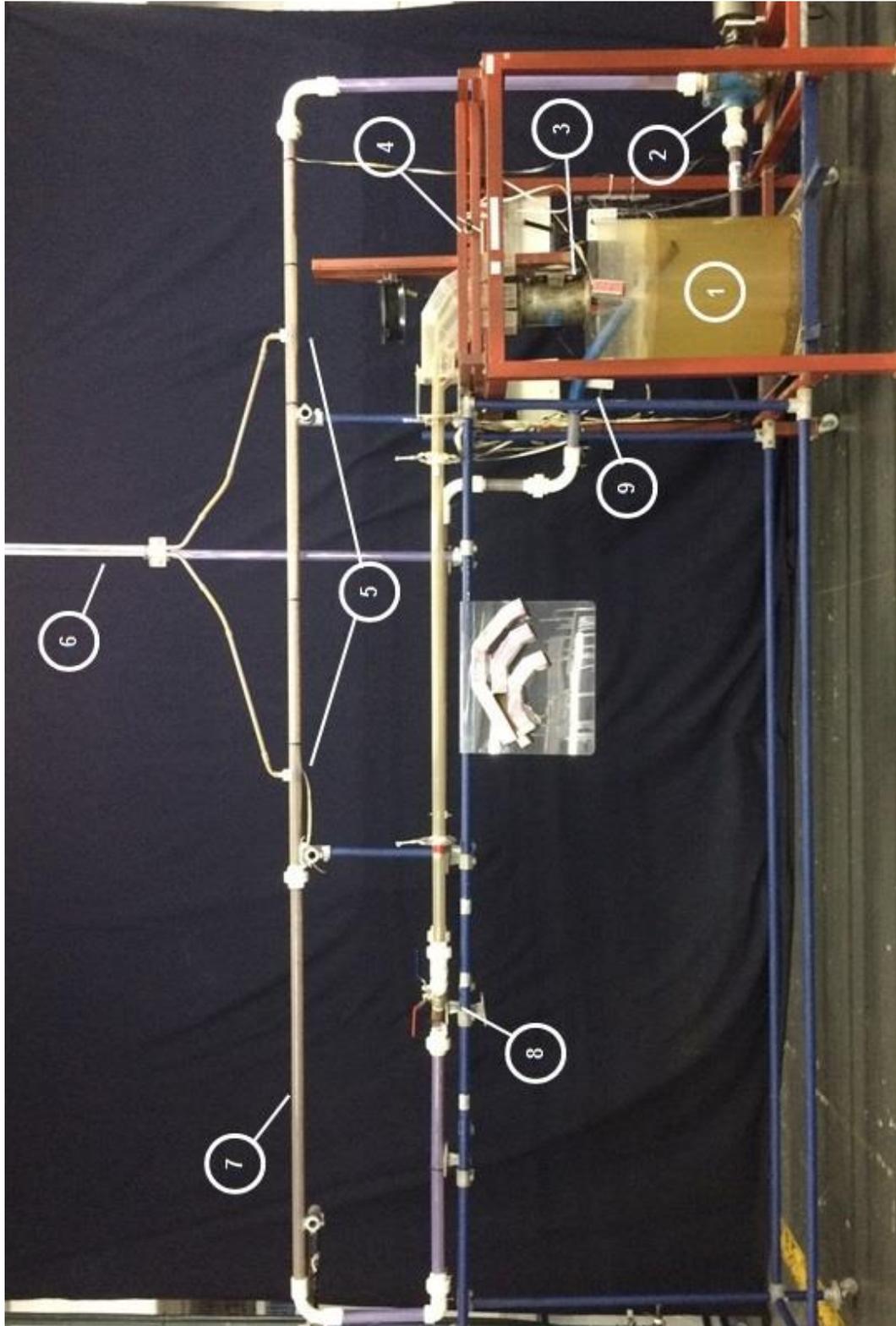
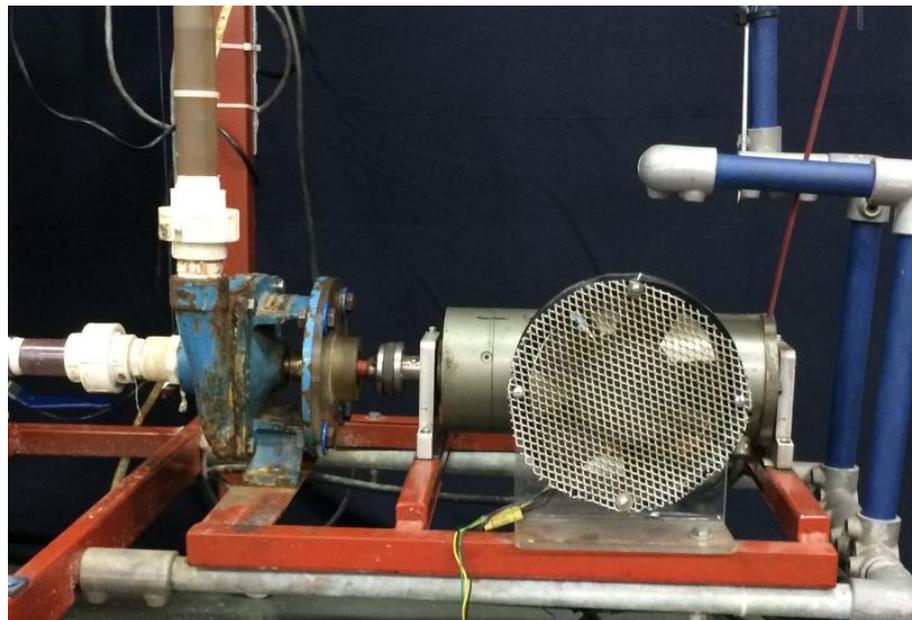


Figura 3.1 - Unidade piloto de mineroduto do Laboratório de Operações Unitárias Santa Cecília.

1) Tanque em acrílico provido de quatro chicanas; 2) Bomba centrífuga; 3) Agitador; 4) Controladores de velocidade da bomba e do agitador; 5) Tomadas de pressão para conexão dos piezômetros; 6) Piezômetros; 7) Tubulação em PVC transparente; 8) Válvulas de esfera para controle da distribuição do fluxo; 9) Mangueira flexível para coleta de polpa.



**Figura 3.2 - Tanque de acrílico provido de chicanas com capacidade de 45,35 L.**



**Figura 3.3 - Bomba centrífuga com rotor de 100 mm e motor de 1 hp.**



Figura 3.4 - Agitador do tipo turbina com duas pás inclinadas a 45° acoplado a motor de 0,25 hp.

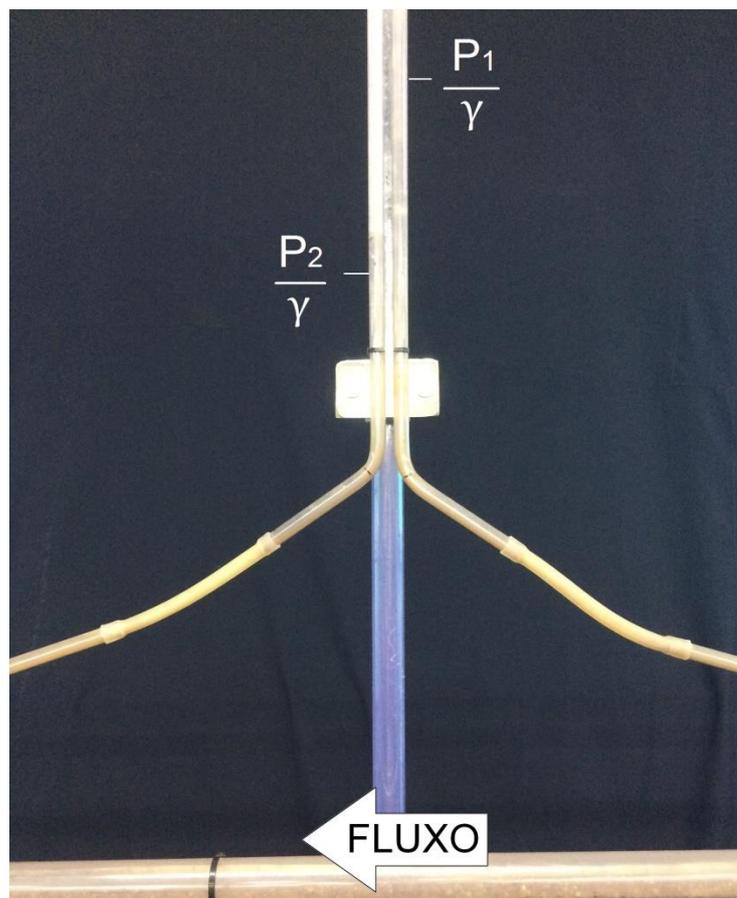


Figura 3.5 - Tubos piezométricos com demonstração de leitura da perda de carga.



