

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia

Max Túlio Castro Ferreira

Caracterização da velocidade crítica
de deposição para o escoamento de
polpas minerais

São João del Rei
2020

Max Túlio Castro Ferreira

Caracterização da velocidade crítica de deposição para o escoamento de polpas minerais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, em Associação ampla entre a Universidade Federal de São João del Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Guillermo Vilalta Alonso

Coorientadora: Profa. Dra. Jacqueline Pedrera Yanes

São João del Rei

2020

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F383c Ferreira, Max Túlio Castro.
 Caracterização da velocidade crítica de deposição
 para o escoamento de polpas minerais / Max Túlio
 Castro Ferreira ; orientador Guillermo Vilalta
 Alonso; coorientadora Jacqueline Pedrera Yanes. --
 São João del-Rei, 2020.
 97 p.

 Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia da Energia) -- Universidade Federal de
 São João del-Rei, 2020.

 1. Velocidade Crítica de Deposição. 2. Bombeamento
 de Polpa. 3. Simulação Computacional. 4. Polpa
 Mineral. I. Vilalta Alonso, Guillermo, orient. II.
 Pedrera Yanes, Jacqueline, co-orient. III. Título.

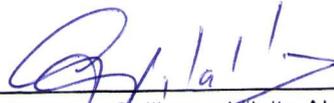
Max Túlio Castro Ferreira

**Caracterização da velocidade crítica de deposição para o escoamento de
polpas minerais**

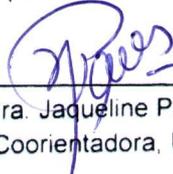
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, Em Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Aprovado(a) em, 17 de fevereiro de 2020

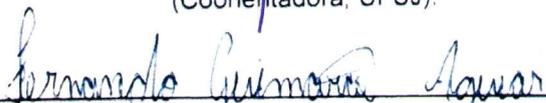
Banca Examinadora



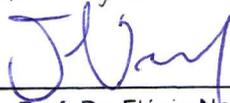
Prof. Dr. Guillermo Vilalta Alonso
(Orientador, UFSJ).



Profa. Dra. Jaqueline Pedrera Yanes
(Coorientadora, UFSJ).



Prof. Dr. Fernando Guimarães Aguiar
(Examinador externo, UFSCAR).



Prof. Dr. Flávio Neves Teixeira
(Examinador interno, UFSJ).

**São João Del Rei – MG
2020**

Agradecimentos

O autor gostaria de expressar seus sinceros agradecimentos:

Ao amigo e Prof. Guillermo Vilalta Alonso, pela orientação durante todos esses anos e em especial durante a dissertação, sempre enriquecendo com sugestões e comentários pertinentes, sempre buscando que o trabalho se concluísse da melhor maneira possível.

A Prof. Jacqueline Pedrera Yanes, pela coorientação durante a dissertação, sempre disposta a ajudar no que precisasse e buscando sempre contribuir da melhor forma possível.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ) por me proporcionarem de forma empenhada o conhecimento desejado.

Aos meus pais, por darem todo o suporte necessários e porem terem acreditado em mim, nas minhas ideias, para que eu buscasse alcançar todos os meus objetivos, essa conquista é de vocês!

A Fernanda Junqueira, minha companheira, que sempre esteve ao meu lado, dividindo alegrias e dificuldades ao longo desses anos, e sempre me apoiando e fortalecendo a buscar sempre mais.

A todos os amigos, que de alguma forma, me ajudaram e me apoiaram para que este projeto pudesse ser concluído.

Resumo

A mineração é uma indústria que representa um alto poder econômico sendo caracterizada por envolver o consumo de grandes quantidades de energia. O transporte de polpas minerais através de minerodutos, utilizando bombas centrífugas, é amplamente difundido e utilizado nesse setor para o bombeamento, por meio de tubos, para curtas, médias e longas distâncias. O dimensionamento de sistemas de transporte hidráulico de polpas minerais exige muita atenção à medida que o transporte apresenta comportamento sedimentar, onde a velocidade crítica de deposição, ou limite abaixo do qual se inicia a deposição das partículas, se torna um parâmetro de extrema importância uma vez que a velocidade de escoamento da polpa deve ser suficiente para evitar deposição dos sólidos na base dos tubos. Nesse sentido o presente estudo propõe estudar e analisar, com o uso de programa computacional, o bombeamento de diferentes polpas minerais com granulometria variando de 40 μm a 300 μm , concentração volumétrica entre 5% e 30%, através de um sistema de transporte com layout de recirculação ou loop com diâmetro interno de tubo na seção de testes (d) de 26,64 mm e 52,6 mm. O programa computacional utilizado é o AFT Fathom, na versão de demonstração, a partir do qual, simulações considerando fluido água, na fase inicial do estudo, e polpas minerais, na fase final, permitiram determinar os parâmetros através dos quais foi possível caracterizar a velocidade crítica de deposição. O cálculo dos parâmetros de saída, como i) vazão (m^3/h), ii) altura de carga (m), iii) potência (kW), iv) gradiente de pressão por metro de tubulação (kPa/m), v) velocidade de escoamento (m/s), vi) velocidade crítica de deposição (m/s) e vii) velocidade máxima de deposição (m/s), foi realizado utilizando técnicas de simulação numérica. Os resultados mostram que o ponto do menor gradiente de pressão é igual ao ponto de velocidade crítica de deposição. Os resultados fornecem subsídios para projeto eficientes de transporte de forma fácil sobre valores de velocidade crítica de deposição para diferentes parâmetros do sistema de transporte e características da polpa e sobre seu comportamento com a alteração desses fatores. E apresenta uma nova relação entre gravidade específica (SG) x Granulometria x Diâmetro de tubulação, através de um gráfico que permite de forma rápida a determinação da combinação entre essas variáveis de forma a obter um bombeamento com menor gasto de energia.

Palavras-chave: Velocidade Crítica de Deposição. Bombeamento de Polpa. Simulação Computacional. Polpa Mineral.

Abstract

Mining is an industry that represents a high economic power and is characterized by the consumption of large amounts of energy. The transportation of mineral slurry through pipelines using centrifugal pumps is widespread and is used in this sector for short, medium and long distance pumping through pipes. The design of mineral slurry hydraulic conveying systems requires a great deal of attention as conveying sedimentary behavior, where the critical deposition velocity, or limit below which particle deposition begins, becomes an extremely important parameter once that the flow rate of the pulp should be sufficient to avoid deposition of solids at the base of the pipes. In this sense, the present study proposes to study and analyze, with the use of a computer program, the pumping of different mineral pulps with particle size ranging from 40 μm to 300 μm , volumetric concentration between 5% and 30%, through a transport system with layout. recirculation or loop with inner tube diameter in test section (d) of 26.64 mm and 52.6 mm. The computer program used is the AFT Fathom, in the demo version, from which, simulations considering water fluid in the initial phase of the study and mineral pulps in the final phase, allowed to determine the parameters by which it was possible to characterize the critical velocity. of deposition. The calculation of the output parameters, such as i) flow (m^3 / h), ii) load height (m), iii) power (kW), iv) pressure gradient per pipe meter (kPa / m), v) flow velocity (m / s), vi) critical deposition velocity (m / s) and vii) maximum deposition velocity (m / s), numerical simulation techniques were performed. The results show that the point of the smallest pressure gradient is equal to the point of critical deposition velocity. The results provide efficient transportation design subsidies on critical deposition velocity values for different transport system parameters and pulp characteristics and on their behavior with changing these factors. And it presents a new relationship between specific gravity (SG) x Granulometry x Piping diameter, through a graph that allows to quickly determine the combination of these variables in order to obtain a pumping with less energy consumption.

Keywords: Critical Velocity. Pumping of Slurry. Computational Simulation. Energy Efficiency. Mineral Slurry.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Os 4 regimes e velocidades de transição para $D_p = 0,15$ m, $d_{50} = 2$ mm, $C_{vt} = 0,2$ (Adaptado de Abulnaga, 2002).

Figura 2 – Escoamento Homogêneo.

Figura 3 – Escoamento Heterogêneo.

Figura 4 – Escoamento Heterogêneo com leito móvel.

Figura 5 – Escoamento Heterogêneo com leito Fixo.

Figura 6 – Variação do parâmetro FL em função da granulometria e concentração volumétrica (Souza Pinto, 2012).

Figura 7 – Número Froude Durand FL versus diâmetro do tubo para areia com granulometria $d = 0,18$ mm (Adaptado Miedema (2016)).

Figura 8 – Esboço de definição para o modelo de duas camadas (Adaptado Wilson, 1992).

Figura 9 – Equilíbrio de forças no líquido sobre o leito (Wilson, 1992).

Figura 10 – Forças que atuam no leito (Wilson, 1992).

Figura 11 – Definição zona limite de deposito estacionário (Adaptado Wilson, 2006).

Figura 12 – Namográfico para determinação do limite máximo de velocidade crítica de deposição (Wilson, 1979).

Figura 13 – Velocidade crítica de deposição (V_c) e Velocidade do mínimo gradiente hidráulico (MHGV) (Adaptado Doron, 1987 e Doron & Barnea, 1993).

Figura 14 – V_{sm} x gravidade específica (Lahiri, 2009).

Figura 15 – V_{sm} x diâmetro de tubo (Lahiri, 2009).

Figura 16 – V_{sm} x Granulometria (Lahiri, 2009).

Figura 17 – V_{sm} x Concentração Volumétrica (Lahiri, 2009).

Figura 18 – Queda de pressão em função da velocidade de escoamento do concentrado de hematita para diâmetro de tubo de 50 mm (Souza Pinto, 2014).

Figura 19 – Queda de pressão em função da velocidade de escoamento do concentrado de apatita para diâmetro de tubo de 50 mm (Souza Pinto, 2014).

Figura 20 – Comparação de modelos para prever (V_c) para o quartzo com concentração volumétrica de 1% (Wasp e Slatter, 2004).

Figura 21 – Comparação de modelos preditivos de velocidade crítica para polpa de quartzo (Souza Pinto, 2014).

Figura 22 – Representação esquemática da bancada de testes para realizar a pesquisa.

Figura 23 – Fluidos newtonianos e de Bingham (Chaves, 2002).

Figura 24 – Região de decantação da polpa (Adaptado Warman, 2015).

Figura 25 – Comparação da potência requerida (P), carga (H) e eficiência (η) para operação de bombeamento de polpa e água (Adaptado de Sellgren e Addie (1993)).

Figura 26 – Gráfico para determinação dos Índices de carga e Eficiência (Weir, 2002).

Figura 27 – Curva Característica para a família de bombas KSB – 32-12 1700 rpm.

Figura 28 – Curva Característica para a família de bombas 2AC - 1150 rpm.

Figura 29 – Relação dos Índices de Carga (HR) e Eficiência (ER) versus Granulometria.

Figura 30 – Relação dos Índices de Carga (HR) e Eficiência (ER) versus material – 1 Polegada.

Figura 31 – Relação dos Índices de Carga (HR) e Eficiência (ER) versus material – 2 Polegadas.

Figura 33 – Zona de Deposito - Quartzo - 70 microns – 1 Pol.

Figura 34 – Zona de Deposito - Quartzo - 100 microns – 2 Pol.

Figura 35 – Zona de Deposito - Minério de Ferro – 70 microns – 1 Pol.

Figura 36 – Zona de Deposito - Minério de Ferro – 100 microns – 2 Pol.

Figura 37 – Zona de Deposito - Topázio – 70 microns – 1 Pol.

Figura 38 – Zona de Deposito - Topázio – 100 microns – 2 Pol.

Figura 39 – Zona de Deposito - Hematita – 70 microns – 1 Pol.

Figura 40 – Zona de Deposito - Hematita – 70 microns – 2 Pol.

Figura 41 – Região de Decantação

Figura 42 – Gradiente de pressão hematita, 40 microns, 1 polegada de diâmetro.

Figura 43 – Gradiente de pressão hematita, 150 microns, 1 polegada de diâmetro.

Figura 45 – Gradiente de pressão hematita, 70 microns, 2 polegadas de diâmetro.

Figura 45 – Gradiente de pressão hematita, 150 microns, 2 polegadas de diâmetro.

Figura 46 – Quartzo - 70 microns – 1 Polegada.

Figura 47 – Quartzo - 100 microns – 2 Polegadas.

Figura 48 – Minério de Ferro – 70 microns – 1 Polegada

Figura 49 – Minério de Ferro – 100 microns – 2 Polegadas.

Figura 50 – Topázio – 70 microns – 1 Polegada.

Figura 51 – Topázio – 100 microns – 2 Polegadas

Figura 52 – Hematita – 70 microns – 1 Polegada.

Figura 53 – Hematita – 70 microns – 2 Polegadas.

Figura 54 – Velocidade máxima de deposição x Diâmetro de tubulação.

Figura 55 – Comparação de modelos preditivos de velocidade crítica para polpa de quartzo com Cv de 15%.

Figura 56 – Relação do indicador energético I e velocidade de escoamento.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resumo dos deferentes autores e suas correlações.

Tabela 2 – Variáveis/Fatores e os níveis estudados.

Tabela 3 – Faixa de Operação com diâmetro da secção de teste de 1 Polegada.

Tabela 4 – Faixa de Operação com diâmetro da secção de teste de 2 Polegadas.

Tabela 5 – Parâmetros de saída para o bombeamento de água com diâmetro de 1 polegada.

Tabela 6 – Parâmetros de saída para o bombeamento de água com diâmetro de 2 polegadas.

Tabela 7 – Coeficientes ER e HR – Quartzo 1 Polegada.

Tabela 8 – Coeficientes ER e HR – Quartzo 2 Polegadas.

Tabela 9 – Coeficientes ER e HR – Minério de Ferro 1 Polegada.

Tabela 10 – Coeficientes ER e HR – Minério de Ferro 2 Polegadas

Tabela 11 – Coeficientes ER e HR – Topázio 1 Polegada.

Tabela 12 – Coeficientes ER e HR – Topázio 2 Polegadas.

Tabela 13 – Coeficientes ER e HR – Hematita 1 Polegada.

Tabela 14 – Coeficientes ER e HR – Hematita 2 Polegadas.

Tabela 15 – Velocidade Crítica de Deposição (SG 2,62).

Tabela 16 – Velocidade Crítica de Deposição (SG 3,11).

Tabela 17 – Velocidade Crítica de Deposição (SG 3,56).

Tabela 18 – Velocidade Crítica de Deposição (SG 4,9).

Lista de Abreviaturas e Siglas

ER – Índice de Carga.

HR – Índice de Eficiência.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração.

ST – Secção de Teste.

SG – Gravidade Específica

Lista de Símbolos

C_d – Coeficiente de arrasto [-].

C_v – Concentração Volumétrica [%].

D – Diâmetro do tubo [m].

Ψ – Função de Esfericidade [-].

d_{50} – Granulometria média com 50% passante [mm].

d_{95} – Granulometria com 95% passante [mm].

g – Gravidade [m/s^2].

S – Gravidade Específica [-].

ρ_m – Massa específica da mistura ou polpa [kg/m^3].

ρ_s – Massa específica do sólido [kg/m^3].

F_L – Número de Froude de Durand [-].

$\Delta P/L$ – Queda de pressão por metro de tubulação [kPa/m].

V_c – Velocidade crítica de deposição [m/s].

V_{sm} – Velocidade máxima de deposição [m/s].

V – Velocidade de escoamento [m/s].

μ_f – Viscosidade do fluido [$Pa \cdot s$].

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	4
2.1 Geral	4
2.2 Específico	4
3. Velocidade Crítica de Deposição	5
4. Materiais e Métodos	27
4.1 Instalação e procedimento de testes simulados	27
4.2 Polpa Minerais.....	28
4.2.1 Caracterização.....	28
4.2.2 Reologia.....	29
4.3 Definição dos Parâmetros.....	31
4.4 Simulação.....	33
4.4.1 AFT Fathom.....	33
4.4.2 Procedimentos para as simulações.....	36
5. Resultados.....	39
5.1 Seleção da Bomba de Polpa.....	40
5.2 Coeficientes ou Índices de Correção.....	43
5.3 Velocidade crítica de deposição.....	48
5.4 Zona de depósito estacionário.....	52
5.5 Região de Decantação	58
5.6 Gradiente de Pressão versus Velocidade de Escoamento.....	62
5.7 Comparação dos Modelos Preditivos.....	67
5.8 Melhores condições de escoamento.....	69
6. Conclusões.....	72
7. Trabalho Futuro.....	74
8. Referências.....	75

1. Introdução

A economia brasileira é fortemente influenciada pelo setor de mineração. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o Brasil conquistou uma posição de destaque no cenário global, tendo sido alcançado no período 2014/2015, a expressiva média anual de US \$ 33 bilhões através da produção mineral nas reservas brasileiras. Neste cenário, destaca-se o estado de Minas Gerais que representa mais de 50% da produção mineral nacional. Levesque et al (2014) destacam que a mineração é uma indústria intensiva em energia, onde pequenas reduções podem fornecer economias substanciais em termos de custos de energia e redução de emissões de gases.

As cidades mineradoras são uma importante base de suprimento mineral para o processo de modernização, o que contribui de maneira importante para apoiar e promover o desenvolvimento do país de desenvolvimento econômico (Xiaomeng, L, et al, 2018). Como resultado de todas as atividades de mineração, grandes quantidades de produtos e rejeitos são geradas a partir de processos de beneficiamento. O transporte de rejeitos pode ser feito por diferentes meios e uma opção importante são os sistemas de dutos. O transporte de sólidos sob a forma de lama, através de bombas e tubulações em grande escala, tem sido aceito ultimamente como um custo-benefício, tecnicamente e economicamente adequado, em vez de transportar caminhões e correias transportadoras, principalmente quando o acesso a áreas remotas é necessário e há terreno restrições (Singh, J, P. et al, 2017)

Por outro lado, os rejeitos são destinados para armazenamento em uma barragem de rejeitos, sendo transportados como polpa, por meio de sistemas de bombeamento nos quais, bombas centrífugas e de deslocamento positivo podem ser utilizadas. Essa técnica de transporte tem sido cada vez mais aceita em relação aos aspectos econômicos, de operação e manutenção e, adequada, ao invés do transporte através de caminhões e ferrovias que além

de causar transtorno à população próxima, promove grande impactos ao meio ambiente (Kaushal et al 2012).

Segundo Valadão e Araújo (2007), as polpas, nos circuitos de beneficiamento mineral, apresentam características heterogêneas, onde as partículas sólidas são transportadas e mantidas em suspensão pela turbulência do escoamento. Para Jie Wu et al (2010), a suspensão de minerais em tanques agitados e o transporte através de encanamentos são essenciais para a indústria moderna de mineração e processamento de minerais, com a necessidade cada vez mais urgente de reduzir as emissões de carbono. As operações de manuseio da polpa mineral são identificadas como tendo um grande potencial de melhoramento de eficiência energética (Awuah-Offei, 2016).

A otimização dos sistemas de bombeamento através de tubulação deve ser realizada considerando as propriedades reológicas da polpa, como tamanho, forma e concentração de sólidos, uma vez que o desempenho das bombas fica reduzido na presença de sólidos suspensos (Tarodiya, 2017). O projeto e o funcionamento de sistemas de transporte de polpa e, em particular, o desempenho das bombas utilizadas, dependem fortemente das propriedades da suspensão.

A deposição ou a velocidade mínima de transporte, muitas vezes chamada de velocidade crítica, é um dos parâmetros de projeto mais importantes, uma vez que representa o limite inferior para as velocidades de operação para muitos sistemas de transporte de polpas. O escoamento abaixo dessa velocidade de transporte tende a produzir deposição de partículas e acúmulo de linha, o que eventualmente pode levar à obstrução da linha (Vaezi, M et al, 2018). O funcionamento muito acima da velocidade crítica evita a deposição, mas essa combinação promove aumento de perdas de carga e consumo de energia, bem como desgaste e erosão das bombas, resultando em altos custos de transporte (Chaves, 2009; Poloski, 2010).