**Figura 3.6 - Mangueira flexível para coleta de polpa.**

### **3.1.2 CONDICIONAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DA AREIA**

Com o intuito de garantir ausência total de umidade, a areia foi fracionada e todas as partes postas em uma estufa, mantida a 120°C, e constantemente pesadas até obter-se massa constante o que indicou que a água no material havia evaporado. Após a secagem, a areia foi estocada em ambiente seco com umidade controlada pela presença de cristais de sílica (Figura 3.7).



**Figura 3.7 - Caixa acrílica com areia estocada e cristais de sílica.**

A granulometria da areia utilizada foi medida em peneiras de 16, 32, 50, 100, 200 e 400 mesh, pois, segundo Chaves (2012) a granulometria da areia utilizada na

indústria de fabricação de vidro possui especificação granulométrica compreendida entre 20 e 140 mesh. Uma peneira com classificação mesh maior e duas com classificações menores foram utilizadas para aumentar a precisão das classificações granulométricas. Foram realizados testes com 100, 200 e 300g de areia, colocados em peneira vibratória (Figura 3.8) por 15 e 20 minutos, totalizando 6 testes (Resultados nas tabelas dos apêndices A e B).



**Figura 3.8 - Peneiramento vibratório (Aberturas decrescentes de cima para baixo).**

Como proposto por Durand (1952 apud Chaves 2012), as porcentagens de material passante e os diâmetros das aberturas das peneiras em que 60%, 50% e 10% ( $d_{60}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{10}$  respectivamente) do material retido foram calculados por meio de interpolação linear, e o coeficiente de uniformidade do material ( $C_U$ ) definido, conforme Equação 2.1.

### **3.1.3 PREPARAÇÃO DA POLPA**

A polpa de areia e água foi preparada no tanque da unidade de bancada até que o volume total atingisse a linha demarcada (Figura 3.9) traçada experimentalmente para atuar como agente limitante na operação garantindo que não houvesse perda de material por respingos ou transbordo mesmo que em agitação plena.



**Figura 3.9 - Tanque de acrílico preenchido com polpa de água e areia até a demarcação determinada experimentalmente para evitar respingos.**

O volume útil da unidade foi calculado pela Equação 3.1, que estipula que o volume útil deve ser o volume total descontando-se o volume ocupado pelas quatro chicanas.

$$V_U = V_T - 4 \cdot V_C \quad (3.1)$$

Em que:

$V_U$  é o volume útil (L);

$V_T$  é o volume total do tanque (L);

$V_C$  é o volume de cada chicana (L).

O experimento trabalhou com concentrações volumétricas, portanto, deve-se controlar a adição do volume de areia e água. Devido à dificuldade de trabalhar com volume de sólidos, foi controlada a adição em massa dos dois compostos, utilizando

as densidades dos materiais, 2,65 kg/L (GREEN, D.W., PERRY, R.H., 2008) e 1,0 kg/L para areia e água respectivamente.

Com o volume do tanque calculado, foi possível determinar a quantidade de cada uma das substâncias, água e areia. Para a preparação da polpa contendo 2 % de concentração volumétrica de areia, foi estimado, a princípio, o volume de areia que seria utilizado.

$$V_{\text{AREIA}} = V_U \cdot 0,02 \quad (3.2)$$

Como o tanque possui 45,35 L de volume útil, tem-se:

$$V_{\text{AREIA}} = 45,35 \text{ L} \cdot 0,02 \quad (3.3)$$

$$V_{\text{AREIA}} = 0,91 \text{ L} \quad (3.4)$$

Utilizando o valor da densidade da areia, foi possível calcular a quantidade em massa deste minério que foi adicionada ao tanque.

$$m_{\text{AREIA}} = 0,91 \text{ L} \cdot 2,65 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \quad (3.5)$$

$$m_{\text{AREIA}} = 2,40 \text{ kg} \quad (3.6)$$

Com a finalidade de calcular a quantidade de água que foi utilizada, o volume da areia foi subtraído do volume útil.

$$V_{\text{ÁGUA}} = V_U - V_{\text{AREIA}} \quad (3.7)$$

$$V_{\text{ÁGUA}} = 45,35 \text{ L} - 0,91 \text{ L} \quad (3.8)$$

$$V_{\text{ÁGUA}} = 44,44 \text{ L} \quad (3.9)$$

Utilizando o valor da densidade da água, foi possível calcular a quantidade em massa deste líquido.

$$m_{\text{ÁGUA}} = 44,44 \text{ L} \cdot 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \quad (3.10)$$

$$m_{\text{ÁGUA}} = 44,44 \text{ kg} \quad (3.11)$$

O mesmo procedimento foi feito no preparo da polpa contendo 5 % de teor volumétrico de sólidos.

As massas de areia e água foram medidas por meio de balança analógica, e utilizou-se os valores de densidade de ambos para determinar, então, o volume das substâncias. Para as concentrações utilizadas, a Tabela 3.1 mostra os valores de massa e volume utilizados para areia e água durante o experimento.

**Tabela 3.1 - Valores de massa e volume estudados.**

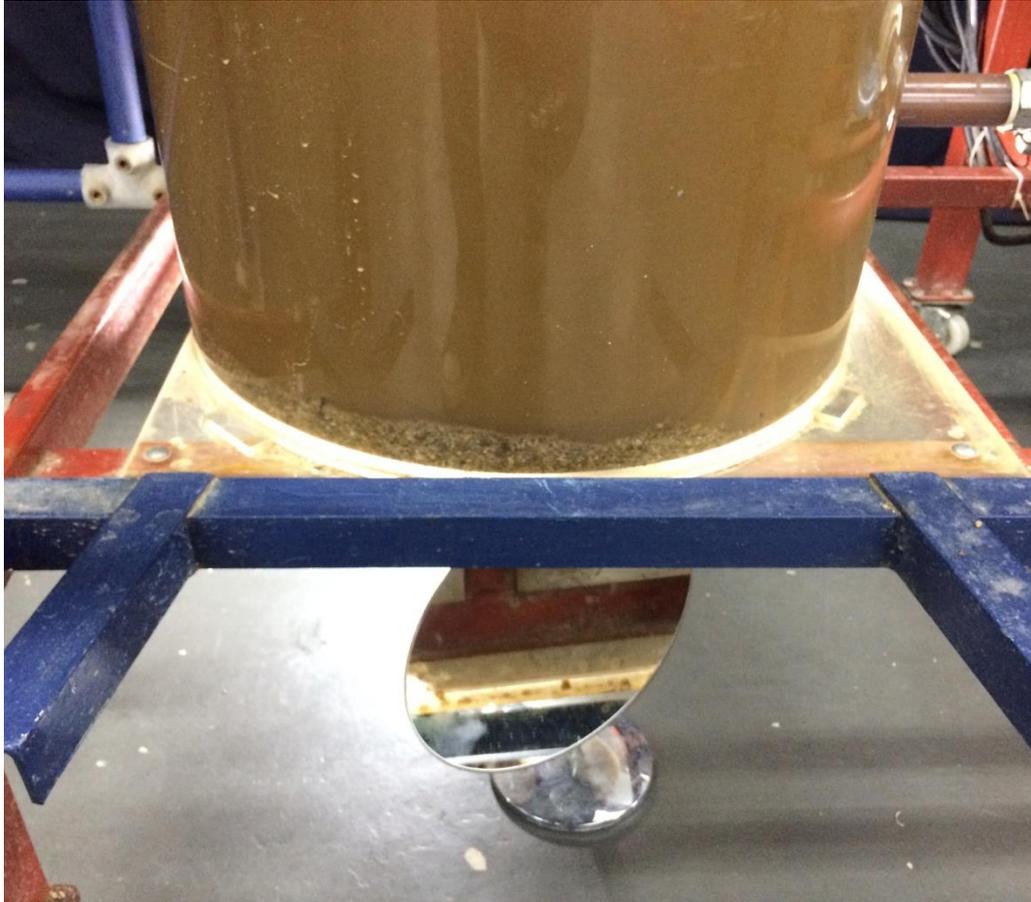
Concentração Volumétrica (%)	Quantidades			
	Massa (kg)		Volume (l)	
	Areia	Água	Areia	Água
2	2,40	44,44	0,91	44,44
5	6,01	43,08	2,27	43,08

### 3.1.4 PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Por tratar-se de uma polpa heterogênea, a agitação foi mantida pela ação do impelidor até suspensão plena ser atingida. Para garantir a homogeneidade da suspensão o método proposto por Zwietering, chamado *off-bottom* foi utilizado. A polpa permaneceu em agitação e a velocidade do impelidor foi gradativamente aumentada até que, pelas laterais do tanque não fossem observados pontos sem agitação por um tempo superior a 2 segundos (PAUL et al., 2004).

A aplicação do critério de Zwietering foi possível devido à transparência da parede e do fundo do tanque. Com o auxílio de um espelho e de uma luminária (Figura 3.10), todas as perspectivas da porção inferior do tanque (lateral e fundo) puderam ser verificadas para garantir suspensão completa.

O monitoramento da rotação do agitador, depois de estabelecida a suspensão plena, foi feito com o uso de tacômetros durante todo o ensaio (desde o acionamento da bomba até a coleta da polpa) para que não houvesse alteração da condição de dispersão das partículas.



**Figura 3.10 - Aplicação do critério de Zwietering com a utilização de espelho e luminária.**

Uma vez em suspensão, a bomba foi acionada e sua velocidade de rotação foi gradativamente elevada. A polpa foi bombeada através da tubulação e o controle de rotação da bomba foi ajustado até que a polpa preenchesse ambos os tubos piezômetros.

A leitura da perda de carga só pôde ser feita após a estabilização dos níveis de polpa que preenchiam os tubos piezômetros. A estabilização foi necessária, pois os níveis oscilavam, o que dificultava a medição.

Após a estabilização dos níveis de polpa nos dois tubos piezométricos, a leitura da perda de carga foi feita medindo a diferença entre os níveis de líquido dos dois tubos com o auxílio de uma régua graduada.

Enquanto a leitura foi feita, o sistema permaneceu em regime permanente, ou seja, a polpa bombeada retornava ao tanque. Após a leitura da perda de carga, o circuito de válvulas foi ajustado a fim de que a vazão da descarga fosse direcionada para o ponto de coleta, munida de mangueira flexível, o que possibilitou que o fluxo fosse direcionado para um recipiente previamente pesado.

O processo de coleta de polpa teve o tempo registrado em três cronômetros e a média dos valores de tempo foi utilizada. As medidas internas do recipiente em que a polpa foi coletada foram registradas (largura, comprimento e altura do nível atingida pela polpa em cada ensaio). As massas do recipiente cheio e vazio também foram registradas.

A razão entre a massa e o volume da polpa, encontrados experimentalmente, possibilitou a determinação da densidade experimental, e a divisão de massa e volume pelo tempo médio de coleta de polpa possibilitou a determinação das vazões mássicas e volumétricas respectivamente.

O mesmo foi feito para as concentrações de 2 e 5 % em volume.

### 3.1.5 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

A polpa bombeada foi coletada em recipiente com formato de paralelepípedo (Figura 3.11) cujas medidas de base e comprimento internos eram conhecidas. A altura do fluido, após o tempo de coleta, foi medida, o que possibilitou estabelecer o volume.

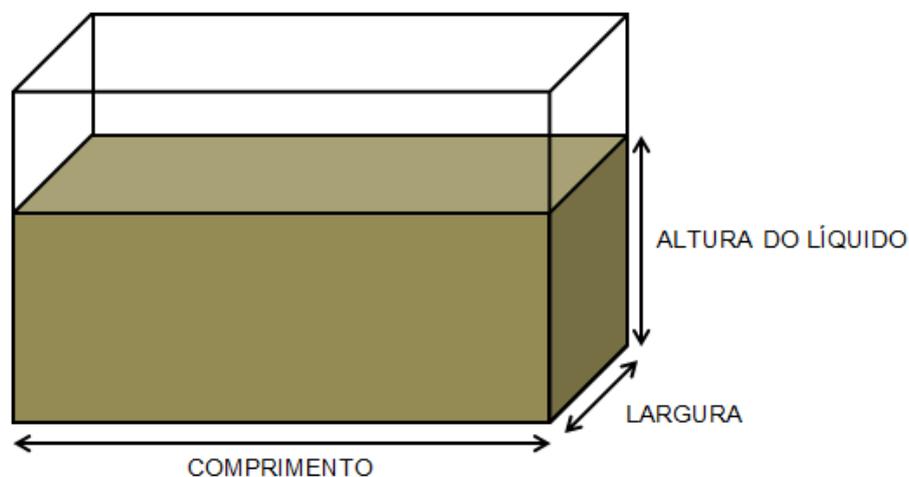


Figura 3.11 - demonstração da caixa de coleta de polpa.

De posse do volume coletado e do tempo de coleta, foi possível determinar a vazão volumétrica do ensaio pela equação 3.12.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.12)$$

Em que:

Q é a vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s);

V é o volume (m<sup>3</sup>);

t é o tempo (s).

Através da equação da continuidade (Equação 3.13), que relaciona área de escoamento com velocidade, foi possível obter a velocidade em que a polpa fluía pela da tubulação.

$$Q = v \cdot A \quad (3.13)$$

Em que:

Q é a vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s);

v é a velocidade (m/s);

A é a área transversal da tubulação (m<sup>2</sup>).

### **3.1.6 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA PELO BALANÇO DE ENERGIA MECÂNICA**

A perda de carga na tubulação foi determinada pela utilização da equação de Bernoulli (Equação 3.14).

$$H = \frac{\Delta P}{\gamma} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta z + l_w \quad (3.14)$$

Em que:

$l_w$  é a perda de carga entre os pontos estudados (m.c.a.);

$\Delta P/\gamma$  é a diferença de pressão estática entre os pontos estudados (m.c.a.);

$\Delta v$  é diferença entre as velocidades entre os pontos estudados (m/s);

$g$  é a aceleração gravitacional local (9,81 m/s<sup>2</sup>);

$\Delta z$  é o desnível entre os pontos estudados (m);

$H$  é a altura manométrica de máquinas motrizes entre os pontos estudados (m).

A equação 3.14 foi simplificada sabendo que a diferença entre as velocidades entre os pontos estudados era desprezível, não houve diferença entre os desníveis, e não havia presença de máquinas motrizes entre os pontos estudados.

Portanto foi considerado que a perda de carga entre os pontos estudados seria representativa somente no termo que relaciona os níveis de fluido mostrados nos piezômetros (Equação 3.15).

$$l_w = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (3.15)$$

Vários ensaios foram feitos aumentando gradativamente a rotação da bomba para elaboração da curva relacionando perda de carga com velocidade.

### 3.1.7 DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE

Dispondo dos valores experimentais de velocidade, perda de carga e densidade foi possível determinar a viscosidade aparente pela relação de equações e propriedades físicas.

A equação 3.16 desenvolvida pro Darcy-Weisbach permitiu o cálculo da perda de carga.

$$l_w = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.16)$$

O fator de atrito (f) pôde ser determinado pela equação de Swamee (Equação 3.17).

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-1,6} \right\}^{0,125} \quad (3.17)$$

O número de Reynolds, que relaciona as forças inercia pelas forças viscosas pode ser expresso como demonstrado na equação 3.18.

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (3.18)$$

Isolando o termo do fator de atrito na equação 3.16 e colocando-o na equação 3.17, foi possível determinar o número de Reynolds (Re) e inserindo-o na equação 3.18, pôde-se calcular o valor da viscosidade aparente do fluido ( $\mu$ ).

O mesmo procedimento foi feito com água destilada para validação do equipamento e do método.

### 3.1.8 CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA

Objetivando confirmar os dados de perda de carga para as polpas de 2% e 5%, o equipamento foi esvaziado, limpo e alimentado com água destilada para comparar os dados experimentais com os da literatura.

A perda de carga teórica foi calculada pela equação de Fair-Whipple-Hsiao (Equação 3,19) e o desvio padrão entre a perda de carga teórica e experimental foi medido.

$$l_w = L \cdot 0,00086 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (3,19)$$

### 3.1.9 CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE

Visando verificar os dados de viscosidade encontrados para as polpas de 2% e 5%, o equipamento foi esvaziado, limpo e alimentado com água destilada para comparar os dados experimentais com os da literatura.