Devido à importância desse parâmetro, durante as últimas 5-6 décadas, intenso esforço tem sido realizado na tentativa da sua adequada caracterização. Existem vários estudos e

correlações para prever a velocidade crítica de deposição, com limites de aplicabilidades específicos. Muitos autores relacionam a queda de pressão por metro de tubulação ($\Delta P/L$) com a velocidade de escoamento, onde o mínimo valor de $\Delta P/L$ corresponde ao ponto crítico em que a velocidade de escoamento é igual a velocidade crítica de deposição (Jacobs, 1991; Wasp et al., 1977; Wilson et al., 2006; Souza Pinto et al., 2014).

Neste sentido e na necessidade de seguir avançando no conhecimento e na compreensão sobre o comportamento da velocidade crítica de deposição para polpas minerais, no presente trabalho pretende-se estudar a influência dos diferentes fatores que caracterizam o escoamento de polpas minerais definindo quais as melhores condições de escoamento para que não ocorra deposição das partículas, minimizando o gasto de energia. Os resultados devem fornecer subsídios para aprimorar os critérios para o projeto de sistemas de bombeamento de polpas de minérios.

2. Objetivos

2.1 Geral

O presente trabalho visa caracterizar quais as melhores condições de escoamento de polpa de diferentes minérios para que não ocorra deposição das partículas, minimizando o gasto de energia nos sistemas de bombeamento.

2.2 Específicos

- Identificar quais as principais correlações para a velocidade crítica existentes na literatura e seus limites e limitações;
- Realizar as simulações com água. Selecionar a bomba e definir os parâmetros de operação;
- Determinar os fatores de correção relativos à carga da bomba (HR) e ao rendimento (EH) como função da granulometria, a concentração e a densidade do sólido de minério, base seca;
- Realizar as simulações com polpa de diferentes minérios. Analisar os resultados;
- Definir as melhores condições do escoamento; relação entre a velocidade crítica de deposição e as perdas de carga a fim de minimizar o consumo de energia.

3. Velocidade Crítica de Deposição

O transporte de fluido contendo partículas sólidas precisa alcançar uma velocidade mínima de deposição, V_c , para que as partículas entrem em suspensão, diferentemente do escoamento de fluido newtoniano, que podem ser transportadas a velocidades muito baixas. Segundo Chaves (2002) a velocidade de uma polpa heterogênea deve ser suficientemente grande para produzir a turbulência necessária para manter os sólidos em suspensão, e deve ser a menor possível para reduzir atrito com as paredes, e conseqüentemente, reduzir a perda de carga.

Os transportes hidráulicos de polpa contem significativa divergência em estudos e definições devido aos limites de aplicabilidade da proposta de cada autor. De acordo com Gillies (1993), Jacobs (1991) e Crowe (2006), para o transporte de polpas que apresentam comportamento heterogêneo, ou seja, polpas que contém partículas grossas (diâmetro $> 100 \mu\text{m}$), o critério de velocidade crítica de deposição apresenta um papel de fundamental importância, uma vez que as partículas sólidas não estão uniformemente distribuídas em relação ao plano vertical e tendem a se assentar no fundo do tubo e geralmente o transporte é conduzido sob condições de escoamento que estão muito próximos do limite de deposição de partículas. Operações de bombeamento abaixo desta velocidade irão comprometer de forma significativa a operação.

Abulnaga (2002) sugere quatro regimes de escoamento, representados por um gráfico do gradiente hidráulico versus a velocidade média da polpa, como na Figura 1. As 4 velocidades de transição são definidas como:

- V_1 : velocidade igual ou acima da qual a cama na metade inferior do tubo está parada. Na metade superior do tubo, alguns sólidos podem se mover por saltação ou suspensão. Abaixo de V_1 não há partículas acima da cama.

- V2: velocidade igual ou acima da qual a mistura flui como uma mistura assimétrica com as partículas mais grosseiras formando um leito móvel / saltante.
- V3: velocidade igual ou acima da qual todas as partículas se movem como uma suspensão assimétrica e abaixo da qual os sólidos começam a assentar e formam um leito móvel.
- V4: velocidade igual ou acima da qual todos os sólidos se movem como uma suspensão quase simétrica.

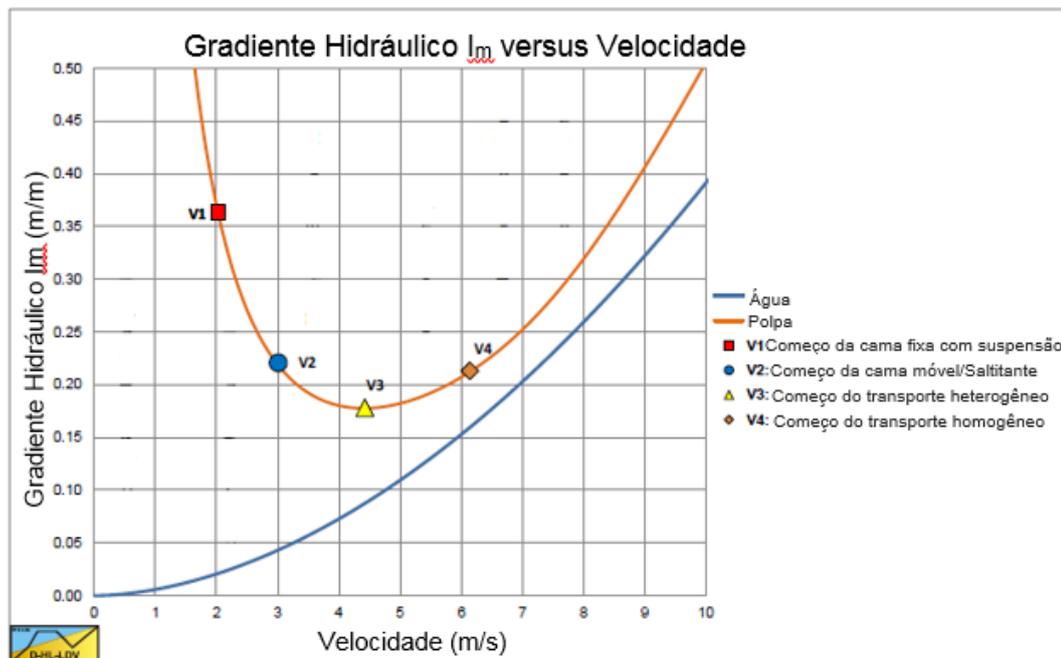


Figura 1 - Os 4 regimes e velocidades de transição para $D_p = 0,15$ m, $d_{50} = 2$ mm, $C_{vt} = 0,2$ (Adaptado de Abulnaga, 2002).

O escoamento bifásico pode ser dividido em quatro tipos de escoamento, sendo estes o homogêneo, caracterizado por velocidades acima de V4, o escoamento heterogêneo, caracterizado por velocidades de transporte entre V3 e V4, o heterogêneo com leito móvel, definido por velocidades entre V2 e V3 e finalmente o escoamento heterogêneo com leito fixo, representado por velocidades de bombeamento menores que V2.

Homogêneo: Ocorre uma distribuição uniforme das partículas ao longo da secção transversal do duto, normalmente sendo utilizadas altas concentrações e partículas finas e/ou com baixa densidade. Consumo de energia baixo e apresenta baixo desgaste dos componentes, conforme a Figura 2.

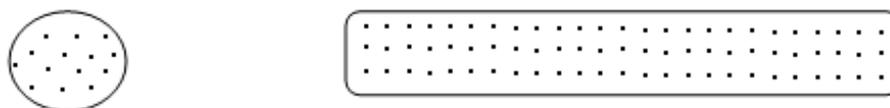


Figura 2 - Escoamento Homogêneo.

Heterogêneo: Apesar de todas as partículas estarem em suspensão durante o transporte, a concentração dessas partículas não é uniforme ao longo da secção e as partículas mais pesadas tendem a descer para o fundo da tubulação. Esse comportamento é observado com partículas mais grossas ou com alta densidade, típico do transporte de minério de ferro, que será estudado neste trabalho. A Figura 3 representa esse escoamento.

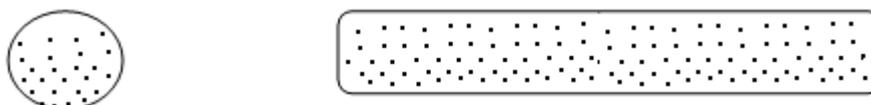


Figura 3 - Escoamento Heterogêneo.

Leito Móvel: Uma porção das partículas sólidas tendem a se mover no fundo do tubo, criando um leito móvel que acompanha o escoamento. Este tipo de escoamento promove maior perda de carga e consumo de energia se comparados aos escoamentos acima descritos, conforme a Figura 4 ilustrada abaixo.



Figura 4 - Escoamento Heterogêneo com leito móvel.

Leito Fixo: Parte das partículas sólidas tendem a se depositar no fundo do tubo, ocasionando acúmulos de sedimentos e levando a obstrução da tubulação. Esses sistemas operam abaixo da velocidade de deposição das partículas e devem ser evitados. A Figura 5 mostra esses escoamentos, que podem obstruir dutos causando sérios danos a esse transporte.

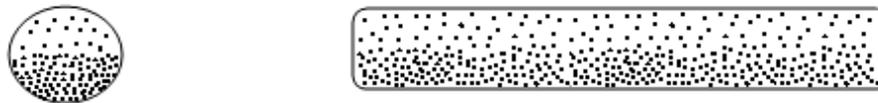


Figura 5 - Escoamento Heterogêneo com leito Fixo.

Existem diversos modelos preditivos para o cálculo da velocidade crítica de deposição baseados em propriedades da polpa como granulometria, concentração volumétrica, gravidade específica, viscosidade e no layout do sistema de transporte como diâmetro de tubulação, tendo, cada qual, o seu limite de aplicabilidade.

Durand (1953) apresentou o primeiro modelo, considerado a dia de hoje como clássico, para prever a velocidade crítica de deposição, que para o presente trabalho vai ser tratado como velocidade máxima de deposição (V_{sm}), uma vez que representa o limite acima do qual não há risco de formação leito ou deposição de partículas. O modelo foi obtido através de um estudo experimental utilizando sólidos (areia e cascalho) com granulometria d_{50} entre 0,18 mm e 22,5 mm, tubos com um diâmetro de 40 a 700 mm e concentrações volumétricas C_v de 2% a 22%. O modelo proposto por Durand é expresso conforme a Equação 1:

$$V_{sm} = F_L \cdot [2gD(S-1)]^{0,5} \quad (1)$$

Na Equação, F_L representa um parâmetro adimensional que relaciona diâmetro da partícula e concentração volumétrica, e a determinação do seu valor pode ser feita a partir do gráfico mostrado na Figura 2. Pode ser observado que o valor de F_L não depende do diâmetro do tubo nem da gravidade específica do minério e obtém seu máximo valor para uma granulometria próxima de 0,5 mm independentemente da concentração volumétrica. Segundo Wasp et al. (1977) e Kaushal et al. (2002), o parâmetro F_L se mostra aplicável para partículas que apresentam tamanho de até 1 mm, diminuindo sua influência na velocidade para polpas que apresentam distribuição não uniforme de partículas.

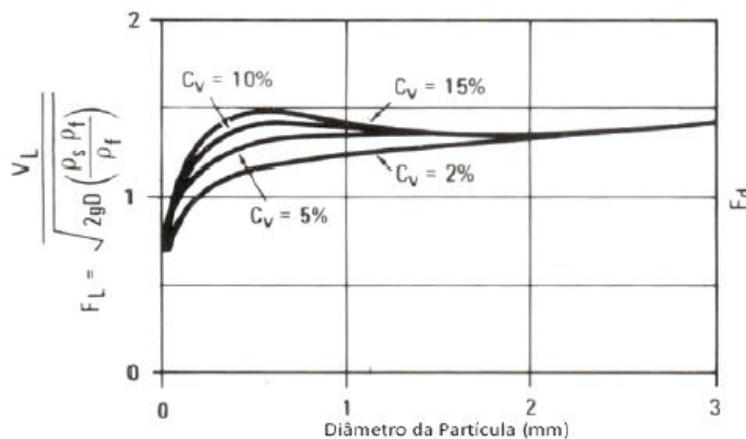


Figura 6 - Variação do parâmetro F_L em função da granulometria e concentração volumétrica (Souza Pinto, 2012).

Para as condições em que foi determinado o gráfico apresentado na Figura 2, observa-se que, para todas as concentrações, F_L mostra um valor crescente até um máximo correspondente com um tamanho de partícula de $d = 0,5$ mm, aproximadamente, após o qual F_L diminui para um valor assintótico de cerca de 1,34 para partículas muito grandes. F_L mostra um máximo para concentrações volumétricas próximas a 15%.

Miedema (2016) denomina o parâmetro F_L proposto por Durand como “número de Froude de Durand” pois além de representar uma relação entre as forças de inercia e as

gravitacionais, esse termo tornou-se um pilar para a formulação e avanços para a predição da velocidade de deposição das partículas usadas por inúmeros autores ao longo dos anos (Wilson e Judge, 1976; Wasp et al, 1977; Turian et al. 1987; Schiller e Herbich, 1991; Wasp e Slatter, 2004; Souza Pinto et al, 2014).

A partir dos anos 70, observou-se uma progressiva integração dos princípios físicos e as correlações empíricas para gerar novos modelos que fossem capazes de prever com maior precisão a velocidade de deposição de partículas suspensas na polpa, destacando-se os modelos de (Wasp et al, 1977) e Wilson (1979), a partir dos quais o parâmetro F_L ou número de Froude de Durand já não é mais obtido graficamente sendo que os métodos contemplam um amplo espectro de diâmetros de tubo e propriedades da polpa.

Wasp et al (1977) derivaram uma equação semelhante à equação de Durand (1953) para polpas contendo partículas finas, com granulometria entre 0,1 a 0,2 mm, divididas em frações homogêneas e heterogêneas. Em vez do uso gráfico para a determinação do número de Froude de Durand F_L , os autores quantificaram a influência da concentração, do diâmetro das partículas e relação do diâmetro do tubo, diferente de Durand (1953), onde F_L independe do diâmetro do tubo.

O modelo de Wasp para a predição da velocidade máxima de deposição é descrito pela equação 2. O número de Froude de Durand F_L , como pode ser visto pela equação 3, aumenta com o aumento diâmetro de partícula e aumento da concentração volumétrica e diminui com o aumento do diâmetro do tubo, conforme apresentado pela figura 3 para diâmetros de tubo de 0,05 – 0,3m (2 -12 polegadas) e areia com granulometria $d = 0,18$ mm.

$$V_{sm} = F_L [2gD(S-1)]^{0,5} \quad (2)$$

$$F_L = 4Cv^{1,5} \left(\frac{d}{D}\right)^{1,6} \quad (3)$$

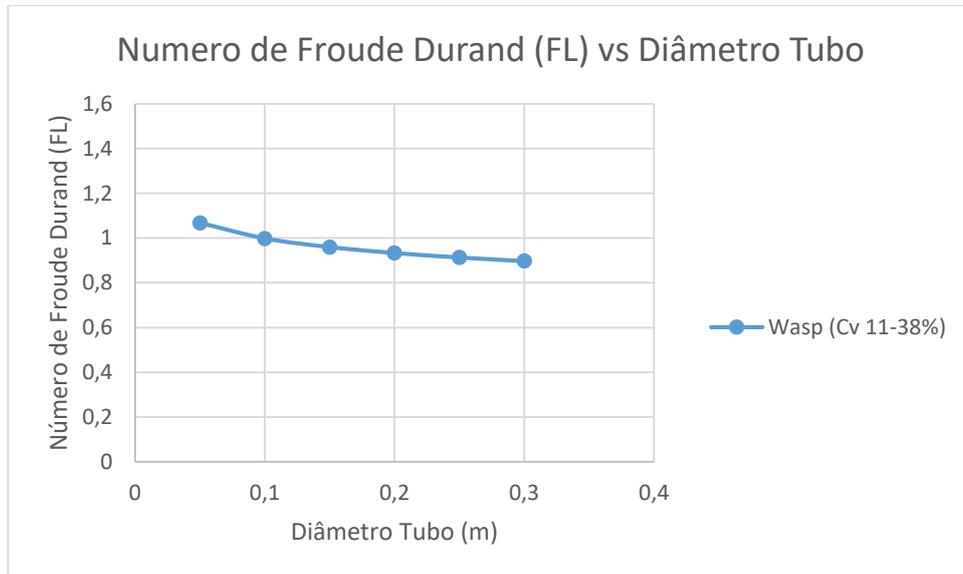


Figura 7 - Número Froude de Durand FL versus diâmetro do tubo para areia com granulometria $d = 0,18 \text{ mm}$ (Adaptado Miedema (2016)).

Para esse modelo, regimes heterogêneos e homogêneos são combinados em um só, resultando em uma transição suave entre eles. O passo mais importante no uso do modelo de Wasp é determinar a fração dos sólidos que está no componente homogêneo e a fração correspondente ao componente heterogêneo, que se comporta de acordo com o modelo de Durand (1953). O modelo Wasp prevê gradientes hidráulicos com precisão razoável em todas as concentrações volumétricas para todas as velocidades de escoamento.

Kaushal & Tomita (2002B), Abulnaga (2002) e Lahiri (2009) propuseram diferentes versões do modelo Wasp et al. (1977), o que tem ocasionado confusão pelo uso termo gradiente hidráulico, que descreve a perda de pressão por unidade de comprimento do tubo. Para converter a perda de pressão em kPa para o gradiente hidráulico, a perda de pressão tem que ser dividida por $\rho \cdot g \cdot \Delta L$. A origem da confusão está associada ao valor da massa específica ρ utilizado no cálculo o gradiente hidráulico. Kaushal & Tomita (2002B) usam a massa específica do líquido puro, Abulnaga (2002) usa a massa específica da polpa, e Lahiri (2009) a massa específica da parte homogênea. Por isso não é claro qual a perda de carga

que se tem: perda de carga por metro de líquido puro ou perda de carga por metro de polpa, etc. Também é confuso que muitos autores usem o termo queda de pressão ou perda quando eles realmente falam sobre o gradiente hidráulico.

No entanto, apesar do avanço que representou o modelo de Wasp, falta nele, considerar a influência de um leito fixo ou deslizante e as tensões de cisalhamento entre diferentes camadas. Partículas grosseiras tendem a poder formar um leito fixo ou deslizante. Esses efeitos são implementados nos modelos de duas camadas de Wilson (1979).

Wilson (1979) propõe uma abordagem diferente, através de um modelo de duas camadas, que prevê a ocorrência de leito móvel de partículas na parte inferior de uma tubulação e considera o escoamento acima do leito como líquido puro. A velocidade limite ou crítica de deposição, V_c , é o limite abaixo do qual começa a formação de depósito no fundo do tubo, e a velocidade máxima de deposição, V_{sm} , é o limite acima do qual o escoamento ocorre sem formação de leito.

A Figura 8 mostra uma representação esquemática de um tubo de diâmetro D_p com uma camada de sólidos ocupando porção inferior e líquido na camada superior. Na figura, os símbolos que representam a geometria do tubo são definidos e apresentados a seguir.