O mesmo procedimento descrito nos itens 3.1.5 a 3.1.7 foi seguido para o experimento trabalhado somente com água. Os dados de perda de carga, velocidade de escoamento e densidade foram anotados e comparados com os da literatura.

## 3.2 MÉTODO TEÓRICO

### 3.2.1 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO TEÓRICA

A velocidade de deposição teórica para cada uma das concentrações trabalhadas, velocidade mínima do escoamento para que não haja deposição de material no decorrer do transporte da polpa, foi determinada pelo método algébrico explícito na equação 3.20.

$$V_D = FL \cdot \sqrt{\left[ 2 \cdot g \cdot D \cdot \left( \frac{\rho_S - \rho_P}{\rho_P} \right) \right]} \quad (3.20)$$

Como recomendado por Chaves (2012) foi acrescentado os valores de 0,3 e 0,5 m/s no resultado da velocidade de deposição encontrada para estimar-se a velocidade de projeto de uma linha.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 VALIDAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

Na operação com água pura foram obtidos os resultados de perda de carga em função da velocidade demonstrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Desvios padrão entre perda de carga experimental e teórica para água.

<b>Perda de Carga Experimental (m)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Perda de Carga pela Equação de Darcy-Weisbach (m)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>
0,11	1,57	0,00093	0,13	1,62
0,12	1,60	0,00095	0,14	1,23
0,13	1,66	0,00099	0,15	1,53
0,13	1,68	0,00100	0,15	1,39
0,15	1,79	0,00106	0,17	1,57
0,18	1,92	0,00114	0,19	1,00

Como os desvios padrão foram considerados baixos (menor que 2%), o método de medição de perda de carga foi validado.

### 4.2 CLASSIFICAÇÃO DA AREIA

A Tabela 4.2 mostra os valores obtidos para d60, d10, d50 e os coeficientes de uniformidade das amostras, bem como seus respectivos valores médios para uso nos cálculos.

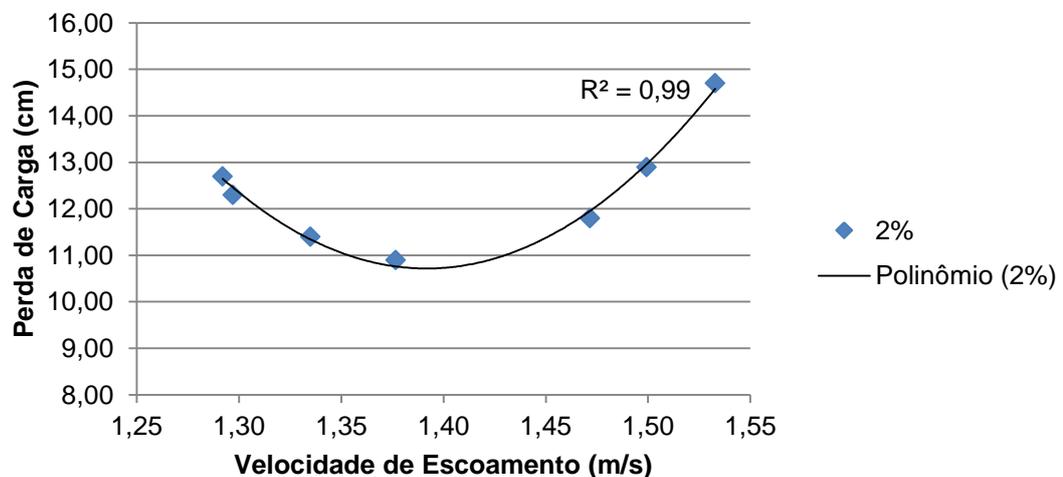
Foi possível, então, estipular que o coeficiente de uniformidade médio da areia utilizada nos ensaios permaneceu abaixo de 5 (cinco) indicando, portanto, que a distribuição granulométrica da areia foi muito uniforme, segundo método proposto por Caputo (1973 apud Chaves, 2012).

**Tabela 4.2 - Dimensões das aberturas das peneiras e coeficiente de uniformidade das amostras de areia.**

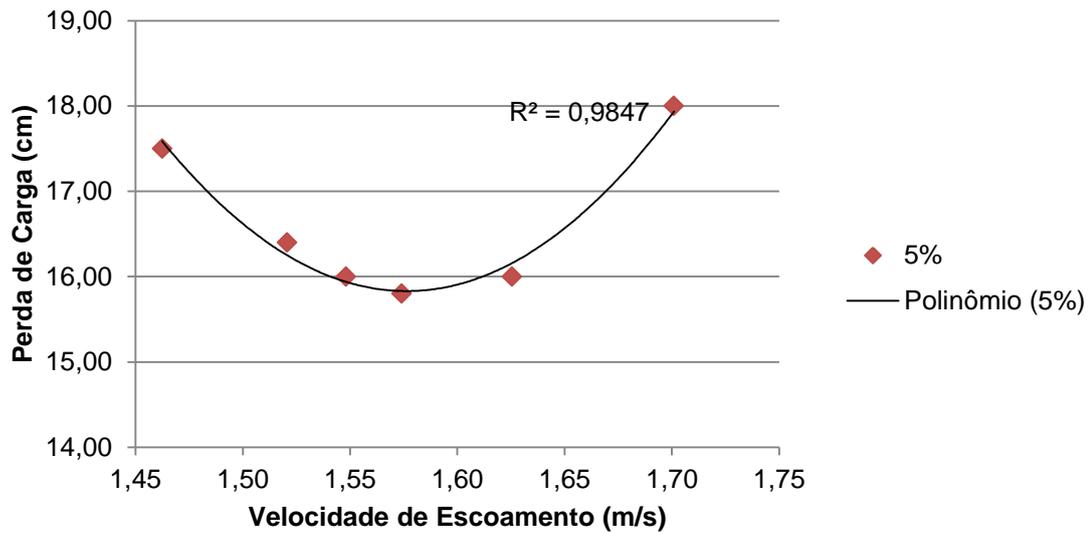
Tempo de Teste (min)	Massa da Amostra (g)	d60 (mm)	d10 (mm)	d50 (mm)	Coefficiente de Uniformidade (C <sub>u</sub> )
15	298,07	0,561	0,145	0,481	3,87
	199,28	0,538	0,141	0,446	3,82
	99,12	0,559	0,144	0,462	3,88
20	299,4	0,528	0,139	0,438	3,80
	199,87	0,534	0,144	0,452	3,71
	99,82	0,564	0,153	0,484	3,69
VALORES MÉDIOS	-	0,547	0,144	0,461	3,79

### 4.3 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO EXPERIMENTAL

Os dados presentes nas tabelas do Apêndice C foram compilados nos gráficos que relacionam perda de carga com velocidade de escoamento (Figuras 4.1 e 4.2).



**Figura 4.1 - Perda de Carga em função da velocidade para a polpa de 2%.**



**Figura 4.2 - Perda de Carga em função da velocidade para a polpa de 5%.**

Pode-se observar nas figuras 4.1 e 4.2 que com a redução da velocidade de escoamento, os valores de perda de carga aumentaram. Isso ocorre, pois, sem a devida turbulência, as partículas sólidas em polpas heterogêneas tendem a decantar, o que reduz o diâmetro útil da tubulação, elevando a perda de carga.

Com o aumento da velocidade, o valor da perda de carga foi gradativamente reduzido até que o sistema atingiu a velocidade de deposição, em que as partículas não decantam. A partir deste ponto, a perda de carga do sistema começou a aumentar devido somente à velocidade de escoamento.

Na curva dos ensaios com a polpa de 2 % de teor de areia foi possível estimar que o valor de velocidade mínimo é aproximadamente 1,39 m/s, enquanto nos ensaios com a polpa de 5% foi possível estabelecer uma velocidade de escoamento mínima de aproximadamente 1,57 m/s.

Tentou-se realizar o trabalho com polpa heterogênea contendo 10% em volume de concentração de areia, porém, devido às dimensões do equipamento, o experimento não pode ser concluído. A Figura 4.3 mostra a obstrução causada pela alta concentração de sólidos da polpa.