A área transversal A2 do leito fixo ou deslizante é:

$$A_2 = \frac{\pi}{4} * D_p^2 * \left(\frac{\beta - \sin(\beta) * \cos(\beta)}{\pi} \right) \quad (9)$$

A área da seção transversal A1 acima do leito, onde o líquido flui é:

$$A_1 = A_p - A_2 \quad (10)$$

O balanço de volume da relação entre a velocidade da linha V_{Is} , a velocidade na área acima do leito V_1 e a velocidade do leito V_2 é:

$$V_{Is} * A_p = V_1 * A_1 + V_2 * A_2 \quad (11)$$

Logo,

$$V_1 = \frac{V_{Is} A_p - V_2 A_2}{A_1} \quad (12)$$

$$V_2 = \frac{V_{Is} A_p - V_1 A_1}{A_2} \quad (13)$$

Primeiro, o equilíbrio das forças no líquido acima do leito é determinado, como representado esquematicamente pela figura 5. Isso é necessário para encontrar o correto gradiente hidráulico. A força resistente de cisalhamento na parede do tubo O_1 acima do leito é:

$$F_{1,l} = \tau_{1,1} * O_1 * \Delta L \quad (14)$$

A força de resistente de cisalhamento na superfície do leito O_{12} entre a área de leito e a parte superior ao leito é:

$$F_{12,l} = \tau_{12,l} * O_{12} * \Delta L \quad (15)$$

A força devido ao gradiente de pressão ΔP acima do leito é:

$$F_{1,pr} = \Delta P * A_1 \quad (16)$$

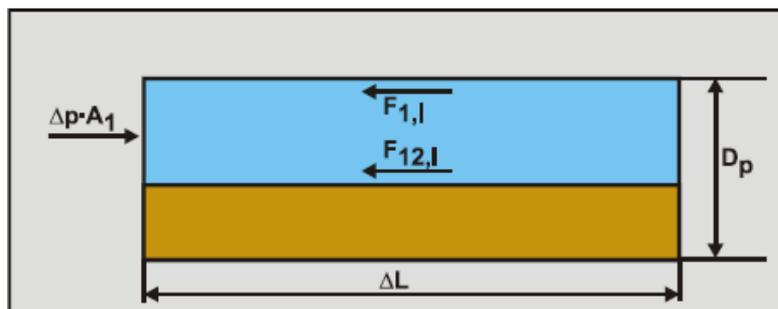


Figura 9 – Equilíbrio de forças no líquido sobre o leito (Wilson, 1992)

Posteriormente, o equilíbrio de forças no leito é determinado, como ilustrado pela figura 9. A força motriz de cisalhamento na superfície do leito é:

$$F_{12,l} = t_{12,l} \cdot O_{12} \cdot \Delta L \quad (17)$$

onde

$$t_{12,l} = \frac{\lambda_{12}}{4} \cdot \frac{\rho_1}{2} \cdot (V_1 - V_2)^2 \quad (18)$$

Onde $\lambda_{12} = \frac{\alpha \cdot 1,325}{\left(\ln\left(\frac{0,27 \cdot d}{Dh,l} + \frac{5,75}{Re^{0,9}}\right)\right)^2}$, com $Re = \frac{V_1 \cdot Dh,l}{\nu_1}$ e o fator α pode ser considerado

como 2.

A força motriz resultante do gradiente de pressão ΔP no leito é:

$$F_{2,pr} = \Delta P \cdot A_2 \quad (19)$$

A força de resistência entre o leito e a parede do tubo devido ao atrito de deslizamento é:

$$F_{2,sf} = t_{2,sf} \cdot O_2 \cdot \Delta L \quad (20)$$

onde

$$t_{2,sf} = \frac{\mu_{sf} \cdot \rho_1 \cdot g \cdot R_{sf} \cdot C_{vb} \cdot A_p}{\beta \cdot D_p} \cdot \frac{(\beta - \sin(\beta)) \cdot \cos(\beta)}{\pi} \quad (21)$$

A força de resistência cisalhante entre o líquido dentro do leito e a parede do tubo, que surge com a ação do movimento do leito é descrito pela equação 22:

$$F_{2,l} = t_{2,l} \cdot O_2 \cdot \Delta L \quad (22)$$

Há um equilíbrio de forças quando a soma das forças motrizes é igual a soma das forças de resistência, conforme apresentado pela equação 23:

$$F_{12,l} + F_{2,pr} = F_{2,sf} + F_{2,l} \quad (23)$$

$$F_{12,l} + F_{2,pr} = F_{2,sf} \quad (24)$$

Logo imediatamente antes da velocidade crítica de deposição, onde o leito ainda é fixo $F_{2,l}$ é igual a zero e a equação de equilíbrio se reduz a equação 24. A determinação da velocidade do leito (V_1) e velocidade do líquido (V_2) que estão implícitos no valor de $t_{2,l}$ é realizada através de processo iterativo. O modelo está apresentado pela Figura 10.

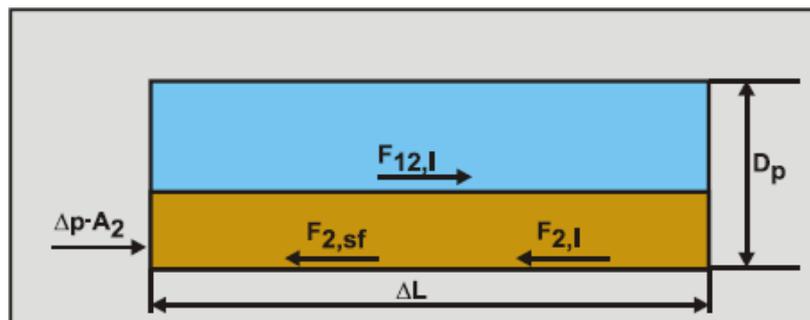


Figura 10 – Forças que atuam no leito (Wilson, 1992).

O modelo é baseado em um equilíbrio de forças atuando sobre as partículas no leito, no qual, forças motrizes (forças de cisalhamento e as forças resultantes da pressão) e forças resistentes (força de atrito de deslizamento e força de atrito viscoso) podem ser distinguidas.

As forças motrizes, que tendem a colocar o leito em movimento, surgem da ação do gradiente de pressão na porção da seção transversal ocupada pelo leito, além dos efeitos de tensão de cisalhamento na superfície superior do leito. As forças de resistência, que agem para manter o leito no lugar, é a fricção mecânica entre a parede do tubo e as partículas que compõem o leito e quando o leito estiver em movimento, há um componente adicional da força de resistência, a força de fricção de fluido.

Quando a soma das forças motrizes é igual à soma das forças de resistência, a denominada velocidade crítica de deposição (V_c) é atingida. Para velocidades de escoamento abaixo desse valor, ocorre a deposição das partículas, porque as forças motrizes são menores que as forças de resistência. Em velocidades de escoamento acima da velocidade crítica de deposição, o leito desliza com uma velocidade crítica que aumenta com o aumento da velocidade de escoamento, até um valor máximo (V_{sm}), acima do qual não corre risco da formação de leito no transporte.

Os resultados do modelo de equilíbrio de força para o limite de deposição mostraram que a velocidade crítica de deposição V_c é dependente da concentração, tendo valores pequenos em baixa concentração, um máximo (denotado V_{sm}) em alguma concentração intermediária (que depende do tamanho do tubo e do tamanho e da densidade das partículas) e, em seguida decai novamente para valores superiores de concentração volumétrica, como mostrado pela Figura 11.

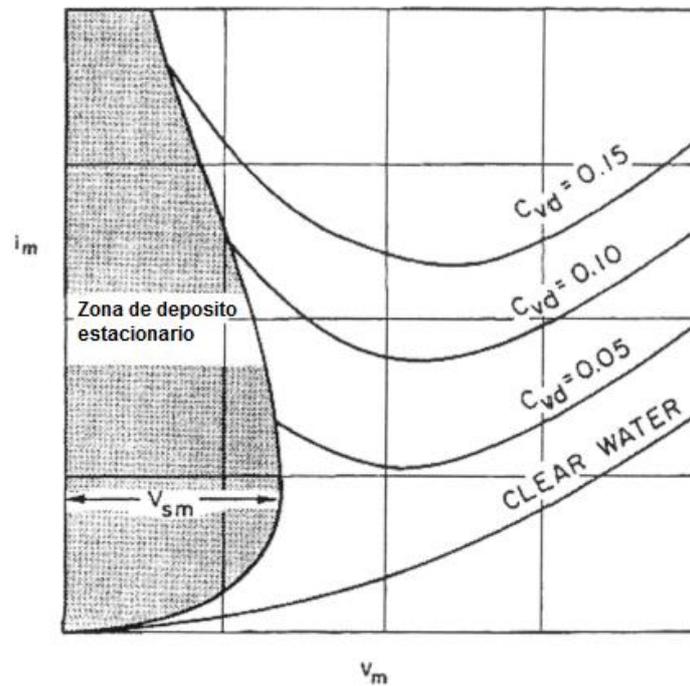


Figura 11 – Definição zona limite de depósito estacionário (Adaptado Wilson et al., 2006)

Projetistas conservadores podem se contentar em conhecer apenas velocidade máxima no limite de deposição, V_{sm} , uma vez que a velocidade de operação acima desse valor garante que a deposição não ocorra. O valor de V_{sm} depende do diâmetro interno do tubo, diâmetro e densidade relativa da partícula, e o efeito dessas variáveis é expresso de forma concisa por um gráfico nomográfico (Wilson, 1979), como mostrado pela Figura 12, com aplicação para partículas ($d > 0,15$ mm) e diâmetro do tubo (D) maior que 100 mm. O uso dessa figura para partículas de diferentes densidades relativas pode ser realizado, no entanto com menor precisão do que para partículas de areia com gravidade específica 2,65, que constitui o material utilizado para os experimentos.

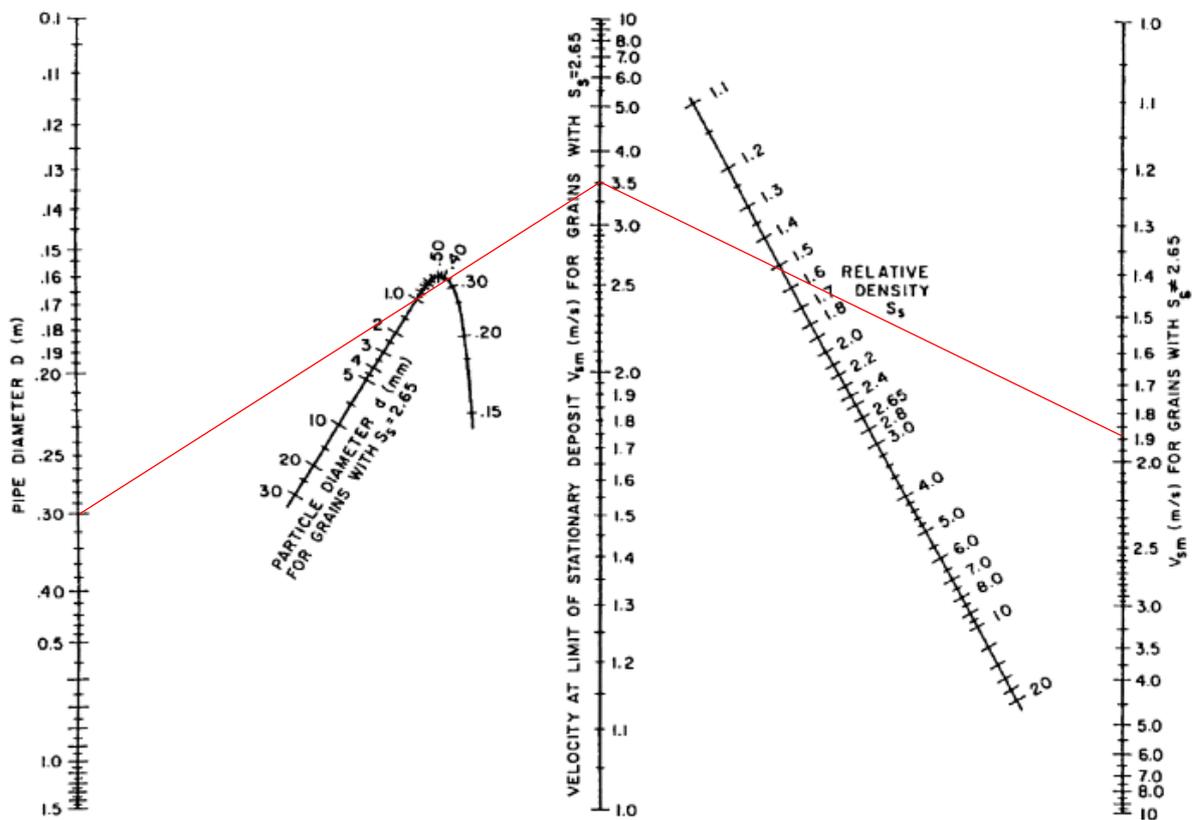


Figura 12 - Nomográfico para determinação do limite máximo de velocidade crítica de deposição (Wilson, 1979).

Como exemplo, ilustrado pelas linhas vermelhas na Figura 12, Wilson et al. (2006) utilizam um diâmetro de tubo de 0,3 m com partículas de quartzo de 1 mm de granulometria, obtendo-se uma velocidade máxima de deposição de aproximadamente 3,5 m/s. Corrigindo esse valor de V_{sm} para partículas que apresentam densidade relativa de 1,5 obtém-se o novo valor de aproximadamente 1,9 m/s.

Embora o uso da velocidade máxima de depósito V_{sm} garanta que a operação com uma cama estacionária será evitada, ocasionalmente há casos onde a velocidade de operação menor que V_{sm} será economicamente atraente e ainda o escoamento ocorrerá sem deposição. Especificamente, isso ocorre quando a concentração de sólidos no ponto de operação desejado é marcadamente diferente daquela para V_{sm} , de modo que a velocidade crítica de depósito, V_c , na concentração desejada é significativamente menor do que V_{sm} .

Para lidar com tais casos, a técnica é generalizada para obter valores de V_c para qualquer concentração volumétrica de sólido fornecido (Wilson, 1986).

Para partículas de granulometria menor que 150 microns, porém maiores que as partículas da subcamada viscosa a equação 25 para o cálculo da velocidade crítica de deposição de Wilson and Judge (1976) é recomendada, onde C_d corresponde ao coeficiente de arrasto, conforme a forma da partícula.

$$V_c = F_L [2gD(S-1)]^{0,5} \quad (25)$$

Onde,

$$F_L = 2 + 0,3 \text{Log} \left[\frac{d}{D C_d} \right]$$

O modelo de 2 camadas de Doron et al. (1987) é semelhante ao modelo de Wilson (1979) em relação a que considera 2 camadas e o equilíbrio de forças. O modelo, no entanto, usa uma distribuição de concentração na camada superior, onde o modelo original de Wilson (1979) assume um líquido puro. Doron et al. (1987) afirmam que a velocidade crítica de deposição pode ser determinada pela avaliação do gradiente de pressão e a velocidade de escoamento, encontrando o ponto de mínimo gradiente de pressão, sem a formulação de uma equação para prever o valor de V_c . A abordagem da distribuição de concentração é baseada na distribuição de concentração no escoamento em canal aberto e não em um conduto fechado circular.

Doron et al. (1987) promoveram seus experimentos com tubulação Plexiglas (acrílico) de 11 metros de comprimento com diâmetro interno de 51 mm (2 polegadas). Eles usaram particulados de um polímero (Acetal preto) com uma densidade de 1,24 toneladas / m³, um diâmetro de 3 mm, um coeficiente de atrito deslizante de 0,3 e $\tan(\phi) = 0,6$. Uma limitação do

modelo de 2 camadas de Doron et al. (1987) é a sua incapacidade de prever com precisão existência de um leito estacionário em baixas velocidades de escoamento. Há casos em que uma cama estacionária foi observada, no entanto, o modelo prevê uma cama em movimento.

A fim de compreender o processo de escoamento de polpa em todos os aspectos Doron e Barnea (1993) desenvolveram um modelo de 3 camadas. Para altos valores de velocidade de escoamento, eles ainda usam o modelo de 2 camadas, mas para baixos valores, assume-se que o leito consiste em 2 camadas, uma camada estacionária no fundo do tubo e uma camada movendo acima dela. A parte superior do tubo ainda está ocupada com uma mistura heterogênea. O modelo de 3 camadas obtém um gradiente hidráulico mais baixo a velocidades de escoamento mais baixas em comparação com o modelo de 2 camadas, no entanto, os dados experimentais não confirmam um ou outro. Somente a observação de um leito estacionário a baixas taxas de fluxo seria a favor do modelo de 3 camadas. Doron et al. (1987) e Doron & Barnea (1993) investigaram através de seus próprios experimentos a velocidade crítica de deposição (V_c) e a velocidade do mínimo gradiente hidráulico (MHGV) e reproduziram os resultados conforme mostrado no gráfico da Figura 13.

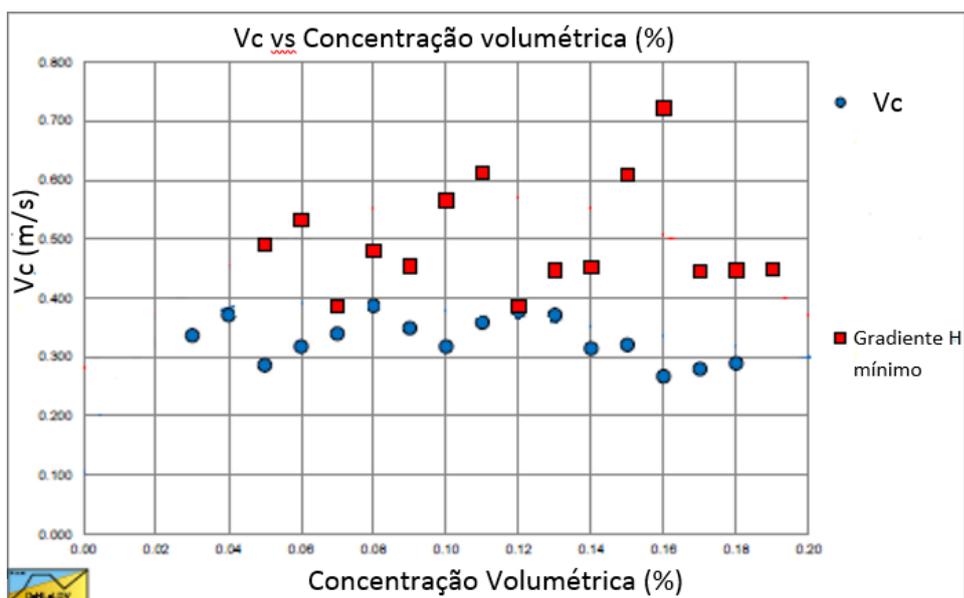


Figura 13 - Velocidade crítica de deposição (V_c) e Velocidade do mínimo gradiente hidráulico (MHGV) (Adaptado Doron, 1987 e Doron & Barnea, 1993).

Turian et al. (1987) coletou e reformulou um total de 864 dados experimentais de velocidade crítica, representando uma ampla variedade de materiais sólidos e pertencentes a amplas faixas das variáveis envolvidas. Nessa pesquisa apresenta-se uma relação para prever a velocidade máxima de deposição (V_{sm}), conforme descrito pela equação 26, onde segundo Miedema (2016), o número de Froude de Durand F_L , mostra um máximo em algum lugar perto da concentração volumétrica de 15% -20% dependendo do diâmetro da partícula e F_L aumenta com o aumento do diâmetro das partículas e diminui com o aumento do diâmetro do tubo.

$$V_{sm} = F_L [2gD(S-1)]^{0,5} \quad (26)$$

onde

$$F_L = 1,79511Cv^{0,1087}(1-Cv)^{0,2501}\left(\frac{D[gD(S-1)]^{0,5}}{v}\right)^{0,00179}\left(\frac{d}{D}\right)^{0,06623}$$

Schiller e Herbich (1991) propõem um modelo baseado nos trabalhos de Durand (1953), conforme apresentado pela equação 27, para predizer o valor da velocidade máximo de deposição. A equação, segundo os autores, é válida para partículas com diâmetro característico de 50% passante (d_{50}). O número de Froude de Durand F_L aumenta com aumento da concentração volumétrica e com aumento da granulometria das partículas.

$$V_{sm} = F_L[2gD(S-1)]^{0,5} \quad (27)$$

Sendo

$$F_L = 1,3Cv^{0,125}(1 - e^{-6,9d_{50}})$$

Mas recentemente, Wasp e Slatter (2004) desenvolveram um modelo preditivo para velocidades de deposição para polpas compostas de partículas finas. No entanto, incluíram polpas de carvão que possuem características heterogêneas em baixas velocidades. O modelo proposto é descrito pela equação 28, baseado em tubos industriais com diâmetros na faixa de 203 a 458 mm, e onde d_{95} é o diâmetro médio das partículas 95% passante, ρ_s é a massa específica do sólido e μ_f é a viscosidade dinâmica do fluido carregador (água). O valor de F_L diminui com o aumento diâmetro do tubo e aumenta com o aumento do diâmetro das partículas.

$$V_{sm} = 0,18(S-1)^{0,5} \left(\frac{d_{95} \rho_s \sqrt{gD}}{\mu_f} \right)^{0,22} e^{4,34Cv} \quad (28)$$

onde

$$F_L = \frac{V_{sm}}{[2gD(S-1)]^{0,5}} = \frac{0,18 \left(\frac{d_{95} \rho_s \sqrt{gD}}{\mu_f} \right)^{0,22} e^{4,34Cv}}{\sqrt{2gD}}$$

Lahiri (2009) investigou, com base nas relações de Wasp (1977), a relação da velocidade máxima de deposição (V_{sm}) com a densidade, ou gravidade específica, dos sólidos, relação entre a massa específica do sólido e do líquido, com o tubo diâmetro, com o diâmetro da partícula e com a concentração volumétrica. O autor não fornece uma equação única para a previsão de V_{sm} , mas forneceu uma relação envolvendo os 4 parâmetros, a que foi obtida mediante técnicas de inteligência computacional, rede neural artificial e regressão como máquina de suporte vetorial.

Os resultados obtidos a partir de mais de 800 dados experimentais coletados através de 20 fontes entre os anos de 1942 a 2002, com variação de diâmetro de tudo (m) de 0,0127 – 0,8; Granulometria da partícula (m) de (0,0017 – 0,868) $\cdot 10^{-2}$; massa específica do líquido (kg/m^3) variando de 770 – 1350; massa específica dos sólidos (kg/m^3) 1150 – 8900 e concentração volumétrica (%) com variação entre 0,005 – 0,561 forneceram subsídios para

determinar o grau de relação entre o V_{sm} e as variáveis. As Figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam o comportamento da velocidade máxima de deposição com razão da gravidade específica, que apresenta grau de dependência na ordem de 0,2839; diâmetro de tubulação, que possui dependência na ordem de 0,348; granulometria da partícula, que possui dependência fraca na ordem de 0,042 e finalmente a concentração volumétrica que apresenta um valor máximo de V_{sm} a uma concentração volumétrica de cerca de 15%.

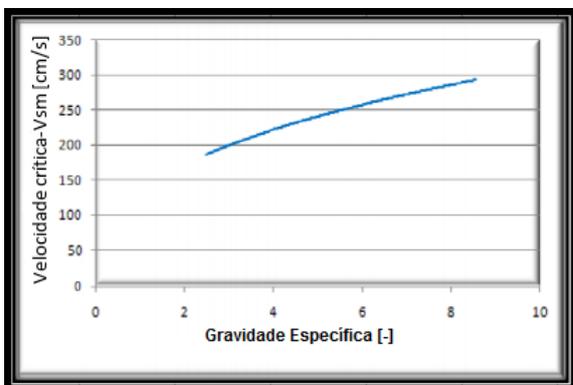


Figura 14 - V_{sm} x gravidade específica (Lahiri, 2009).

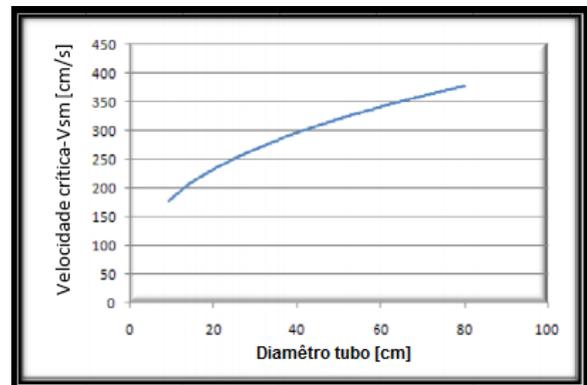


Figura 15 - V_{sm} x diâmetro de tubo (Lahiri, 2009).

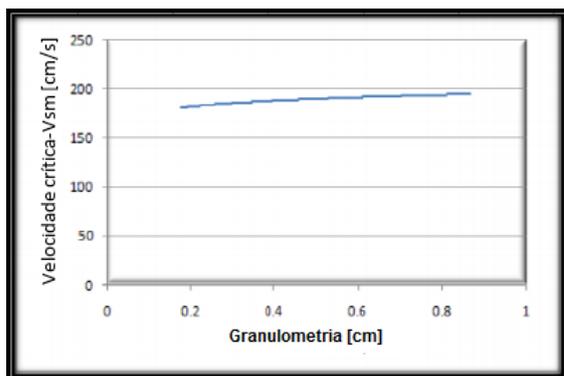


Figura 16 - V_{sm} x Granulometria (Lahiri, 2009).

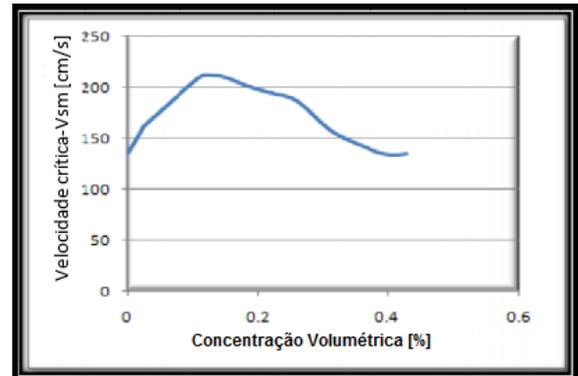


Figura 17 - V_{sm} x Concentração Volumétrica (Lahiri, 2009).

Souza Pinto et al. (2014) sugere um novo modelo de V_{sm} baseado no trabalho de Wasp e Slatter (2004), onde todos os expoentes da Equação 10, foram melhorados pelo método dos mínimos quadrados. O trabalho preenche uma lacuna com a consideração da forma da partícula como função de esfericidade, que antes só foi discutida mediante o fator de forma

através do coeficiente de arrasto por alguns autores como Shook and Daniel, 1965; Zandi and Govatos, 1967; Wilson and Judge, 1976.

O estudo experimental se baseia em particulados de hematita, quartzo e apatita com diâmetro de partícula (d_{50}) de 0,105 a 0,297 mm; diâmetro do tubo (D) de 25 a 50 mm; concentração volumétrica da polpa (C_v) de 8 a 27%, massa específica da polpa (ρ_m) de 1226 a 1661 kg / m³; função de esfericidade (Ψ) de 0,38 a 0,81 e massa específica dos sólidos (ρ_s) de 2600 a 5100 kg / m³. Como resultado desse estudo, os autores propõem a correlação para V_{sm} , conforme apresentado pela equação 29.

$$V_{sm} = 0,124(S-1)^{0,5} \left(\frac{d \rho_m \sqrt{gD}}{\mu_f} \right)^{0,37} \left(\frac{d \Psi}{D} \right)^{-0,007} e^{3,10C_v} \quad (29)$$

Onde

$$F_L = \frac{0,124(S-1)^{0,5} \left(\frac{d \rho_m \sqrt{gD}}{\mu_f} \right)^{0,37} \left(\frac{d \Psi}{D} \right)^{-0,007} e^{3,10C_v}}{[2gD(S-1)]^{0,5}}$$

Parte dos resultados obtidos com os experimentos conduzidos são apresentados nas figuras 14 e 15 para concentrado de apatita (gravidade específica de 3,13) e hematita (gravidade específica de 4.9) em gráficos de perda de pressão por metro de tubulação versus velocidade de escoamento, onde o ponto de mínimo valor de perda de pressão ocorre em um valor crítico da velocidade de escoamento (V_{sm}) que representa o limite acima do qual não ocorre formação de leito móvel ou fixo das partículas minerais.

Pode-se observar que a hematita por apresentar maior gravidade específica obtém maiores valores de V_{sm} em comparação a apatita, como esperado, uma vez que partículas mais pesadas necessitam de maior velocidade para manter os particulados suspensos durante o transporte. Em relação a influência da concentração volumétrica (C_v) na velocidade máxima de deposição (V_{sm}) obtido desse estudo experimental é possível observar um

aumento na magnitude de V_{sm} com o aumento de C_v , em todos os casos, conforme apresentado pelas Figuras 18 e 19.

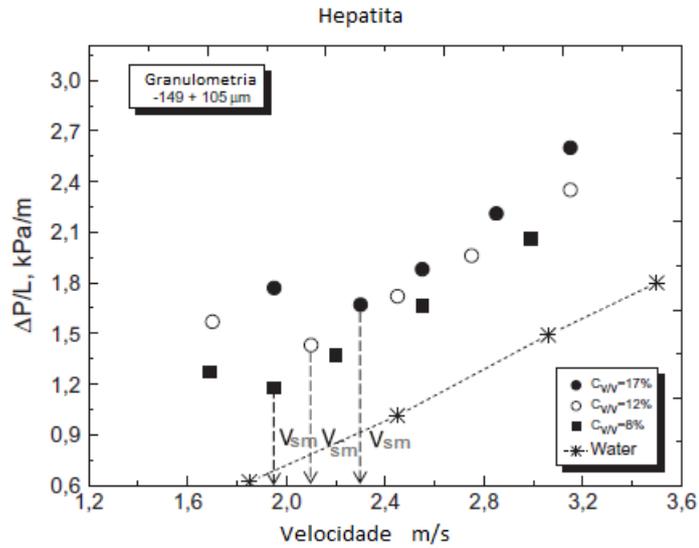


Figura 18 - Queda de pressão em função da velocidade de escoamento do concentrado de hematita para diâmetro de tubo de 50 mm (Adaptado de Souza Pinto, 2014).

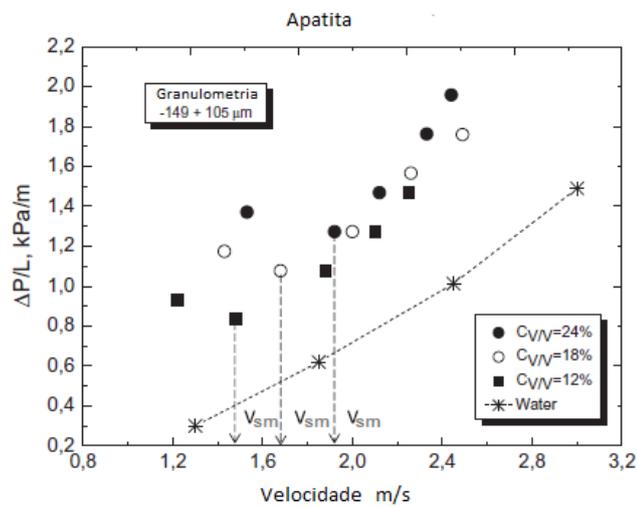


Figura 19 - Queda de pressão em função da velocidade de escoamento do concentrado de apatita para diâmetro de tubo de 50 mm (Adaptado de Souza Pinto, 2014).

Como pode ser observado, existem muitas correlações para prever a velocidade máxima de deposição (V_{sm}), alguns modelos são baseados em relações fenomenológicas, outros tentaram criar modelos baseados na física, como os modelos de duas e três camadas, cada um com seu respectivo limite de aplicabilidade. Segundo Wasp e Slatter (2004), existe muita discordância entre os modelos propostos, devido ao fato das correlações não estarem com faixas de aplicabilidade bem definidas. A Figura 20 apresenta alguns modelos e seus comportamentos da predição da velocidade máxima de deposição versus o diâmetro da tubulação para o quartzo.

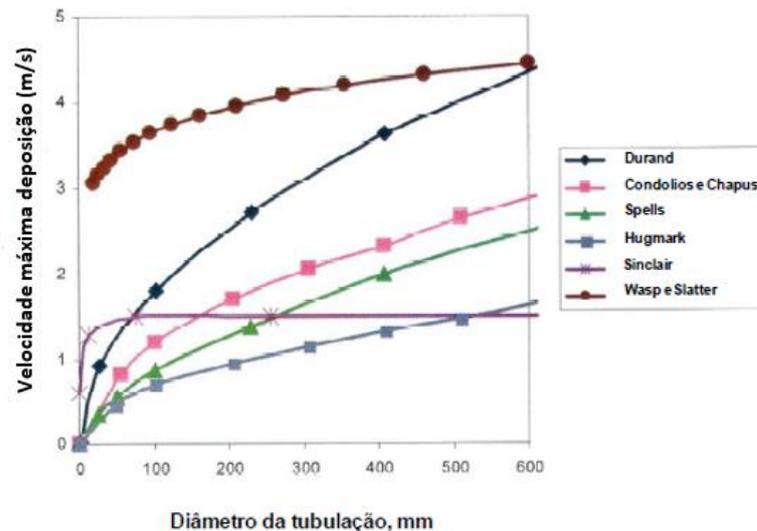


Figura 20 - Comparação de modelos para prever (V_{sm}) para o quartzo com concentração volumétrica de 1% (Wasp e Slatter, 2004)

A comparação de alguns modelos preditivos para a velocidade máxima de deposição em função da extrapolação do diâmetro do tubo (D) também é apresentado por Souza Pinto et al. (2014) aplicadas para quartzo, com 14% de concentração volumétrica e partículas de diâmetro igual a 0,265 mm e os resultados, conforme se observa na Figura 21, mostram um desacordo considerável entre as propostas, devido aos limites de aplicabilidade aos quais cada proposta se aplica.

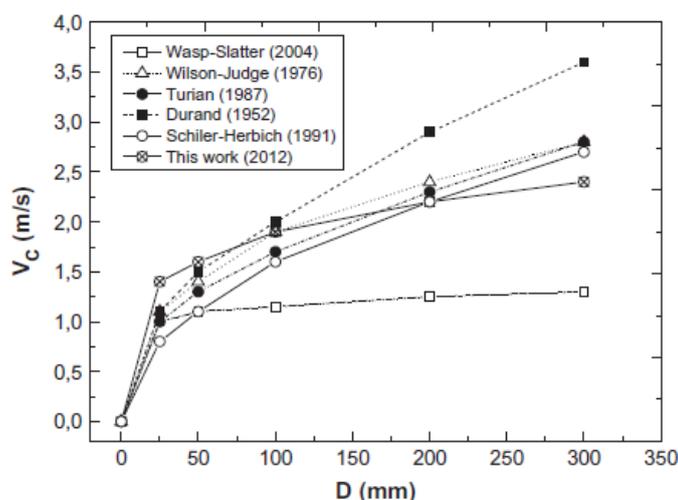


Figura 21 - Comparação de modelos preditivos de velocidade crítica para polpa de quartzo (Souza Pinto, 2014).

A partir das informações obtidas na literatura e sabendo da importância de cada correlação para predição da velocidade crítica de deposição dos diferentes autores. A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais autores e suas correlações para prever o valor da velocidade crítica de deposição.

Tabela 1 - Resumo dos diferentes autores e suas correlações.

Autores	Correlações
Durand (1953)	$V_{sm} = F_L \cdot [2gD(S-1)]^{0,5}$
Wasp et al. (1977)	$V_{sm} = 4Cv^{1,5} \left(\frac{d}{D}\right)^{1,6} \cdot [2gD(S-1)]^{0,5}$
Wilson et al (1979)	$V_c = 2 + 0,3 \text{Log} \left[\frac{d}{D C_d}\right] \cdot [2gD(S-1)]^{0,5}$
Turian et al. (1987)	$V_{sm} = 1,79511Cv^{0,1087} \left(1 - Cv^{0,2501} \left(\frac{D[gD(S-1)]^{0,5}}{v}\right)^{0,00179} \left(\frac{d}{D}\right)^{0,06623} \cdot [2gD(S-1)]^{0,5}\right)$
Schiller and Herbich (1991)	$V_{sm} = 1,3Cv^{0,125} (1 - e^{-6,9d50}) \cdot [2gD(S-1)]^{0,5}$
Wasp e Slatter (2004)	$V_{sm} = 0,18(S-1)^{0,5} \left(\frac{d^{95} \rho s \sqrt{gD}}{\mu f}\right)^{0,22} e^{4,34Cv}$
Souza Pinto (2012)	$V_{sm} = 0,124(S-1)^{0,5} \left(\frac{d \rho m \sqrt{gD}}{\mu f}\right)^{0,37} \left(\frac{d \Psi}{D}\right)^{-0,007} e^{3,10Cv}$

Tendo em vista o pouco consenso existente nas correlações para a determinação da velocidade crítica de deposição e a importância deste parâmetro para o transporte eficiente de polpa de minério, o presente trabalho constitui um estudo numérico, utilizando para isso a versão demo do software AFT Fathom, para estudar como diferentes fatores associados tanto as polpas quanto aos sistemas de transporte de minério, influenciam na velocidade crítica de deposição de modo a estabelecer qual a combinação de fatores que garante melhores condições para o escoamento.

4. Materiais e Métodos

4.1 Instalação e procedimento de testes simulados

A pesquisa tem a função de promover o estudo e a análise do bombeamento de polpas minerais em tubulações, com foco principal no comportamento da velocidade do escoamento e, especificamente, da velocidade crítica de deposição. Para a realização das simulações será utilizada uma bancada de testes simulados com layout baseado no trabalho de Souza Pinto et al. (2012), conforme a Figura 22. Constituída de um sistema fechado ou loop, na qual o fluido é bombeado desde o reservatório, através do sistema de transporte passando pela seção de teste (ST) para, finalmente, retornar ao reservatório. O fluido ocupa uma altura de 1 m, relativa à superfície livre em relação a base do reservatório. O tubo de saída do reservatório, se encontra a 0,1 m acima da base do mesmo e o retorno do fluido está a 0,1 m da superfície livre no reservatório.

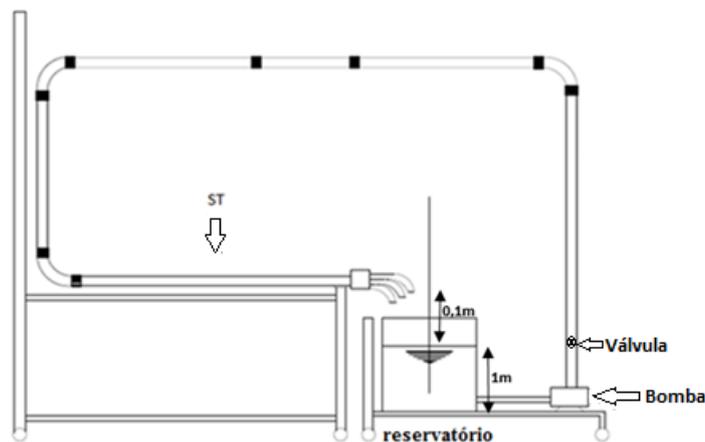


Figura 22 - Representação esquemática da bancada de testes para realizar a pesquisa.

O comprimento da seção de testes é 1 m. Os ensaios simulados consideram o diâmetro do tubo, em base ao Schedule 40, com valores de uma (1) e duas (2) polegadas, o que significa que o diâmetro interno é, respectivamente, 26,64 mm e 52,5 mm.

A sequência de passos executados para a realização das simulações é descrita em continuação. Os testes experimentais realizados por Souza Pinto (2012), serviram de base para a definição dos parâmetros de operação desejados (vazão, altura de carga) e, conseqüentemente, na seleção da bomba, quando dos testes simulados com água.