Figura 4.3 - Entupimento na tubulação devido à alta concentração de sólidos gerou necessidade de interrupção do experimento para manutenção da planta piloto.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO TEÓRICA

Após a classificação da granulometria da areia, foram determinados os valores de velocidade de deposição teóricos através do método proposto por Durand (1952 apud Chaves, 2012).

Como a areia se enquadrava na classificação “muito uniforme” o gráfico correspondente foi utilizado para determinação do fator FL (Figura 4.4).

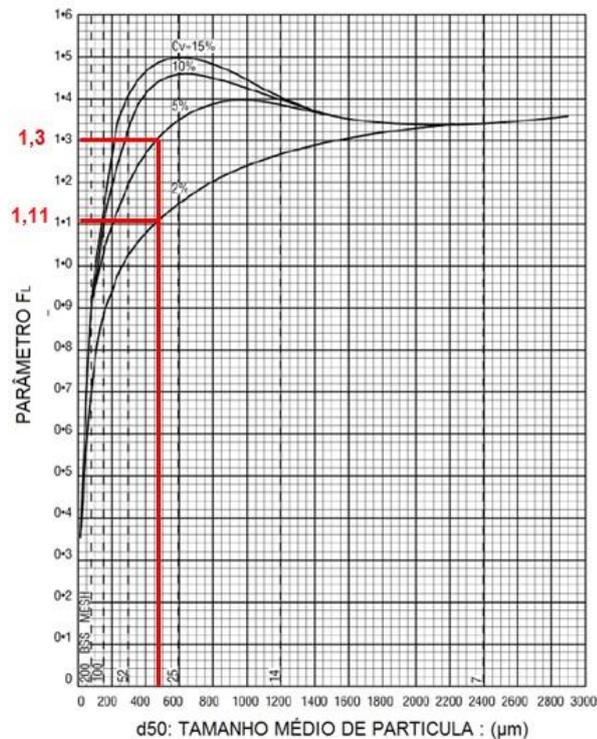


Figura 4.4 - Fator FL para as condições trabalhadas.

Fonte: WARMAN, 2009 - Adaptado.

Chaves (2012) recomenda que seja acrescido um valor de 0,3 a 0,5 m/s ao valor de velocidade de deposição estimado pelo método de Durand. Logo para a polpa de 2 % têm-se os limites de velocidade de 1,33 e 1,53 m/s e para a polpa de 5 %, obteve-se 1,48 e 1,68 m/s (Cálculos no Apêndice D).

As tabelas 4.3 e 4.4 mostram os valores de desvios padrão das velocidades experimentais com as respectivas velocidades de deposição teóricas.

**Tabela 4.3 – Desvios padrão – Ensaio com polpa de 2 %**

	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>
<b>V<sub>D</sub> (Experimental)</b>	1,39	-
<b>V<sub>D</sub> (Teórico + 0,3 m/s)</b>	1,33	4,24
<b>V<sub>D</sub> (Teórico + 0,5 m/s)</b>	1,53	9,90

**Tabela 4.4- Desvios padrão - Ensaio com polpa de 5 %.**

	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>
<b>V<sub>D</sub> (Experimental)</b>	1,57	-
<b>V<sub>D</sub> (Teórico + 0,3 m/s)</b>	1,48	6,36
<b>V<sub>D</sub> (Teórico + 0,5 m/s)</b>	1,68	7,78

#### **4.5 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VISCOSIDADE APARENTE**

Os ensaios possibilitaram também a determinação da viscosidade aparente das polpas de 2 % e 5 % através da utilização das equações de Reynolds, Swamee e Darcy-Weisbach. As tabelas de dados para cálculo dos valores de viscosidade e uma demonstração do cálculo utilizado encontram-se nos Apêndices E e F respectivamente.

As figuras 4.5 e 4.6 mostram os valores de viscosidade aparente para as polpas de 2 e 5 % conforme a velocidade média de escoamento variou.

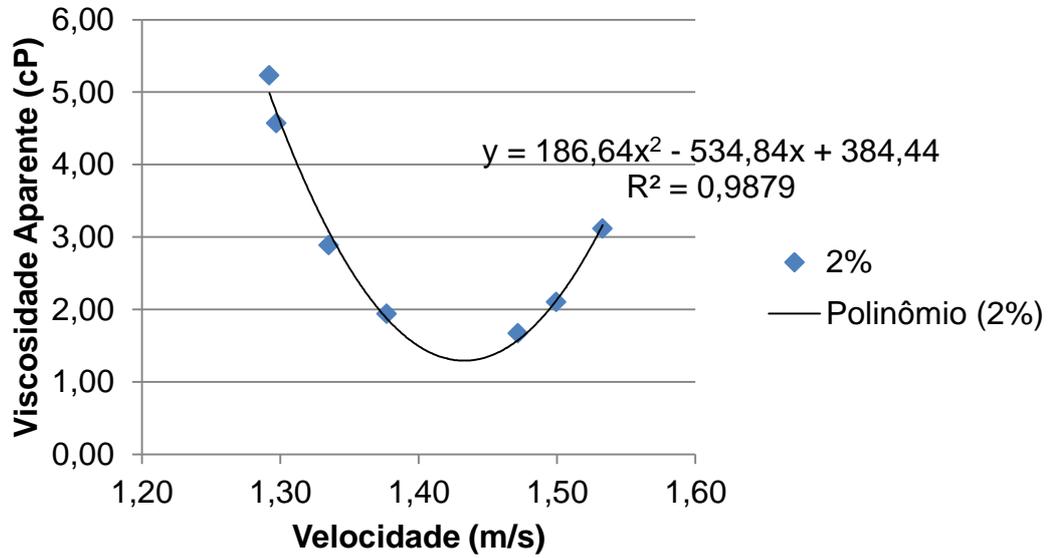


Figura 4.5 - Viscosidade aparente em função da velocidade média para a polpa de 2 %.

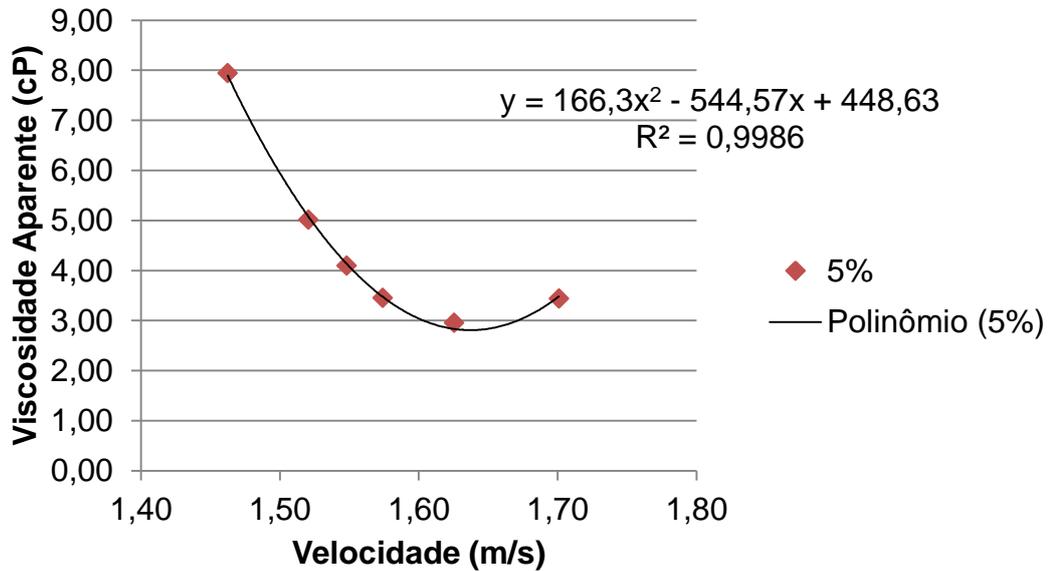


Figura 4.6 - Viscosidade aparente em função da velocidade média para a polpa de 5 %.