A escolha da bomba para o bombeamento de polpa é feita a partir da informação fornecida nas curvas características obtidas com os fornecedores. Destaca-se o fato que quando da análise do bombeamento de polpas não é possível utilizar as curvas características das bombas conforme utilizadas na primeira etapa, então utiliza-se os índices de carga (HR) e de rendimento (ER) para determinar a carga que entrega a bomba ao fluido e o rendimento com que vá operar a bomba nessas condições. Esses índices permitem correlacionar o bombeamento de água e polpa mineral a partir dos quais podem ser conhecidos os parâmetros de saída da simulação, os que são objeto de estudo e que serão analisados e discutidos em sequência.

4.2 Polpas minerais.

4.2.1 Caracterização

A polpa mineral é a mistura de um fluido carregador (água, frequentemente) e um sólido que é basicamente definido pela quantidade (concentração), pelo seu tamanho (granulometria) e pela gravidade específica ou densidade do sólido, que é a razão entre a massa específica (massa de uma unidade de volume) de uma substância e a massa específica de um dado material de referência, água a 4°C ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$).

A granulometria do sólido é um fator determinante na escolha dos parâmetros de um sistema de bombeamento de polpa, influenciando na escolha do material e diâmetro da tubulação e principalmente no comportamento do escoamento, uma vez que o aumento do

tamanho das partículas promove maior dificuldade para manter as partículas suspensas, e assim evitar o depósito no tubo, o que implicaria em um maior consumo de energia para o transporte.

A concentração volumétrica (em %) influi significativamente na viscosidade da polpa, devido a isso, é um parâmetro de extrema importância que influencia todo o comportamento do bombeamento de polpa (Ferreira, 2017).

A concentração volumétrica da polpa corresponde ao volume de sólidos presentes na polpa dividido pelo volume total da mistura, conforme expresso pela equação 30:

$$C_v = \frac{\text{volume de sólidos}}{\text{volume da mistura}} = \frac{Vol(s)}{Vol(s) + Vol(l)} \quad (30)$$

4.2.2 Reologia

Segundo (BISCO, 2009 p.1), a reologia é a ciência que estuda a deformação dos materiais, em geral, a que é medida através da viscosidade e tensão de escoamento. Estas são propriedades importantes a serem consideradas, principalmente, quando se trata de bombeamento de polpas. Ressalta-se ainda que cada minério possui um comportamento reológico diferente, não existindo uma padronização. Isso ocorre porque as propriedades reológicas são afetadas por vários fatores, tais como: forma da partícula, granulometria, temperatura, pressão, etc.

Nascimento (2008) enfatiza que as propriedades reológicas mais importantes no processamento de suspensões minerais são a viscosidade e a tensão limite de escoamento. Estas propriedades têm impacto direto no projeto de equipamentos, na eficiência e no consumo energético de diversas operações industriais, tais como a moagem a úmido de minérios e o transporte de polpas por minerodutos.

Ao contrário dos fluidos newtonianos, que apresentam um único valor de viscosidade independentemente da tensão de cisalhamento, as polpas se comportam como fluidos não newtonianos, onde a viscosidade varia com a taxa de cisalhamento. Grande parte das polpas minerais usuais podem ser assimiladas a um modelo denominado fluido de Bingham, que precisa ser cisalhado até um valor limite para começar a escoar como fluido newtoniano (CHAVES, 2002 p.110). A Figura 23 mostra o comportamento dos fluidos newtonianos e de Bingham, que precisam de uma tensão de cisalhamento mínima para iniciar o escoamento, além da polpa.

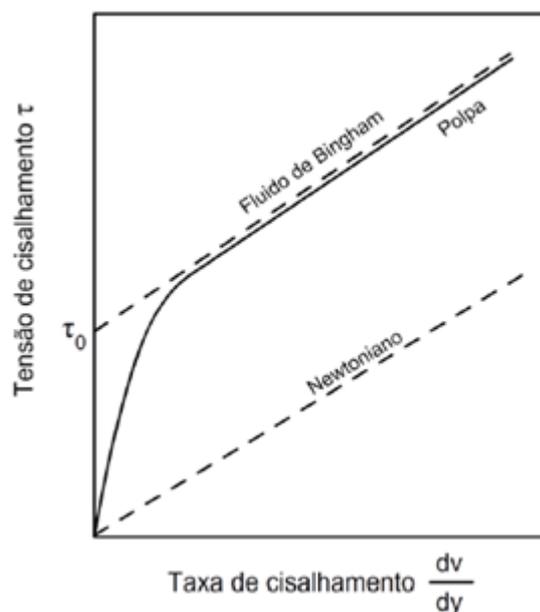


Figura 23 - Fluidos newtonianos e de Bingham (Chaves, 2002)

Observa-se que o fluido newtoniano pode ser representado por uma reta que passa pela origem e cuja inclinação é a viscosidade. O fluido de Bingham precisa ser cisalhado até um determinado valor limite, τ_0 , para começar a escoar e passar a se comportar como fluido newtoniano. A equação reológica empírica para o comportamento do plástico de Bingham é descrita pela equação 31 abaixo:

$$\tau = \tau_0 + \eta P \gamma \quad (31)$$

onde: τ é a tensão de cisalhamento (Pa); τ_0 a tensão de cisalhamento inicial (Pa); ηP sendo a viscosidade plástica (Pa.s) e γ a taxa de deformação (s^{-1}).

4.3 Definição dos Parâmetros

Para o desenvolvimento deste estudo, será definida, a seguir, a faixa de valores para os fatores associados ao sólido que caracteriza a polpa. Serão estudados quatro (4) sólidos, sendo eles a hematita, topázio, minério de ferro e quartzo, com gravidade específica iguais a 4,9, 3,52, 3,11 e 2,65, respectivamente. A granulometria (d50) dos sólidos presentes na polpa varia de 40 a 300 microns e a faixa de concentração volumétrica varia de 5 a 30%, conforme apresentados pela Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis/Fatores e os intervalos estudados.

Variáveis/Fatores	Níveis
A -> Granulometria da partícula d50 (μm)	40 a 300
B -> Concentração Volumétrica (%)	5 a 30
C -> Diâmetro interno do tubo (mm)	26,64 e 52,5

Segundo o guia para seleção de bombas de polpa da Warman de 2015, a polpa pode ser classificada preliminarmente em dois tipos, polpa decantável e não decantável.

Polpa decantável, caracterizada por:

- O escoamento dos sólidos pela bomba faz com que a performance com polpa seja reduzida se comparado ao uso com água. Os fatores de correção HR e ER são os que consideram a redução do desempenho das bombas.
- A altura de carga muda devido ao deslizamento entre a água e as partículas da polpa dependendo da densidade dos sólidos, tamanho e concentração.

Polpa não decantável, caracterizada por:

- Uma polpa onde os sólidos não se decantam no fundo do tanque ou tubagem, mas irão permanecer suspensos, sem agitação, por um longo período de tempo.

Através da correlação entre a granulometria das partículas e sua respectiva gravidade específica, segundo apresentado pela Figura 24, é possível prever se a polpa terá comportamento decantável ou não.

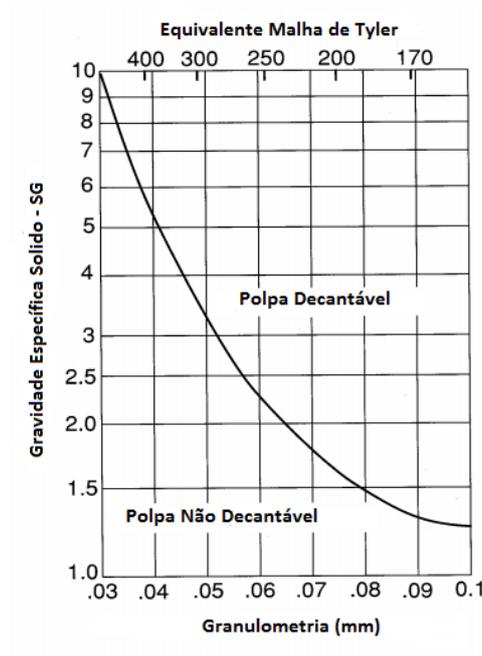


Figura 24 – Região de decantação da polpa (Adaptado de Warman, 2015).

Para relacionar a influência da forma da partícula sólida, sua esfericidade, tem-se o fator de forma (K), que representa a relação entre o volume da partícula e o diâmetro ao cubo (Da) de uma esfera com mesmo projeção de área da partícula, Ap, conforme apresentado pela equação 32. No presente trabalho o valor é fixado em 0,85.

$$K = \frac{\text{volume da partícula}}{D_a^3} \quad (32)$$

Onde

$$D_a = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}}$$

4.4 Simulação

4.4.1 AFT Fathom

As simulações foram feitas utilizando o software AFT Fathom, na sua versão Demo. Estudos prévios (Ferreira, 2016) têm demonstrado as capacidades desse software para simular tanto o transporte com fluido água, quanto o transporte de polpa mineral. O AFT Fathom usa o método de Newton-Raphson para resolver as equações fundamentais do escoamento como a equação de Bernoulli, a equação de perdas de Darcy-Weisbac e a lei da conservação da massa, além de métodos próprios desenvolvidos pelo AFT, usando relações baseadas nas equações de Reynolds e de Bernoulli para o cálculo de fricção do tubo.

O AFT Fathom oferece, de forma fácil, todo o suporte para o estudo do comportamento desses escoamentos com precisão de dados. É uma ferramenta de uso geral para hidráulica de rede tubulares, para modelar fluidos incompressíveis e compressíveis, permanentes e transientes, com ou sem transferência de calor e fluidos newtonianos e não-newtonianos, permitindo o cálculo de todas as variáveis hidráulicas envolvidas em um dado fenômeno. Possui um módulo próprio para o transporte decantável (Settling Slurry Modeling - SSL) que tem como base os estudos de Wilson et al., (2006).

4.4.2 Procedimentos para as simulações

A realização das simulações consta de duas etapas. A primeira etapa é para simulação de fluido água, que fornecerá a informação necessária para a segunda etapa que consiste na simulação para o fluido de polpa de minério. Inicialmente realiza-se a simulação com água pelo fato que os fabricantes de bombas, mesmo que para o uso específico em polpas de minério, caracterizam as mesmas para o trabalho com água, devido a impossibilidade de

prever as condições específicas onde elas irão operar. Os resultados obtidos nessa etapa constituem a base para a simulação da polpa.

Para essa primeira etapa, o primeiro passo, após a definição e configuração da bancada de testes simulados experimentais, é selecionar a bomba centrífuga considerando as características do sistema de transporte. Uma característica de operação importante é que a bomba selecionada deve trabalhar na sua região de máxima eficiência. Entende-se por região de máxima eficiência aquela na qual o rendimento de operação satisfaça a condição $\eta_{oper} \geq 0,90\eta_{m\acute{a}x}$. Para a seleção da bomba que vai operar na bancada, utilizaram-se os resultados experimentais de Souza Pinto (2012), a partir dos quais foram conhecidos os parâmetros de operação de carga H e vazão Q, necessários para seleção da bomba. Após a seleção da bomba, são executadas as simulações para fluido água para o sistema de transporte com uma de duas polegadas, obtendo os parâmetros de operação da bomba como vazão, carga, potência e rendimento. Nessas simulações, o modelo utilizado pelo AFT Fathom para considerar o funcionamento da bomba foi o denominado *Pump Curve* (ou Curvas Características da Bomba), que consiste na entrada dos dados correspondentes às curvas características de carga, rendimento e NPSH.

Após caracterização do sistema de bombeamento com água, realizam-se as simulações para polpa. O desempenho de bombas centrífugas é afetado quando o bombeamento é de polpa. Sellgren e Addie (1993) destacam que o bombeamento de polpas reduz a altura de carga (H) e a eficiência da operação (η), a uma vazão constante, promovendo maior consumo de potência, conforme ilustrado na Figura 25.

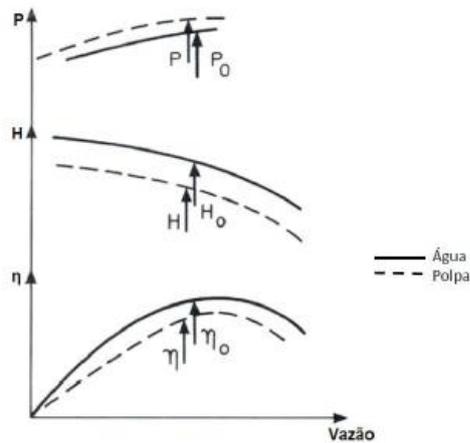


Figura 25 - Comparação da potência requerida (P), carga (H) e eficiência (η) para operação de bombeamento de polpa e água (Adaptado de Sellgren e Addie (1993)).

Uma vez determinados os principais parâmetros operacionais da bomba para escoamento de água, são determinados os fatores de correção para a carga HR e para o rendimento ER, que correlacionam o bombeamento de água e polpa mineral. O fato de a seleção da bomba garantir que ela vai operar com alto rendimento, na operação com água, deve garantir, também, que quando da operação com polpas, a bomba opere com alto rendimento a pesar que, nesses casos, o desempenho da bomba diminui quando comparado com água.

As equações (33) e (34) definem a relação entre a carga (H) e a eficiência da bomba (η) para água e polpa

$$HR = \left(\frac{H \text{ para polpa}}{H \text{ para água}} \right) \quad (33)$$

$$ER = \left(\frac{\eta \text{ para polpa}}{\eta \text{ para água}} \right) \quad (34)$$

A obtenção dos valores para os fatores ER e HR, que foram base para as simulações realizadas para o escoamento de polpa de minério, pode ser feita de forma gráfica, como apresentado pela Figura 26, que representa um dos vários diagramas que determinam esses valores de forma abrangente, a partir da densidade do minério, concentração volumétrica, granulometria e, também, leva em conta o diâmetro do rotor da bomba utilizada (Weir, 2002). Pode-se notar que para concentração volumétrica menor ou igual a 20 % adota-se ER=HR, diferentemente do ábaco de Cave que adota essa igualdade para todas as concentrações.

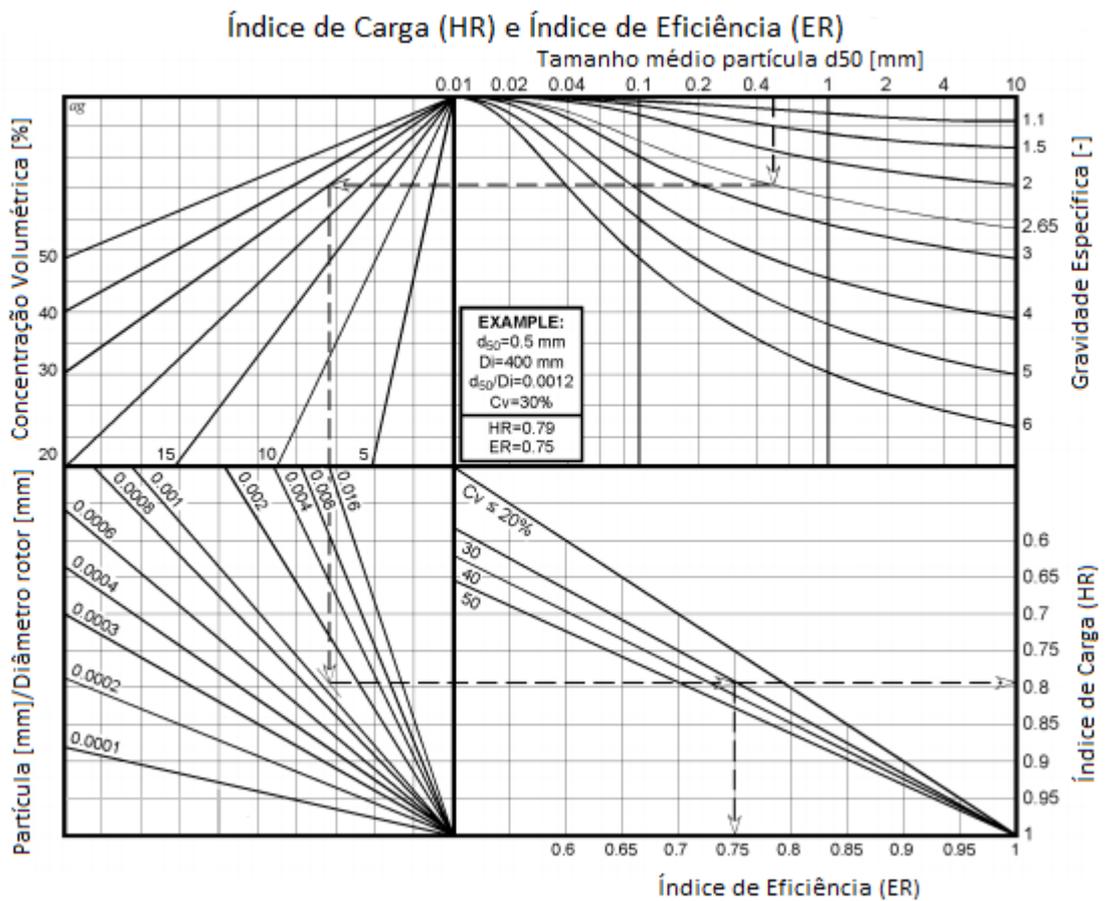


Figura 26 – Gráfico para determinação dos Índices de carga e Eficiência (Weir, 2002)

Como exemplo, ilustrado pela linha tracejada na Figura 26, Weir (2002) utiliza partícula com gravidade específica igual a 2,65, com granulometria de 0,5 mm (500 μ m), diâmetro do

rotor igual a 400 mm e concentração volumétrica de 30 %, onde são obtidos os valores dos índices HR e ER, iguais à 0,79 e 0,75, respectivamente.

Para a realização das simulações com polpas de minério os valores de carga e eficiência da bomba para polpa, obtidos mediante a utilização dos coeficientes ER e HR, equações 33 e 44, são inseridos no software AFT Fathom. Nesse caso, o modelo utilizado para a bomba é denominado de Head Rise Fixed, através do qual o programa é alimentado com os valores de carga e rendimento, o que permite obter os parâmetros de operação com bombeamento de polpa como vazão, velocidade de escoamento, velocidade máxima de deposição, velocidade crítica de deposição, potência consumida, gradiente de pressão, por metro de tubulação, relativos a perdas por atrito e acessórios, entre outros.

Uma vez estabelecido o set up para cada simulação de polpa, o procedimento experimental consiste em promover, mediante regulagem simulada, através da válvula representada na Figura 22, a queda gradativa da velocidade do escoamento. Esse procedimento consiste em fixar o valor do rendimento dentro de cada combinação de variáveis e reduzir gradativamente os valores de carga, até o ponto em que a velocidade de escoamento se torna igual a velocidade crítica de deposição. Valores abaixo desse ponto também são obtidos e analisados.

Para cada simulação, o valor da velocidade de escoamento foi comparado ao valor da velocidade crítica. Quando o valor da velocidade da polpa é maior que o valor da velocidade crítica, uma nova regulagem é feita e os valores de velocidade novamente comparados até esses dois valores de velocidade serem iguais. Velocidade de escoamento de polpa menores que esse valor crítico indicam o início da formação de uma camada de partículas no fundo do tubo. Mesmo assim, valores abaixo desse valor crítico (V_c) também serão analisados, e para qualquer valor de velocidade de escoamento (V), um gradiente de perda de pressão relativo a perdas por atrito é obtido e associado ao respectivo valor de V .

5. Resultados

A simulação de bombeamento de polpa de minérios permitiu caracterizar a relação entre os diferentes fatores e/ou variáveis em estudo com a velocidade crítica de deposição dos sólidos. Atenção importante é dedicada à relação entre a velocidade do escoamento e o gradiente de pressão relativo à perda por atrito por metro de tubo horizontal ($\Delta P/L$). A partir dessa relação é possível identificar qual a velocidade de escoamento que produz o menor gradiente de pressão ($\Delta P/L$), ou seja, qual a velocidade crítica de deposição nessas condições. Curvas típicas desse comportamento, como mostrado nas figuras 14 e 15, foram ser obtidas.

Após a determinação da velocidade crítica de deposição para cada combinação de fatores estudados, foi avaliado a relação entre esses valores e as principais correlações existentes na literatura, sendo que, a condição $V < V_c$ favorece a deposição da partícula no fundo do tubo, enquanto $V > V_c$ cria suspensão turbulenta que evita a estratificação de sólidos no tubo.

Nesse capítulo estão apresentados os resultados encontrados, no intuito de mostrar a validade da metodologia proposta. Os resultados que estão apresentados são correspondentes a bancada de testes simulados com diâmetro de tubulação de uma e duas polegadas, partículas sólidas de quartzo (SG 2,62), minério de ferro (SG 3,11), topázio (SG 3,52) e hematita (SG 4,90), granulometria de 40 a 300 microns e concentração volumétrica variando de 5 a 30%.

5.1 Seleção da Bomba de Polpa

Após estabelecidos os parâmetros da bancada de testes, com o trajeto (layout), comprimento e diâmetro da tubulação na seção de teste simulados, e a partir de estudos prévios e dos resultados encontrados por Souza Pinto (2012) pôde-se delimitar uma região de trabalho através da carga (m) que a bomba deve entregar, e vazão para os sistemas com diâmetros de 1 e 2 polegadas, como apresentado pelas Tabelas 3 e 4. Assim seleciona-se uma bomba de polpa, que atenda a faixa de operação dos sistemas proposto trabalhando em alta eficiência. Segundo Ferreira (2018), existe, para cada diâmetro de tubulação, uma bomba específica que abrange as condições necessárias, operando em alta eficiência com um menor gasto de energia.

Tabela 3 - Faixa de Operação com diâmetro da secção de teste de 1 Polegada

Faixa de Operação do Sistema 1 Polegada	
Vazão (m ³ /h)	0,3 a 3
Altura de Carga (m)	1 a 5

Tabela 4 - Faixa de Operação com diâmetro da secção de teste de 2 Polegadas

Faixa de Operação do Sistema 2 Polegadas	
Vazão (m ³ /h)	3 a 20
Altura de Carga (m)	1 a 5

Após ampla busca, determinou-se que a bomba KSB 31-12 1700 rpm, com diâmetro de rotor igual e 4 polegadas (ϕ 105), e a bomba 2AC-1150 rpm, com diâmetro de rotor igual a 6,5 polegadas, cuja as curvas características (para o bombeamento de água) são apresentadas pelas Figuras 27 e 28 atendem os quesitos propostos, para uma e duas polegadas respectivamente.

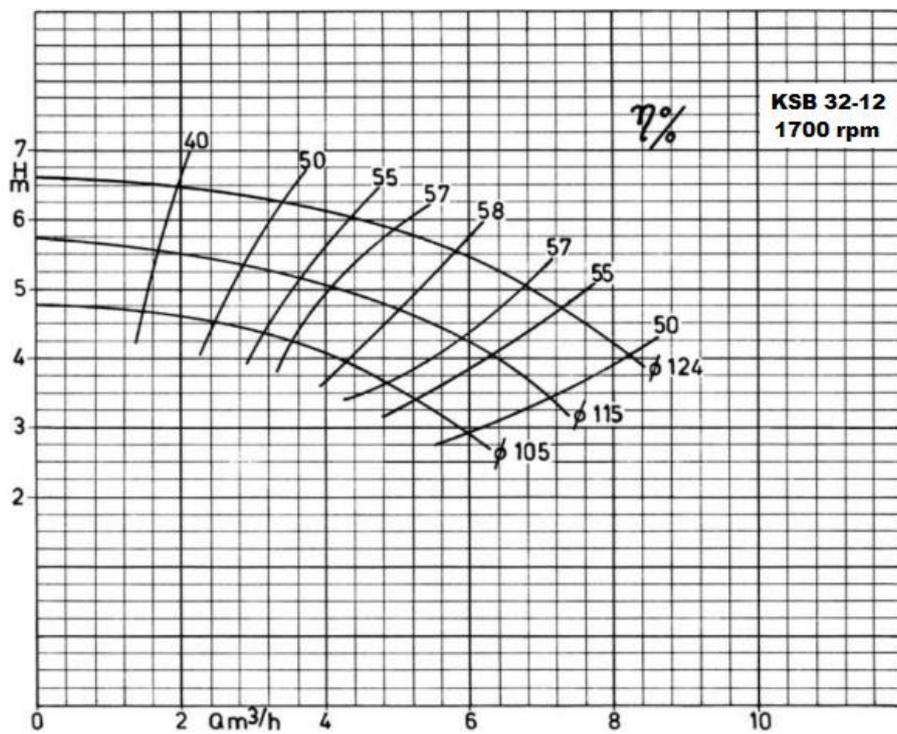


Figura 27 - Curva Característica para a família de bombas KSB – 32-12 1700 rpm.

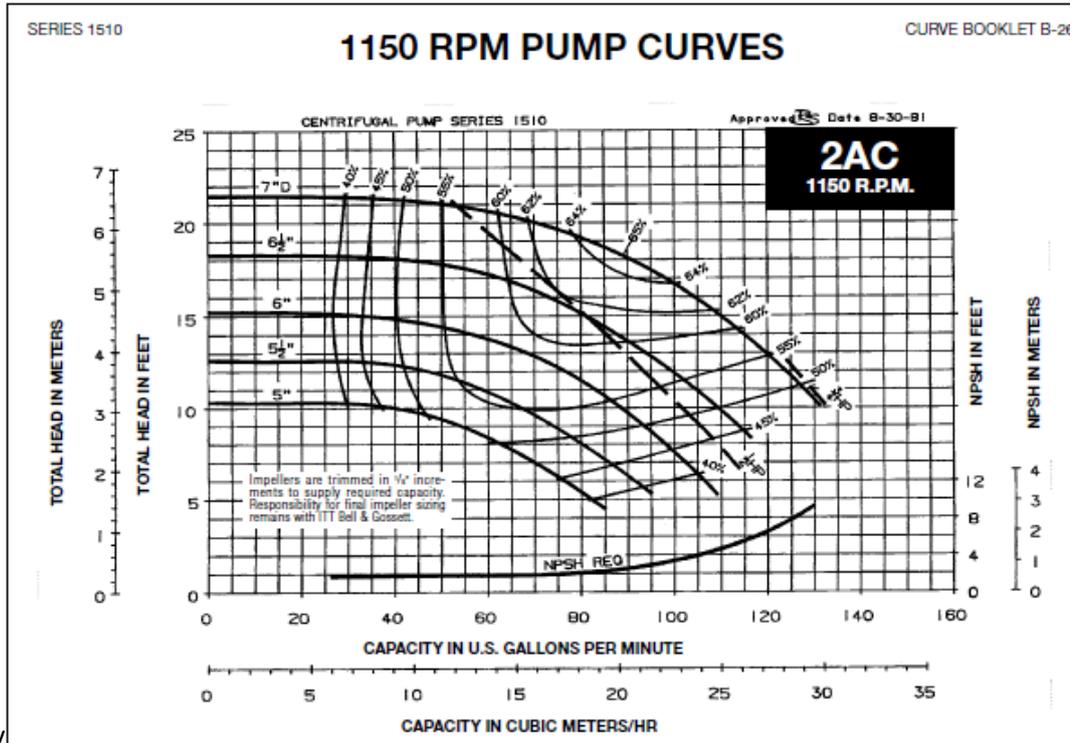


Figura 28 - Curva Característica para a família de bombas 2AC - 1150 rpm.

Após a seleção das bombas, as curvas características foram digitalizadas utilizando o programa *GetData Graph Digitizer* para alimentar o *software* de simulação e foram realizadas as simulações para o bombeamento de água, obtendo os valores dos parâmetros de operação, conforme apresentados pelas Tabelas 5 e 6 para diâmetro da seção de teste de 1 e 2 polegadas, respectivamente.

Tabela 5 - Parâmetros de saída para o bombeamento de água com diâmetro da seção de teste de 1 polegada.

Bomba	ÁGUA – 1 Polegada
	KSB 32-12 1700 rpm
Q(m ³ /hr)	3,04
V(m/s)	1,52
Altura de carga (m)	4,36
Eficiência (%)	55
Potência (kW)	0,066
Dp/Dx (kPa/m)	1,13

Tabela 6 - Parâmetros de saída para o bombeamento de água com diâmetro da seção de teste de 2 polegadas.

Bomba	ÁGUA – 2 Polegadas
	2 AC- 1150 rpm
Q(m ³ /hr)	17,61
V(m/s)	2,26
Altura de carga (m)	4,64
Eficiência (%)	61,46
Potência (kW)	0,36
Dp/Dx (kPa/m)	1,03

Conforme procurado, em ambos os casos, o rendimento de operação das bombas é superior a $0,9\eta_{max}$; $0,96\eta_{max}$ e $0,945\eta_{max}$, respectivamente. Com os dados de saída do programa, correspondente aos parâmetros de operação das bombas para água é possível então, determinar a carga e o rendimento com que as bombas operarão quando do bombeamento de polpas, através da relação destes parâmetros com os coeficientes ER e HR.

5.2 Coeficientes ou Índices de Correção

Os coeficientes ER e HR, para toda a faixa de estudo proposta foram determinados pelo nomográfico da figura 22 e estão apresentados pelas Tabelas 7 e 8 para o quartzo, 9 e 10 para o minério de ferro, 11 e 12 para o topázio e 13 e 14 para hematita. Pode-se observar que até a concentração de 20 % os valores dos coeficientes são iguais, a partir da qual os valores do índice de rendimento (ER) tendem a ser um pouco inferiores se comparado ao valor do índice de carga (HR).

Tabela 7 – Coeficientes ER e HR – Quartzo 1 Polegada.

Concentração Volumétrica	40µm		70µm		75µm	
	Coeficientes					
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR
5	0,997	0,997	0,995	0,995	0,994	0,994
10	0,983	0,983	0,970	0,970	0,969	0,969
15	0,978	0,978	0,951	0,951	0,948	0,948
20	0,971	0,971	0,943	0,943	0,941	0,941
25	0,960	0,965	0,925	0,931	0,923	0,930
30	0,948	0,958	0,900	0,920	0,895	0,918

Concentração Volumétrica	100µm		150µm		300µm	
	Coeficientes					
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR
5	0,988	0,988	0,987	0,987	0,973	0,973
10	0,965	0,965	0,960	0,960	0,929	0,929
15	0,956	0,956	0,946	0,946	0,888	0,888
20	0,934	0,934	0,920	0,920	0,848	0,848
25	0,905	0,916	0,897	0,906	0,802	0,823
30	0,877	0,898	0,867	0,888	0,758	0,797

Tabela 8 – Coeficientes ER e HR – Quartzo 2 Polegadas.

Concentração Volumétrica	40µm		70µm		75µm	
	Coeficientes					
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR
5	0,999	0,999	0,997	0,997	0,996	0,996
10	0,985	0,985	0,972	0,972	0,970	0,970
15	0,980	0,980	0,965	0,965	0,963	0,963
20	0,974	0,974	0,947	0,947	0,945	0,945
25	0,963	0,967	0,9275	0,935	0,925	0,9325
30	0,950	0,960	0,908	0,923	0,905	0,92

Concentração Volumétrica	100µm		150µm		300µm	
	Coeficientes					
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR
5	0,991	0,991	0,989	0,989	0,975	0,975
10	0,967	0,967	0,962	0,962	0,931	0,931
15	0,958	0,958	0,949	0,949	0,891	0,891
20	0,937	0,937	0,928	0,928	0,850	0,850
25	0,9085	0,9185	0,899	0,909	0,805	0,825
30	0,880	0,900	0,870	0,890	0,760	0,80

Tabela 9 - Coeficientes ER e HR – Minério de Ferro 1 Polegada.

Concentração Volumétrica	40µm		70µm		75µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	ER	ER	HR	
5	0,997	0,997	0,983	0,983	0,980	0,980	
10	0,959	0,959	0,947	0,947	0,941	0,941	
15	0,933	0,933	0,931	0,931	0,918	0,918	
20	0,897	0,897	0,895	0,895	0,871	0,871	
25	0,872	0,893	0,858	0,873	0,848	0,858	
30	0,833	0,858	0,822	0,848	0,812	0,833	

Concentração Volumétrica	100µm		150µm		300µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,973	0,973	0,971	0,971	0,948	0,948	
10	0,938	0,938	0,933	0,933	0,888	0,888	
15	0,3913	0,3913	0,898	0,898	0,828	0,828	
20	0,851	0,851	0,836	0,836	0,761	0,761	
25	0,833	0,848	0,813	0,833	0,688	0,723	
30	0,798	0,813	0,793	0,813	0,608	0,668	

Tabela 10 - Coeficientes ER e HR – Minério de Ferro 2 Polegadas.

Concentração Volumétrica	40µm		70µm		75µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,999	0,999	0,985	0,985	0,982	0,982	
10	0,960	0,960	0,950	0,950	0,943	0,943	
15	0,935	0,935	0,925	0,925	0,920	0,920	
20	0,900	0,900	0,890	0,890	0,875	0,875	
25	0,875	0,895	0,860	0,875	0,850	0,860	
30	0,835	0,860	0,825	0,850	0,815	0,835	

Concentração Volumétrica	100µm		150µm		300µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,975	0,975	0,973	0,973	0,950	0,950	
10	0,940	0,940	0,935	0,935	0,890	0,890	
15	0,915	0,915	0,900	0,900	0,830	0,830	
20	0,855	0,855	0,840	0,840	0,765	0,765	
25	0,835	0,85	0,815	0,835	0,690	0,725	
30	0,800	0,815	0,795	0,815	0,610	0,670	

Tabela 11 - Coeficientes ER e HR – Topázio 1 Polegada.

Concentração Volumétrica	40µm		70µm		75µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,992	0,992	0,985	0,985	0,984	0,984	
10	0,984	0,984	0,970	0,970	0,968	0,968	
15	0,978	0,978	0,950	0,950	0,948	0,948	
20	0,971	0,971	0,941	0,941	0,935	0,935	
25	0,960	0,965	0,925	0,931	0,920	0,928	
30	0,948	0,958	0,900	0,920	0,895	0,918	

Concentração Volumétrica	100µm		150µm		300µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,973	0,973	0,965	0,965	0,945	0,945	
10	0,948	0,948	0,928	0,928	0,895	0,895	
15	0,909	0,909	0,885	0,885	0,823	0,823	
20	0,875	0,875	0,845	0,845	0,748	0,748	
25	0,830	0,848	0,800	0,823	0,685	0,720	
30	0,785	0,820	0,748	0,790	0,600	0,658	

Tabela 12 - Coeficientes ER e HR – Topázio 2 Polegadas.

Concentração Volumétrica	40µm		70µm		75µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,994	0,994	0,987	0,987	0,986	0,986	
10	0,985	0,985	0,972	0,972	0,970	0,970	
15	0,980	0,980	0,952	0,952	0,950	0,950	
20	0,974	0,974	0,943	0,943	0,940	0,940	
25	0,963	0,967	0,928	0,933	0,925	0,930	
30	0,95	0,96	0,908	0,923	0,905	0,920	

Concentração Volumétrica	100µm		150µm		300µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,975	0,975	0,967	0,967	0,948	0,948	
10	0,953	0,953	0,930	0,930	0,897	0,897	
15	0,930	0,930	0,887	0,887	0,825	0,825	
20	0,905	0,905	0,848	0,848	0,750	0,750	
25	0,875	0,890	0,805	0,825	0,687	0,722	
30	0,865	0,880	0,750	0,792	0,605	0,660	

Tabela 13 - Coeficientes ER e HR – Hematita 1 Polegada.

Concentração Volumétrica	40µm		70µm		75µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,988	0,988	0,981	0,981	0,979	0,979	
10	0,978	0,978	0,967	0,967	0,965	0,965	
15	0,968	0,968	0,951	0,951	0,949	0,949	
20	0,955	0,955	0,931	0,931	0,929	0,929	
25	0,944	0,951	0,907	0,916	0,905	0,914	
30	0,932	0,946	0,882	0,900	0,880	0,898	

Concentração Volumétrica	100µm		150µm		300µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,965	0,965	0,948	0,948	0,918	0,918	
10	0,931	0,931	0,898	0,898	0,838	0,838	
15	0,898	0,898	0,848	0,848	0,740	0,740	
20	0,853	0,853	0,788	0,788	0,642	0,642	
25	0,812	0,829	0,725	0,740	0,547	0,587	
30	0,767	0,800	0,662	0,711	-	-	

Tabela 14 - Coeficientes ER e HR – Hematita 2 Polegadas.

Concentração Volumétrica	40µm		70µm		75µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,990	0,990	0,983	0,983	0,981	0,981	
10	0,980	0,980	0,969	0,969	0,967	0,967	
15	0,970	0,970	0,953	0,953	0,950	0,950	
20	0,958	0,958	0,934	0,934	0,930	0,930	
25	0,947	0,954	0,910	0,918	0,907	0,915	
30	0,935	0,949	0,885	0,905	0,882	0,902	

Concentração Volumétrica	100µm		150µm		300µm		
Coeficientes							
(%)	ER	HR	ER	HR	ER	HR	
5	0,967	0,967	0,950	0,950	0,920	0,920	
10	0,933	0,933	0,900	0,900	0,840	0,840	
15	0,900	0,900	0,850	0,850	0,742	0,742	
20	0,856	0,856	0,790	0,790	0,645	0,645	
25	0,815	0,832	0,727	0,742	0,550	0,590	
30	0,77	0,805	0,665	0,715	-	-	

De forma geral, pode-se observar, que com o aumento da granulometria e concentração volumétrica de partículas ocorre uma diminuição no valor dos índices de carga (HR) e eficiência (ER) indicando, conforme mostrado pela Figura 29 para o quartzo, que é tendência para os outros minerais.

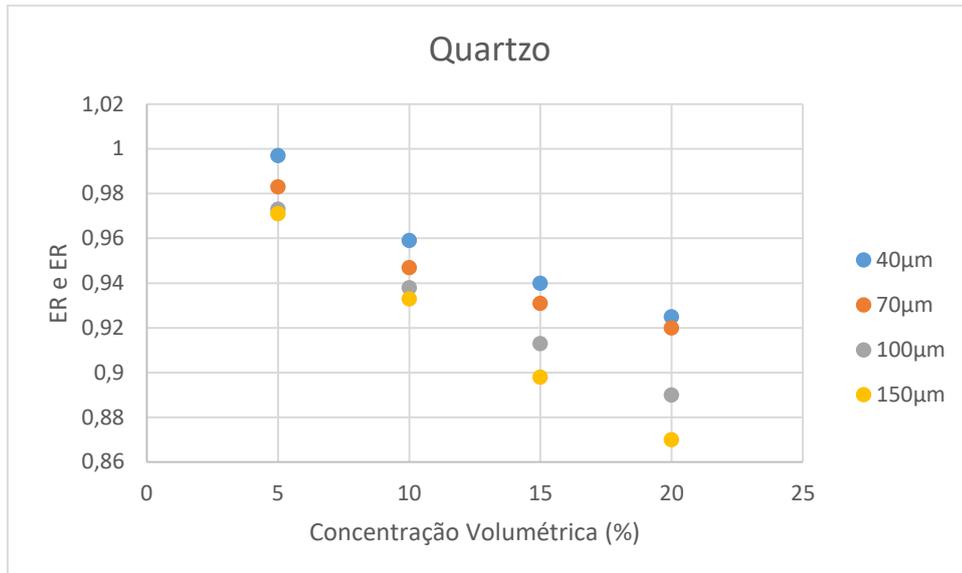


Figura 29 – Relação dos Índices de Carga (HR) e Eficiência (ER) versus Granulometria.