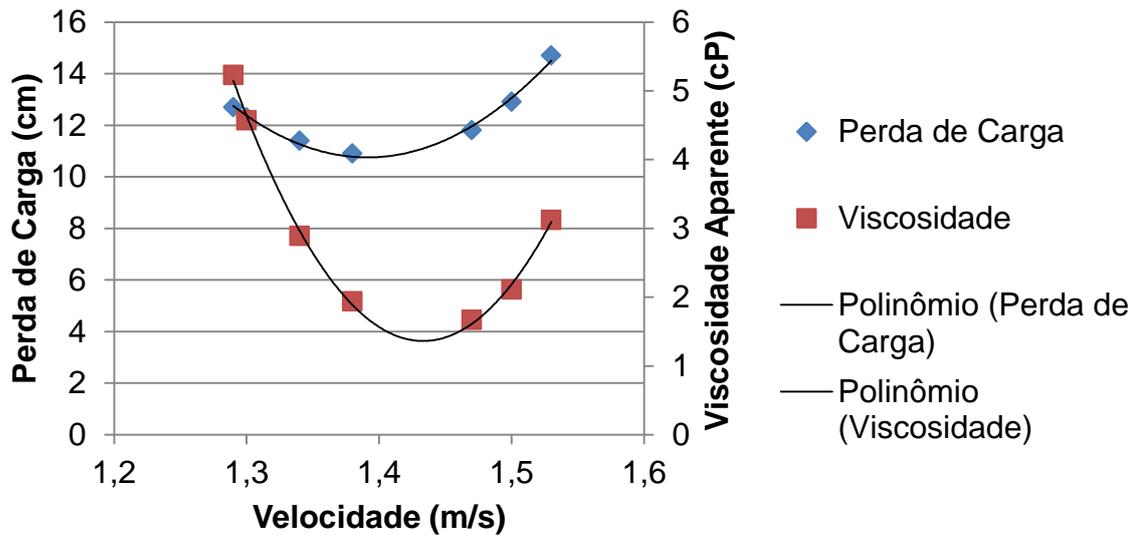


Figura 4.7 - Perda de carga e viscosidade aparente em função da velocidade para a polpa de 2%.

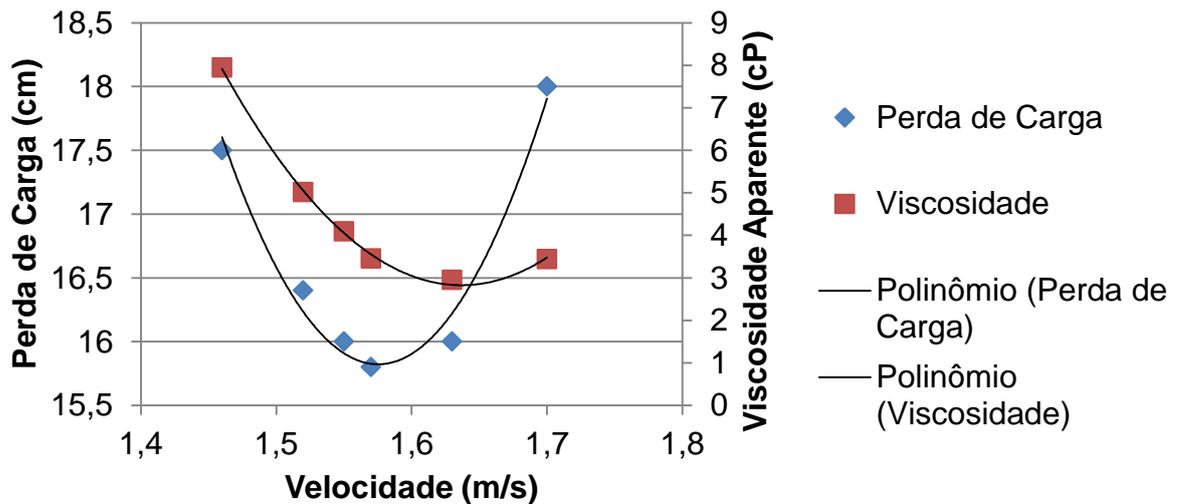


Figura 4.8 - Perda de carga e viscosidade aparente em função da velocidade para a polpa de 5%.

Nas figuras 4.7 e 4.8 foi possível perceber que a variação da viscosidade aparente teve comportamento similar à variação de perda de carga conforme a velocidade foi variada.

Isso se dá, pois, segundo a literatura, a tensão de cisalhamento varia em função da quantidade de estresse (taxa cisalhante) que o fluido recebe, quando esta variação é linear, o coeficiente angular da reta, ou seja, a viscosidade dinâmica é

constante. Em fluidos dilatantes, como as polpas de areia e água, a tensão de cisalhamento varia de forma não linear, portanto o coeficiente angular da curva de tensão de cisalhamento pela taxa cisalhante, ou seja, a viscosidade dinâmica, não é constante.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

O trabalho experimental com polpa heterogênea de areia em água permitiu as seguintes conclusões:

- a) Ao confrontar os valores de velocidade de deposição experimental (1,39 e 1,57 m/s para as polpas de 2 e 5 % respectivamente) com os valores obtidos segundo método disposto na literatura (1,33 e 1,53 m/s para a polpa de 2 % e 1,48 e 1,68 m/s para a polpa de 5 %), foi possível constatar que em ambos os casos estudados a velocidade de deposição experimental encontra-se entre os dois valores calculados pelo método proposto por Durand (1952 apud Chaves, 2012) e com as alterações propostas por Chaves (2012), ou seja, adicionando ao valor de velocidade calculado um acréscimo de 0,3 a 0,5 m/s;
- b) Os desvios padrão entre velocidades experimentais e as obtidas através de método retirado da literatura (Chaves, 2012), com a adição de 0,3 m/s para as polpas de 2 e 5 % foram respectivamente 4,24% e 6,36% e com a adição de 0,5 m/s para as polpas de 2% e 5% foram, por essa ordem, 9,90% e 7,78%;
- c) O perfil de variação de viscosidade aparente foi similar ao perfil de variação da perda de carga, isto é, em função da velocidade média de escoamento.

### 5.2 SUGESTÕES

Visando a continuidade do estudo, sugere-se:

- a) Instalar medidores eletrônicos de vazão e pressão calibrados para maior velocidade de coleta de dados;
- b) Empregar uma bomba específica para transporte de polpa com o intuito de operar com concentrações mais elevadas de sólidos;

- c) Repetir o estudo com dutos de diferentes diâmetros e rugosidades, e com amostras de sólidos uniformes e não uniformes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, A. B., MORAES, M.S., SANTOS, A.R., MORAES JR, D., “Determinação da velocidade de deposição para transporte de polpa de areia em unidade piloto de mineroduto”, Unisanta, Santos, Brasil, 2015.

ANGLO AMERICAN, “Validação das Estratégias Operacionais do Projeto Minas-Rio usando Ferramentas de Simulação Computacional”, Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/DecisionScience/case-anglo-american-9561517>> Acessado em 10/11/2016.

B2B MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, Disponível em: <[http://www.b2bmaquinas.com.br/Anuncios/Construção\\_Civil/Componentes\\_E\\_Acessórios/peneiras\\_vibratórias/5099\\_426\\_5/](http://www.b2bmaquinas.com.br/Anuncios/Construção_Civil/Componentes_E_Acessórios/peneiras_vibratórias/5099_426_5/)> Acessado em 10/11/2016.

CHAVES, A. P., “Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Bombeamento de polpa e classificação”, Editora Oficina de Textos, 4ª Edição, Vol. 1, 2012.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F., “Non-Newtonian Flow and Applied Rheology”, Butterworth-Heinemann, 2nd Edition, 2011

ÇENGEL, Y. A., CIMBALA, J. M., Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, McGraw Hil, 2006

COKER, A. K., Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Volume 2, Fourth Edition, 2010.

DURAND, R. The hydraulic transportation of coal and solid materials in pipes. “Proceedings of the London Colloquium of the National Coal Board”, 1952.

EL-NAHHAS, K., EL-HAK, N. G., RAYANA, M. A., EL-SAWAF, I., “Effect of particle size distribution on the hydraulic transport of settling slurries”, 13<sup>th</sup> International Water Technology Conference, Hurghada, Egito, 2009.

FUSHEND, N., LIJUAN, Z., LIQUN, X., VALSBLOM, W. J., “A model calculation for flow resistance in the hydraulic transport of sand”, 18<sup>th</sup> World Dredging Congress, Orlando – FL EUA, 2007.

GREEN, D. W., PERRY, R. H., “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook, 8<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, 2008.

IBRAM, Informações sobre a economia mineral brasileira 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005957.pdf>> Acessado em 10/11/2016.

INDOFAB INDUSTRIES, Disponível em: <<http://www.disc-drumfilters.com/log-washers.html>> Acessado em 10/11/2016.