Em relação a alteração da gravidade específica ou mudança do mineral transportado os comportamentos se matem, o aumento da gravidade específica, promove aumento dos índices de carga (HR) e eficiência (ER), devido ao aumento de densidade provocado por partículas solidas mais densas. As Figuras 30 e 31 apresentam o comportamento dos coeficientes ER e HR com relação a mudança de mineral para dois casos que representam o comportamento geral, sendo 70 microns para 1 polegada de diâmetro de tubo e 100 microns para 2 polegadas de diâmetro de tubo.

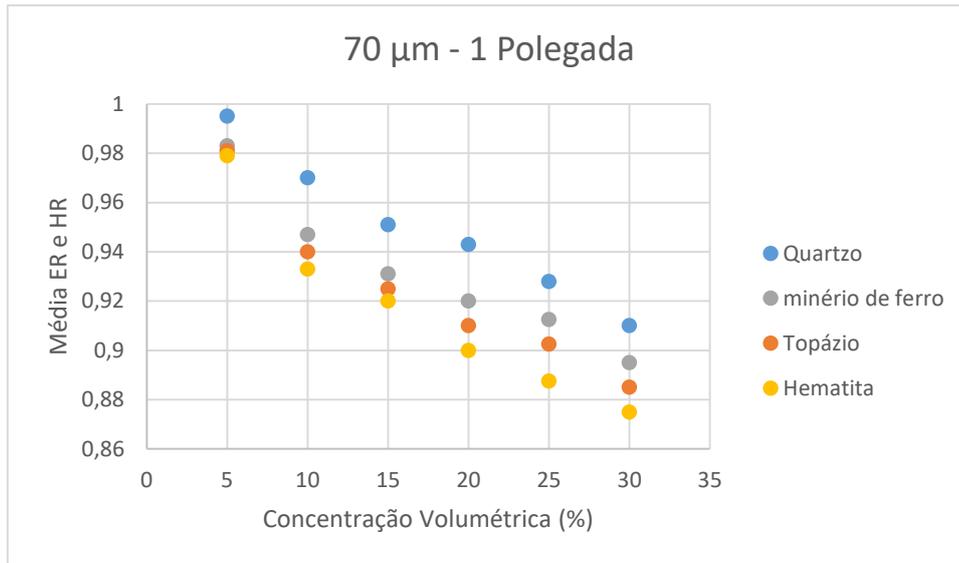


Figura 30 - Relação dos Índices de Carga (HR) e Eficiência (ER) versus material – 1 Polegada.

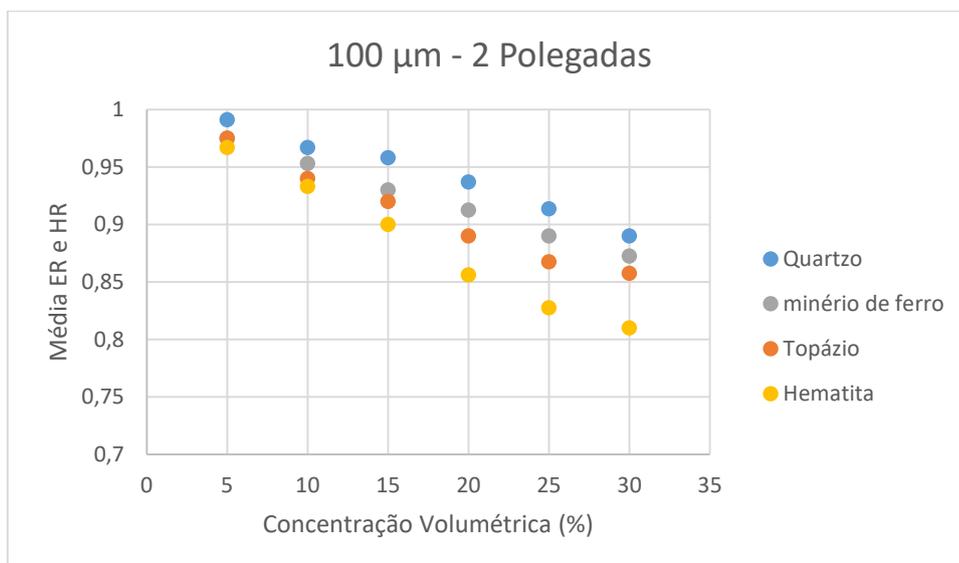


Figura 31 – Relação dos Índices de Carga (HR) e Eficiência (ER) versus material – 2 Polegadas.

Já com relação ao diâmetro de tubulação o comportamento se inverte, com o aumento de diâmetro do tubo, ocorre aumento dos índices de carga (HR) e eficiência (ER), devido a redução da perda de carga decorrente do aumento do diâmetro que favorece o transporte com menor gasto de energia.

5.3 Velocidade crítica de deposição

A seguir estão apresentados pelas Tabelas 15,16,17 e 18 os valores de velocidade crítica de deposição obtidos através da simulação computacional mediante a utilização do software AFT Fathom para os 4 minerais, com granulometria d50 de 40 a 300 microns e concentração volumétrica variando de 5 a 30%.

Da análise desses resultados e como pode ser visto pelas tabelas a seguir, a velocidade crítica de deposição apresenta os menores valores para baixos valores de concentração volumétrica, o valor de V_c aumenta, com o aumento de C_v até um valor máximo, denominado velocidade máxima de deposição (V_{sm}), destacado em negrito nas tabelas, em valores intermediários de concentração volumétrica (que depende do diâmetro do tubo e tamanho e densidade de partícula) e em seguida decai para valores menores com contínuo aumento de C_v , conforme já discutido e observado por Wilson (1976)

Tabela 15 Velocidade Crítica de Deposição (SG 2,62)

Sólido	Tamanho Partícula	Concentração Volumétrica (%)	Vc (m/s)	
			1 pol	2 Pol
Quartzo	40µm	5	0,0876	0,0746
		10	0,1634	0,1428
		15	0,2265	0,2041
		20	0,2764	0,2576
		25	0,3122	0,3022
		30	0,3328	0,3365
	70µm	5	0,2672	0,2451
		10	0,4480	0,4389
		15	0,5530	0,5825
		20	0,5929	0,6768
		25	0,5787	0,7232
		30	0,5219	0,7235
	75µm	5	0,2974	0,2777
		10	0,4905	0,4911
		15	0,5945	0,6424
		20	0,6247	0,7349
		25	0,5961	0,7715
		30	0,5238	0,7562
	100µm	5	0,5009	0,4401
		10	0,6911	0,7314
		15	0,7485	0,8941
		20	0,7234	0,9483
		25	0,6457	0,9145
		30	0,5368	0,8133
	150µm	5	0,7445	0,9044
		10	0,8661	1,2010
		15	0,8407	1,2670
		20	0,7476	1,1990
		25	0,6229	1,0510
		30	0,4875	0,8585
300µm	5	0,8623	1,2110	
	10	0,8286	1,2550	
	15	0,7145	1,1340	
	20	0,5822	0,9570	
	25	0,5441	0,7650	
	30	0,3355	0,5822	

Tabela 16 - Velocidade Crítica de Deposição (SG 3,11)

Sólido	Tamanho Partícula	Concentração Volumétrica (%)	Vc (m/s)	
			1 pol	2 Pol
Minério de Ferro	40µm	5	0,1159	0,0935
		10	0,2142	0,1792
		15	0,2944	0,2561
		20	0,3556	0,3233
		25	0,3970	0,3792
		30	0,4176	0,4222
	70µm	5	0,3339	0,3059
		10	0,5528	0,5429
		15	0,6729	0,7132
		20	0,7103	0,8194
		25	0,6814	0,8645
		30	0,6023	0,8523
	75µm	5	0,3837	0,3449
		10	0,6085	0,6039
		15	0,7201	0,7817
		20	0,7437	0,8836
		25	0,7003	0,9152
		30	0,609	0,8834
	100µm	5	0,6188	0,5442
		10	0,8309	0,8846
		15	0,8847	1,0630
		20	0,8442	1,1110
		25	0,7458	1,0560
		30	0,6146	0,9260
	150µm	5	0,8701	1,0630
		10	0,9932	1,3780
		15	0,9529	1,4330
		20	0,8402	1,3410
		25	0,6953	1,1650
		30	0,5412	0,9451
300µm	5	0,9895	1,3830	
	10	0,9403	1,4150	
	15	0,8055	1,2690	
	20	0,6533	1,0650	
	25	0,5056	0,8474	
	30	0,3743	0,6472	

Tabela 17 - Velocidade Crítica de Deposição (SG 3,56)

Sólido	Tamanho Partícula	Concentração Volumétrica (%)	Vc (m/s)	
			1 pol	2 Pol
Topázio	40µm	5	0,1413	0,1110
		10	0,2596	0,2127
		15	0,3542	0,3039
		20	0,4246	0,3836
		25	0,4700	0,4500
		30	0,4895	0,5010
	70µm	5	0,3989	0,3631
		10	0,6459	0,6395
		15	0,7745	0,8331
		20	0,8078	0,9484
		25	0,7669	0,9905
		30	0,6715	0,9649
	75µm	5	0,459	0,4077
		10	0,7093	0,7083
		15	0,8255	0,9089
		20	0,8420	1,0170
		25	0,7850	1,0430
		30	0,6769	0,9923
	100µm	5	0,7193	0,9509
		10	0,9478	1,0300
		15	0,9973	1,2160
		20	0,9433	1,2550
		25	0,8274	1,1800
		30	0,6778	1,0260
	150µm	5	0,9737	1,2040
		10	1,0970	1,5340
		15	1,0440	1,5770
		20	0,9148	1,4640
		25	0,7536	1,2630
		30	0,5842	1,0200
300µm	5	1,094	1,5350	
	10	1,0310	1,5550	
	15	0,8792	1,386	
	20	0,7106	1,1580	
	25	0,5524	0,9183	
	30	0,4052	0,6945	

Tabela 18 - Velocidade Crítica de Deposição (SG 4,9)

Sólido	Tamanho Partícula	Concentração Volumétrica (%)	Vc (m/s)	
			1 pol	2 Pol
Hematita	40µm	5	0,2143	0,1683
		10	0,3880	0,3204
		15	0,5214	0,4548
		20	0,6140	0,5696
		25	0,6662	0,6624
		30	0,6783	0,7302
	70µm	5	0,5900	0,5225
		10	0,9022	0,9046
		15	1,0430	1,1570
		20	1,0590	1,2890
		25	0,9830	1,3200
		30	0,8448	1,2470
	75µm	5	0,6665	0,5800
		10	0,9772	0,9900
		15	1,1000	1,2500
		20	1,094	1,3680
		25	0,9995	1,3700
		30	0,8472	1,2700
	100µm	5	0,9876	0,9400
		10	1,2520	1,4100
		15	1,2860	1,6130
		20	1,1940	1,6200
		25	1,0330	1,4920
		30	0,8358	1,2740
	150µm	5	1,2390	1,5680
		10	1,3580	1,9300
		15	1,2710	1,9400
		20	1,1000	1,7670
		25	0,8976	1,5050
		30	0,6904	1,2010
300µm	5	1,3580	1,9200	
	10	1,2600	1,9100	
	15	1,0630	1,6800	
	20	0,8535	1,3900	
	25	0,6553	1,0940	
	30	-	-	

Devido ao grande número de resultados obtidos neste trabalho, na análise dos dados informados pelas tabelas 15 a 18 acima, será apresentada, somente, os resultados obtidos para uma faixa de intervalos das variáveis, sendo representativa do comportamento da

velocidade crítica de deposição em todas as faixas. Pode-se observar que, como tendência, ocorre um aumento da velocidade crítica de deposição com o aumento da granulometria, gravidade específica e diâmetro de tubulação.

Por exemplo, o aumento do tamanho das partículas de 70 para 100 microns, com valores fixos de concentração volumétrica em 20% e de diâmetro de seção de teste de duas polegadas, verifica-se, para o quartzo (S.G 2,62) um aumento da velocidade crítica de deposição de 0,6768 m/s para 0,9483 m/s, representando um incremento de 28,6%, e para o caso do minério de ferro (S.G 3,11) o incremento da velocidade crítica é de 26,24% (de 0,8194 m/s para 0,111 m/s), resultados esses justificados pela necessidade de uma maior velocidade de bombeamento para manter partículas maiores suspensas durante o transporte.

Em outro sentido, a mudança de material, do quartzo, com menor gravidade específica, para o minério de ferro, mantendo constante a concentração em 20%, granulometria em 100 microns e diâmetro de tubo de duas polegadas, promove um aumento da velocidade crítica de 0,9483 m/s para 1,111 m/s, representando um aumento de 14,64%. Na comparação do topázio para a hematita, nas mesmas condições acima descritas, a velocidade crítica tem um aumento de 1,255 m/s para 1,620 m/s, representando um incremento de 22,53%. Esses resultados são coerentes com a literatura e justificam porque, devido ao aumento da densidade das partículas sólidas, uma maior energia e velocidade de escoamento são necessárias para evitar o depósito no fundo do tubo.

O aumento do diâmetro da tubulação de uma para duas polegadas, mantendo-se a concentração volumétrica em 20% e granulometria 100 microns, provoca um aumento da velocidade crítica de deposição de 0,7234 m/s para 0,9483 m/s para o quartzo, de 0,8442 m/s para 1,1110 m/s para o minério de ferro, de 0,9433 m/s para 1,2550 m/s para o topázio e de 1,1940 m/s para 1,620 m/s para a hematita, representando aumentos de 23,71%, 24,01%, 24,83% e 26,29% respectivamente, justificados pela necessidade de uma maior velocidade de escoamento, devido a maior espessura exibida pelo leito móvel, como já discutido por Doron e Barnea (1993) e Souza Pinto (2012).

O aumento da granulometria, diâmetro de tubo e gravidade específica promovem o aumento de V_{sm} para o intervalo estudado, sendo que sólidos com tamanho maior promove o alcance de V_{sm} a concentrações menores, como exemplo para tubo de 2 polegadas, para sólidos de 100 microns de granulometria, V_{sm} é atingido em 20% de concentração volumétrica, para 150 microns e 300 microns, o valor é atingido em concentrações próximas a 15% e 10 %, respectivamente.

As tabelas 14,15,16 e 17, onde estão apresentados todos os valores de velocidade crítica de deposição, pode-se constituir em um importante critério para projetos de transportes na indústria de mineração, desde que sejam consideradas as limitações, em termos das faixas de valores, das variáveis utilizadas no projeto.

5.4 Zona de depósito estacionário

As Figuras 33,34,35,36,37,38,39 e 40 apresentadas a seguir mostram a região de depósito, exibindo o comportamento da velocidade crítica de deposição com a variação da concentração volumétrica. Como na análise anterior e considerando a vasta informação obtida, serão apresentados gráficos somente para algumas combinações de parâmetros, conforme representado pelas Figuras 33 a 40, as que foram construídas para as partículas de quartzo, minério de ferro, topázio e hematita, com granulometria d_{50} de 70 e 100 μm , e diâmetros na seção de testes de uma e duas polegadas respectivamente.

Pode-se observar que a velocidade crítica de deposição apresenta os menores valores para baixos valores de concentração volumétrica, esse valor de V_c aumenta, com o aumento de C_v até um valor máximo, denominado velocidade máxima de deposição (V_{sm}), em valores intermediários de concentração volumétrica e em seguida cai, para valores de concentração maiores.

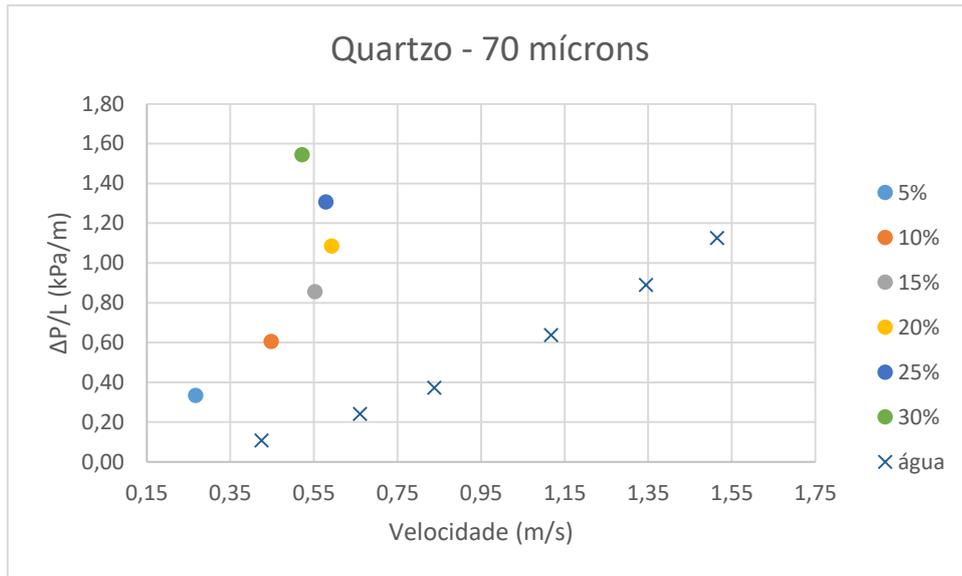


Figura 33 - Zona de depósito - Quartzo – 1 Polegada.

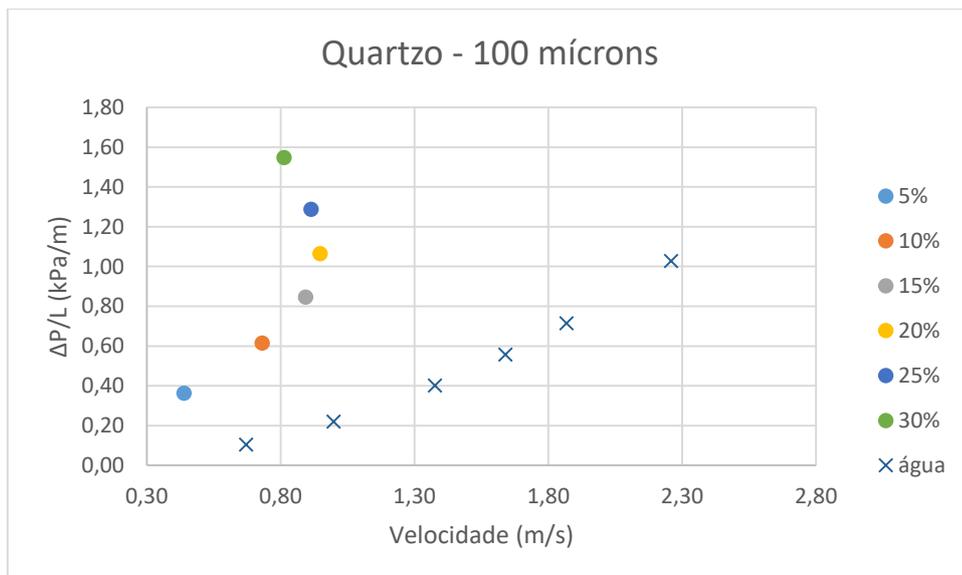


Figura 34 - Zona de depósito – Quartzo – 2 Polegadas.