KULAIF, Y., “Areia para Construção – Sumário Mineral 2014”, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2015

MELLO, P. C, “Maior mineroduto do mundo começa a funcionar e deixa queixas”, Folha de São Paulo, 2014

MESSA, G., MALIN, M., MALAVASI, S., “Numerical prediction of fully-suspended slurry flow in horizontal pipes”, Powder Technology, Vol. 256, 2014.

MESSA, G.V., MALAVASI, S., “Concentration distribution and pressure gradient of particle-water slurry flows in horizontal pipes”, Escola Politécnica de Milão, Italia, 2012.

MONTANTE, G., MAGELLI, F., PAGLIANTI, L. A., “Particle Settling Velocity in Slurry Stirred Vessels”, 16<sup>th</sup> Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July, 2012.

MORAES JR., D.; SILVA, E.L., MORAES, M. S., Aplicações Industriais de Estática e Dinâmica dos Fluidos I, 2011.

MORAES JR., MORAES, M. S., “Laboratório de Operações Unitárias I”, Santos, Ed. dos Autores, 2011.

NABIL, T., EL-SAWAF, I., EL-NAHHAS, K., “Computational Fluid Dynamics Simulation of the Solid-Liquid Slurry Flow in a Pipeline”, 17<sup>th</sup> IWTC, Istanbul, Novembro 2013.

PAUL, L. E., ATIEMO-OBENG, V. A., KRESTA, S. M., “Handbook of Industrial Mixing – Science and Practice”, Wiley-Interscience, 2004

PEREIRA, F. N.; SEGUIM, M. C., “Projetos químicos e petroquímicos”. Editora Comunicar. Santos. 2012.

QUARESMA, L. F., “Perfil de areia para construção civil”, J.Mendo Consultoria, Agosto de 2009.

REGO, F. C. A., “Sistema de Beneficiamento de Areia para fins Industriais”, Escola de química, Rio de Janeiro, Outubro 2005.

SOUSA, J.S.C., NETO, J.D., “Equação explícita para o cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em projetos de irrigação pressurizada”, Irriga, Botucatu, 2014.

TEMPESTA, P., “Autorizações Ambientais: Uma comparação entre os quesitos no Brasil e na França. Revisa Areia & Brita, n. 66, p. 6-13, 2016.

WANG, (S) J., “Suspension of High Concentration Slurry in Agitated Vessels”, RMIT Univesity, Melbourne, March, 2010.

WARMAN, “Slurry Pump Handbook”, Electronic Version, Fifth Edition, February, 2009.

WASP, E. J., KENNY, J.P., GANDHI, R.L., “Solid-liquid flow slurry pipeline flow”, Proceedings of Hydrotransport 4, BHRA, 1993

WILSON, K.C., ADDIE, G.R., CLIFT, R. “Slurry transport using centrifugal pumps”, Londres, 1992.

**APÊNDICE A – Classificação de Areia após 15 minutos em agitação**

**APÊNDICE A1 - Tabela de Classificação de Areia após 15 minutos em agitação com massa de aproximadamente 300 g.**

<b>Mesh</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>D Médio (mm)</b>	<b>Massa Peneira Vazia (g)</b>	<b>Massa Peneira Cheia (g)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Fração Retida (%)</b>	<b>Fração Passante (%)</b>
16	1,0	0,75	425,84	485,90	60,06	20,15	79,85
32	0,5	0,40	351,47	459,68	108,21	36,30	43,55
50	0,3	0,225	304,55	357,12	52,57	17,64	25,91
100	0,15	0,1125	293,9	359,85	65,95	22,13	3,78
200	0,075	0,0565	390,99	399,75	8,76	2,94	0,85
400	0,038	0,019	379,14	381,16	2,02	0,68	0,17
Fundo			366,36	366,86	0,5	0,17	0,00
<b>TOTAL</b>					298,07		

**APÊNDICE A2 - Tabela de Classificação de Areia após 15 minutos em agitação com massa de aproximadamente 200 g.**

<b>Mesh</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>D Médio (mm)</b>	<b>Massa Peneira Vazia (g)</b>	<b>Massa Peneira Cheia (g)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Fração Retida (%)</b>	<b>Fração Passante (%)</b>
16	1,0	0,75	425,85	459,18	33,33	16,73	83,27
32	0,5	0,40	351,59	427,98	76,39	38,33	44,94
50	0,3	0,225	304,81	340,70	35,89	18,01	26,93
100	0,15	0,1125	294,00	339,13	45,13	22,65	4,29
200	0,075	0,0565	391,04	397,98	6,94	3,48	0,80
400	0,038	0,019	379,18	380,65	1,47	0,74	0,07
Fundo			366,4	366,53	0,13	0,07	0,00
<b>TOTAL</b>					199,28		

**APÊNDICE A3 - Tabela de Classificação de Areia após 15 minutos em agitação com massa de aproximadamente 100 g.**

<b>Mesh</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>D Médio (mm)</b>	<b>Massa Peneira Vazia (g)</b>	<b>Massa Peneira Cheia (g)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Fração Retida (%)</b>	<b>Fração Passante (%)</b>
16	1,0	0,75	425,66	442,01	16,35	16,50	83,50
32	0,5	0,40	352,49	395,65	43,16	43,54	39,96
50	0,3	0,225	304,61	320,78	16,17	16,31	23,65
100	0,15	0,1125	293,44	313,58	20,14	20,32	3,33
200	0,075	0,0565	391,01	393,62	2,61	2,63	0,70
400	0,038	0,019	379,13	379,76	0,63	0,64	0,06
Fundo			366,36	366,42	0,06	0,06	0,00
<b>TOTAL</b>					99,12		

**APÊNDICE B – Classificação de Areia após 20 minutos em agitação**

**APÊNDICE B1 - Tabela de Classificação de Areia após 20 minutos em agitação com massa de aproximadamente 300 g.**

<b>Mesh</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>D Médio (mm)</b>	<b>Massa Peneira Vazia (g)</b>	<b>Massa Peneira Cheia (g)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Fração Retida (%)</b>	<b>Fração Passante (%)</b>
16	1,0	0,75	425,68	475,67	49,99	16,70	83,30
32	0,5	0,40	351,61	483,00	131,39	43,88	39,42
50	0,3	0,225	304,6	355,80	51,20	17,10	22,32
100	0,15	0,113	293,94	351,44	57,50	19,21	3,11
200	0,075	0,057	391,00	398,46	7,46	2,49	0,62
400	0,038	0,019	379,10	380,90	1,80	0,60	0,02
Fundo			366,36	366,42	0,06	0,02	0,00
<b>TOTAL</b>					299,40		

**APÊNDICE B2 - Tabela de Classificação de Areia após 20 minutos em agitação com massa de aproximadamente 200 g.**

<b>Mesh</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>D Médio (mm)</b>	<b>Massa Peneira Vazia (g)</b>	<b>Massa Peneira Cheia (g)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Fração Retida (%)</b>	<b>Fração Passante (%)</b>
16	1,0	0,75	426,16	452,42	26,26	13,14	86,86
32	0,5	0,40	351,43	437,92	86,49	43,27	43,59
50	0,3	0,225	304,67	340,05	35,38	17,70	25,89
100	0,15	0,113	293,94	337,83	43,89	21,96	3,93
200	0,075	0,057	391,05	397,36	6,31	3,16	0,77
400	0,038	0,019	379,16	380,57	1,41	0,71	0,07
Fundo			366,37	366,50	0,13	0,07	0,00
<b>TOTAL</b>					199,87		

**APÊNDICE B3 - Tabela de Classificação de Areia após 20 minutos em agitação com massa de aproximadamente 100 g.**

<b>Mesh</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>D Médio (mm)</b>	<b>Massa Peneira Vazia (g)</b>	<b>Massa Peneira Cheia (g)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Fração Retida (%)</b>	<b>Fração Passante (%)</b>
16	1,0	0,75	425,9	441,14	15,24	15,27	84,73
32	0,5	0,40	351,63	390,48	38,85	38,92	45,81
50	0,3	0,225	304,68	322,71	18,03	18,06	27,75
100	0,15	0,113	294,00	317,24	23,24	23,28	4,47
200	0,075	0,057	390,97	394,53	3,56	3,57	0,90
400	0,038	0,019	379,10	379,84	0,74	0,74	0,16
Fundo			366,35	366,51	0,16	0,16	0,00
TOTAL					99,82		

### APÊNDICE C – Tabelas de Dados Experimentais

**APÊNDICE C1 – Tabela de Dados Experimentais para a polpa com 2 % de teor volumétrico de sólidos.**

<b>Perda de Carga (cm)</b>	12,70	12,30	11,40	10,90	11,80	12,90	14,70
<b>Volume (L)</b>	5,40	5,97	5,26	6,00	6,31	5,57	5,84
<b>Peso (Caixa + Polpa) (g)</b>	6,42	7,02	6,29	6,96	7,28	6,54	7,02
<b>Peso (Caixa) (g)</b>	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
<b>Peso (Polpa) (g)</b>	5,57	6,17	5,44	6,11	6,43	5,69	6,17
<b>Nível (Polpa) (cm)</b>	16,00	17,70	15,60	17,80	18,70	16,50	17,30
<b>Tempo 1 (s)</b>	7,03	7,75	6,53	7,25	7,12	6,25	6,44
<b>Tempo 2 (s)</b>	6,94	7,84	6,69	7,34	7,28	6,25	6,41
<b>Tempo 3 (s)</b>	7,13	7,66	6,69	7,44	7,25	-	6,38
<b>Tempo Médio( s)</b>	7,03	7,75	6,64	7,34	7,22	6,25	6,41
<b>Vazão Mássica (kg/s)</b>	0,79	0,80	0,82	0,83	0,89	0,91	0,96
<b>Vazão Volumétrica (L/s)</b>	0,77	0,77	0,79	0,82	0,87	0,89	0,91
<b>Velocidade (m/s)</b>	1,29	1,30	1,34	1,38	1,47	1,50	1,53
<b>Densidade Calculada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1033	1033	1033	1033	1033	1033	1033
<b>Densidade Real (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1032	1033	1034	1018	1019	1022	1057
<b>Desvio (%)</b>	0,10	0,03	0,07	1,52	1,34	1,05	2,29

**APÊNDICE C2 – Tabela de Dados Experimentais para a polpa com 5 % de teor volumétrico de sólidos.**

<b>Perda de Carga (cm)</b>	17,50	16,40	16,00	15,80	16,00	18,00
<b>Volume (L)</b>	5,60	5,60	6,07	5,77	5,80	5,94
<b>Peso (Caixa + Polpa) (g)</b>	6,85	6,88	7,39	6,96	7,06	7,23
<b>Peso (Caixa) (g)</b>	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
<b>Peso (Polpa) (g)</b>	6,00	6,03	6,54	6,11	6,21	6,38
<b>Nível (Polpa) (cm)</b>	16,60	16,60	18,00	17,10	17,20	17,60
<b>Tempo 1 (s)</b>	6,43	6,00	6,34	6,22	6,06	5,78
<b>Tempo 2 (s)</b>	6,41	6,00	6,72	6,10	6,03	5,97

**APÊNDICE C2 – Tabela de Dados Experimentais para a polpa com 5 % de teor volumétrico de sólidos (Continuação).**

<b>Tempo 3 (s)</b>	6,50	6,60	6,75	6,19	5,94	5,88
<b>Tempo Médio( s)</b>	6,45	6,20	6,60	6,17	6,01	5,88
<b>Vazão Mássica (kg/s)</b>	0,93	0,97	0,99	0,99	1,03	1,08
<b>Vazão Volumétrica (L/s)</b>	0,87	0,90	0,92	0,93	0,97	1,01
<b>Velocidade (m/s)</b>	1,46	1,52	1,55	1,57	1,63	1,70
<b>Densidade Calculada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1083	1083	1083	1083	1083	1083
<b>Densidade Real (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1071	1077	1077	1059	1070	1074
<b>Desvio (%)</b>	1,03	0,53	0,51	2,20	1,14	0,82

**APÊNDICE D – Velocidades de Deposição Teóricas para as polpas com 2% e 5% de teor de sólidos respectivamente.**

$$V_D(2\%) = FL. \sqrt{\left[2. g. D. \left(\frac{\rho_S - \rho_P}{\rho_P}\right)\right]}$$

$$V_D(2\%) = 1,12. \sqrt{\left[2. 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,0275 m. \left(\frac{2,65 \frac{kg}{l} - 1,031 \frac{kg}{l}}{1,031 \frac{kg}{l}}\right)\right]}$$

$$V_D(2\%) = 1,03 \frac{m}{s}$$

$$V_D(2\%) + 0,3m = 1,33 \frac{m}{s}$$

$$V_D(2\%) + 0,5m = 1,53 \frac{m}{s}$$

$$V_D(5\%) = FL. \sqrt{\left[2. g. D. \left(\frac{\rho_S - \rho_P}{\rho_P}\right)\right]}$$

$$V_D(5\%) = 1,33. \sqrt{\left[2. 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,0275 m. \left(\frac{2,65 \frac{kg}{l} - 1,071 \frac{kg}{l}}{1,071 \frac{kg}{l}}\right)\right]}$$

$$V_D(5\%) = 1,18 \frac{m}{s}$$

$$V_D(5\%) + 0,3m = 1,48 \frac{m}{s}$$

$$V_D(5\%) + 0,5m = 1,68 \frac{m}{s}$$

**APÊNDICE E – Tabela de Valores de Viscosidade Aparente**

**APÊNDICE E1 – Tabela de valores de viscosidade aparente para a polpa com 2 % de teor volumétrico de sólidos.**

<b>Perda de Carga (cm)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Densidade Real (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fator de Atrito</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Viscosidade Aparente (cP)</b>
12,70	1,29	1031,96	0,034	6151,91	5,23
12,30	1,30	1033,33	0,033	7114,34	4,57
11,40	1,34	1033,72	0,029	11792,51	2,89
10,90	1,38	1017,54	0,026	18017,92	1,94
11,80	1,47	1019,29	0,024	22528,49	1,67
12,90	1,50	1022,25	0,026	18186,55	2,11
14,70	1,53	1057,23	0,028	12859,70	3,12

**APÊNDICE E2 – Tabela de valores de viscosidade aparente para a polpa com 5 % de teor volumétrico de sólidos.**

<b>Perda de Carga (cm)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Densidade Real (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fator de Atrito</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Viscosidade Aparente (cP)</b>
17,50	1,46	1071,45	0,037	4749,01	7,94
16,40	1,52	1076,81	0,032	7957,64	5,01
16,00	1,55	1077,05	0,030	10001,11	4,09
15,80	1,57	1059,19	0,029	11933,07	3,45
16,00	1,63	1070,27	0,027	14628,04	2,95
18,00	1,70	1073,73	0,028	13146,35	3,44

### APÊNDICE F – Demonstração de Cálculo da Viscosidade Aparente

A demonstração do cálculo foi feita com o primeiro ponto do gráfico da polpa com concentração de 5%.

Perda de Carga (cm)	Velocidade (m/s)	Densidade Real (kg/m <sup>3</sup> )
17,50	1,46	1071,45

Utilizando a equação da perda de carga proposta por Darcy-Weisbach, tem-se:

$$l_w = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$f = \frac{l_w}{\left(\frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}\right)} \quad (2)$$

$$f = \frac{l_w \cdot D \cdot 2g}{L \cdot v^2} \quad (3)$$

$$f = \frac{0,175 \text{ m} \cdot 0,0275 \text{ m} \cdot 2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1,20 \text{ m} \cdot \left(1,46 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} \quad (4)$$

$$f = 0,037 \quad (5)$$

As equações de Reynolds e de Swamee podem ser combinadas como demonstrado

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{\frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{\left( \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{\frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (6)$$

Substituindo (5) em (6) e colocando os respectivos valores para diâmetro da tubulação, densidade, velocidade e rugosidade relativa ( $\varepsilon$ )

$$0,037 = \left\{ \left( \frac{64}{0,0275 \text{ m} \cdot 1,46 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1071,45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{\mu} \right)^8 \right. \quad (7)$$

$$+ 9,5 \cdot \ln \left( \frac{0,00 \text{ m}}{3,7 \cdot 0,0275 \text{ m}} \right)$$

$$+ \frac{5,74}{\left( \frac{0,0275 \text{ m} \cdot 1,46 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1071,45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{\mu} \right)^{0,9}}$$

$$- \left( \frac{2500}{0,0275 \text{ m} \cdot 1,46 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1071,45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{\mu} \right)^6 \left. \right\}^{-16} \quad 0,125$$

$$\mu = 0,00794 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \text{ ou } 7,94 \text{ cP} \quad (8)$$