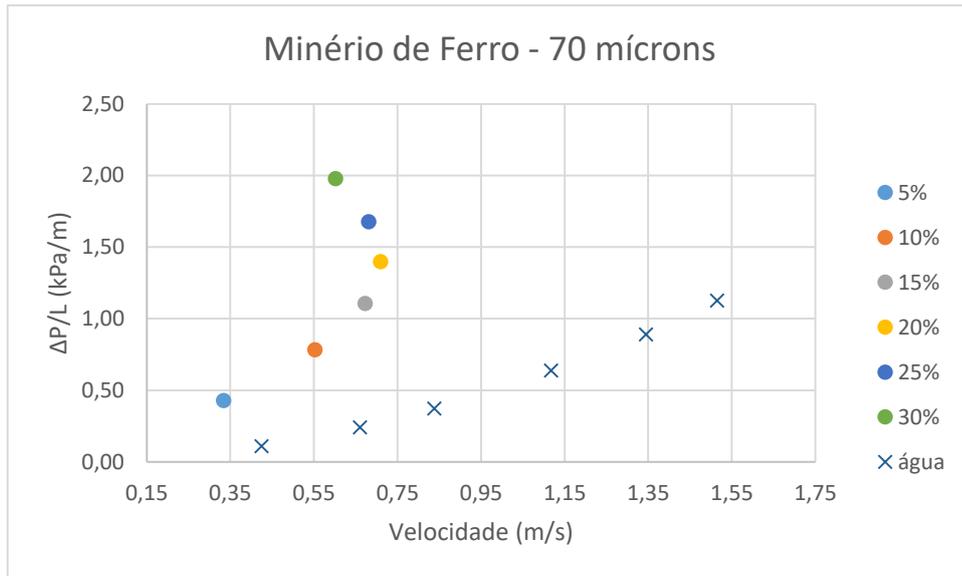


Figura 35 – Zona de depósito - Minério de Ferro – 1 Polegada.

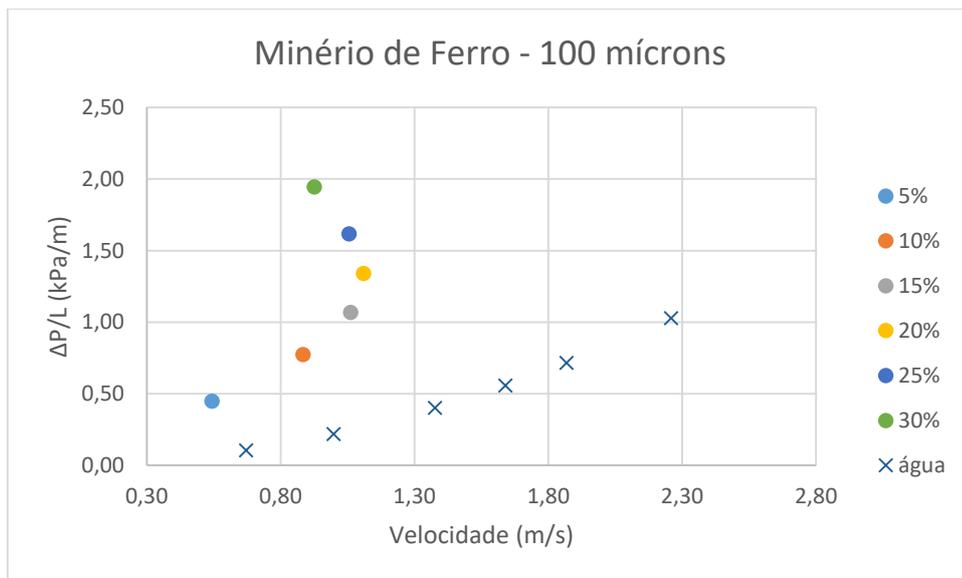


Figura 36 – Zona de depósito - Minério de Ferro – 2 Polegadas.

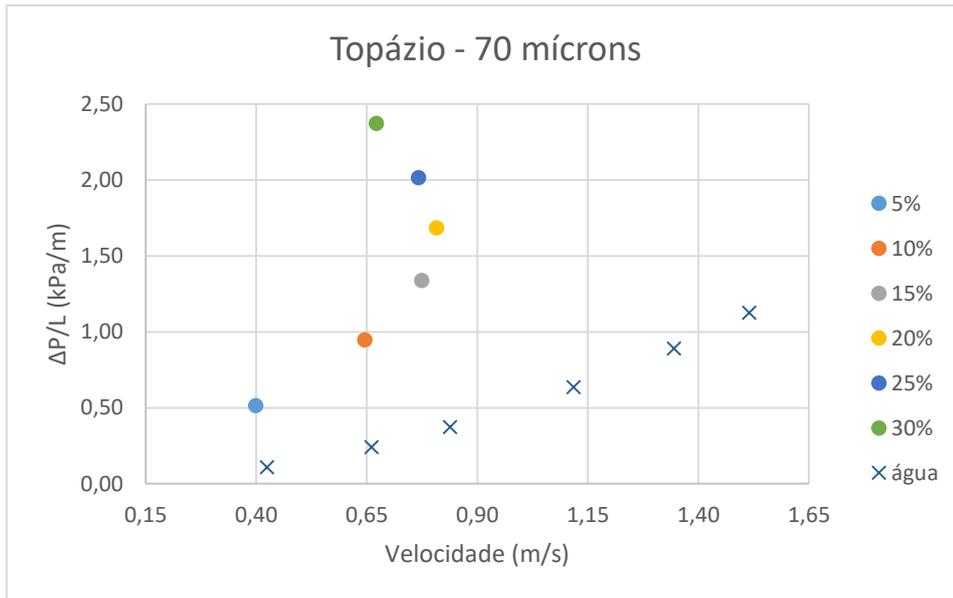


Figura 37 – Zona de depósito – Topázio – 1 Polegada.

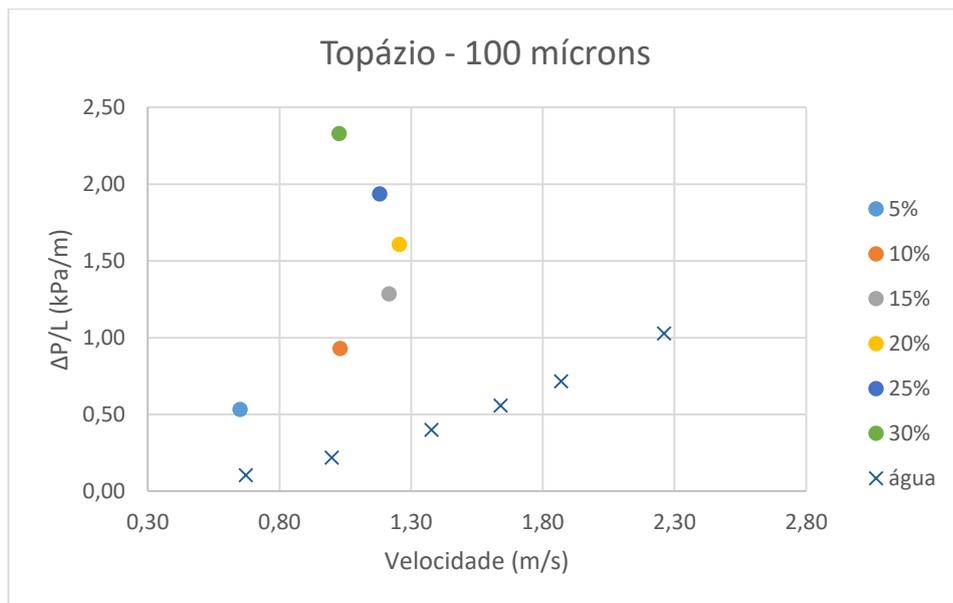


Figura 38 – Zona de depósito – Topázio – 2 Polegadas.

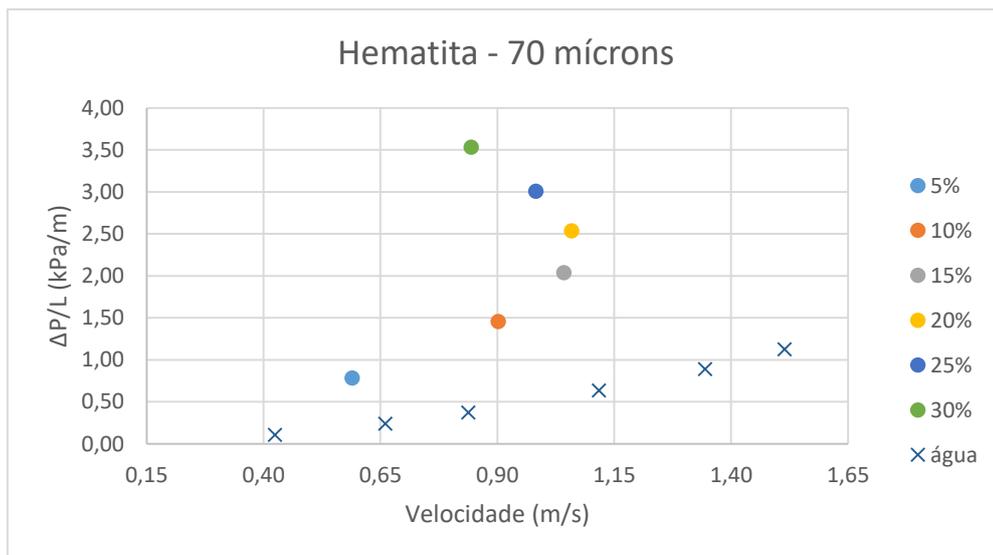


Figura 39 – Zona de depósito - Hematita – 1 Polegada.

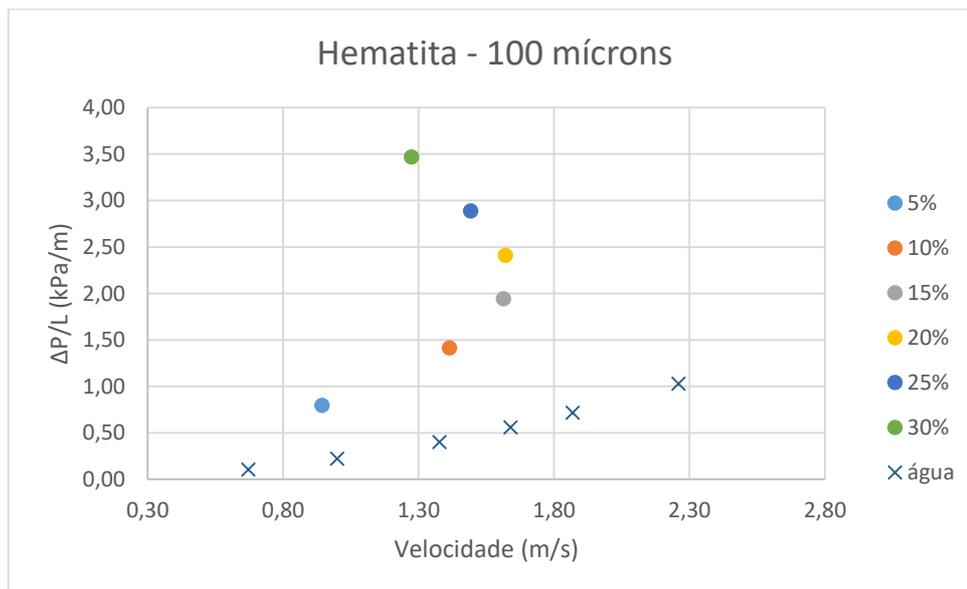


Figura 40 – Zona de depósito, Hematita – 2 Polegadas.

Observa-se que todos os casos apresentados acima, que o valor de V_{sm} , é atingido em torno 20% de concentração volumétrica, confirmando os resultados encontrados por diversos autores como Wasp et al (1977), Turian et al (1987), Gillies et al (1993), Shook et al (2002) que relataram que o número de Froude, base para os cálculos de V_c , era máximo próximos a concentrações de 20%, promovendo uma máxima velocidade de deposição.

Muitos projetistas conservadores se contentam em saber o valor da máxima velocidade de deposição, porém é possível operar o bombeamento de polpa com velocidade menor que V_{sm} , porém um pouco acima da velocidade crítica de deposição, se controlando bem as variáveis de influência, reduzindo o consumo de energia e garantindo que não haja depósito no fundo do tubo, assim como discutido por Wilson (2006).

Pode ser observado pelas figuras 33 a 40 acima, que o aumento do diâmetro da seção de teste promove aumento de V_{sm} . Por exemplo, para o quartzo, com 100 microns, a mudança de 1 para 2 polegadas, faz com que o valor de V_{sm} seja atingido em 15% e 20% de concentração volumétrica respectivamente, com valores iguais a 0,7485 m/s e 0,9483 m/s, um aumento de 26,69%. Para o minério de ferro, o aumento verificado é de 25,57%, referente a mudança de 0,8847 m/s a 1,111 m/s, já para o topázio, o incremento corresponde a 25,77%, que representa o aumento de 0,9973 m/s a 1,255 m/s, e por fim, a mudança de 1,286 m/s a 1,62 m/s, promove o incremento de 25,97% para hematita.

Mesmo com metodologia diferentes, os resultados obtidos nesta pesquisa e por Souza Pinto (2012) são semelhantes. Se comparar entre as duas propostas, no caso, o valor de V_{sm} obtido aqui de 1,267 m/s para o quartzo de duas polegadas, com granulometria 150 microns e 15% de concentração e Souza Pinto obteve o valor de 1,3 m/s para valores semelhantes de variáveis, mostrando que a proposta desenvolvida é válida e corresponde ao comportamento encontrado na literatura para a faixa de valores estudadas.

5.5 Região de decantação

Com o conhecimento sobre a importância de poder prever o comportamento dos sistemas de bombeamento de polpa, assim como apresentou Warman (2015), o presente trabalho buscou analisar faixa de operação das variáveis onde a polpa possui comportamento não decantável, e decantável. À semelhança da proposta de Warman (2015), com os resultados dessas análises foi possível, então, construir um gráfico da região de decantação, como está apresentado pela Figura 41, para diferentes materiais, granulometrias e diâmetro de tubulação na seção de teste. A diferença entre o gráfico tradicional e o aqui apresentado consiste em que neste estudo, foi acrescentado como variável o diâmetro de tubulação na seção de teste que no gráfico proposto por Warman (2015) não estava em análise.

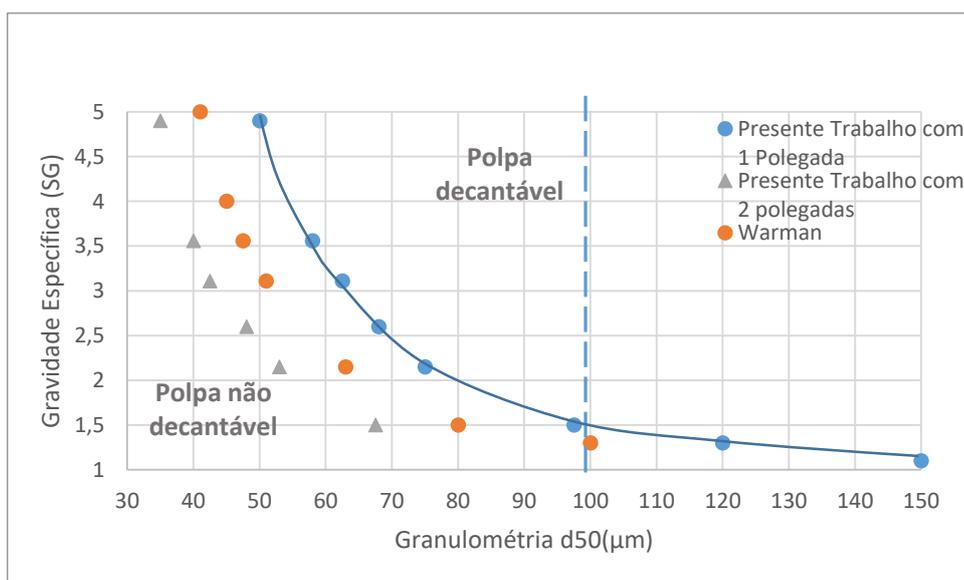


Figura 41 - Região de Decantação

Os resultados mostram que para os diferentes diâmetros de tubulação, a “curva” de separação entre as regiões de decantação e não decantação sofre alterações. Com o aumento do diâmetro de 1 e 2 polegadas, a curva se desloca para a direita, em direção a maiores granulometrias, com uma tendência “quase” idêntica à mostrada na Figura 24. Na

figura 41, a linha tracejada vertical representa o limite da faixa de granulometria na proposta de Warman (2015) que foi extrapolado neste trabalho.

Com a construção do gráfico da figura 41 foi possível dividir a análise em duas partes, sendo a primeira sobre os limites de aplicabilidade. O trabalho aqui apresentado se adequa ao comportamento já discutido na literatura, sendo o ponto de menor gradiente de pressão coincidente ao ponto de velocidade crítica de deposição para todas as concentrações volumétricas estudadas. Nota-se que para cada diâmetro de tubulação, existe uma faixa específica de granulometria onde a polpa tem o comportamento acima descrito, que no caso de 1 (uma) polegada de diâmetro na seção de teste é em torno de 60 a 80 microns de granulometria e para 2 (duas) polegadas de 90 a 110 microns.

A segunda parte, refere-se ao comportamento da polpa fora desses limites. Por exemplo, para 1 e 2 polegadas de diâmetro de tubo, com granulometrias menores que 60 e 90 microns, respectivamente, o ponto de menor gradiente de pressão se encontra a velocidade de escoamento superior à velocidade crítica de deposição, em todas as concentrações. Já para granulometrias maiores que 80 e 110 microns, ainda para 1 e 2 polegadas de diâmetro de seção de teste, o ponto de menor gradiente de pressão se encontra com velocidades de escoamento inferior a velocidade crítica de deposição até um valor intermediário de concentração volumétrica, onde esses valores coincidem e, a partir desse valor, o ponto de menor gradiente se desloca para velocidade de escoamento maiores que a velocidade crítica de deposição.

Por se tratar de um grande número de resultados, a apresentação se restringirá apenas ao estudo de um material, no caso à hematita (S.G 4,9), com dois pontos de granulometria, um antes e um depois fora dos limites da faixa de granulometria onde o trabalho se comporta segundo a literatura para cada diâmetro de tubulação, sendo que para uma polegada de diâmetro, as granulometrias de 40 e 150 microns, e para o diâmetro de tubulação de duas polegadas, granulometrias de 70 e 150 microns. As figuras 42, 43, 44 e 45 apresentam os resultados, onde os pontos que tocam a linha em destaque representam os

valores de velocidade crítica correspondentes e os pontos vermelhos em destaque representam os pontos de menor gradiente de pressão.

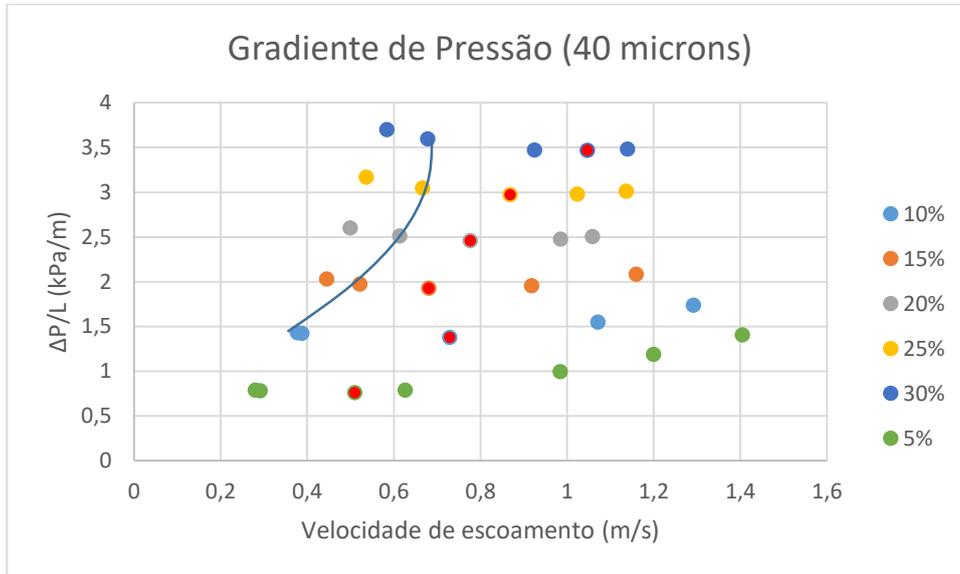


Figura 42 – Gradiente de pressão hematita, 40 microns, 1 polegada de diâmetro.

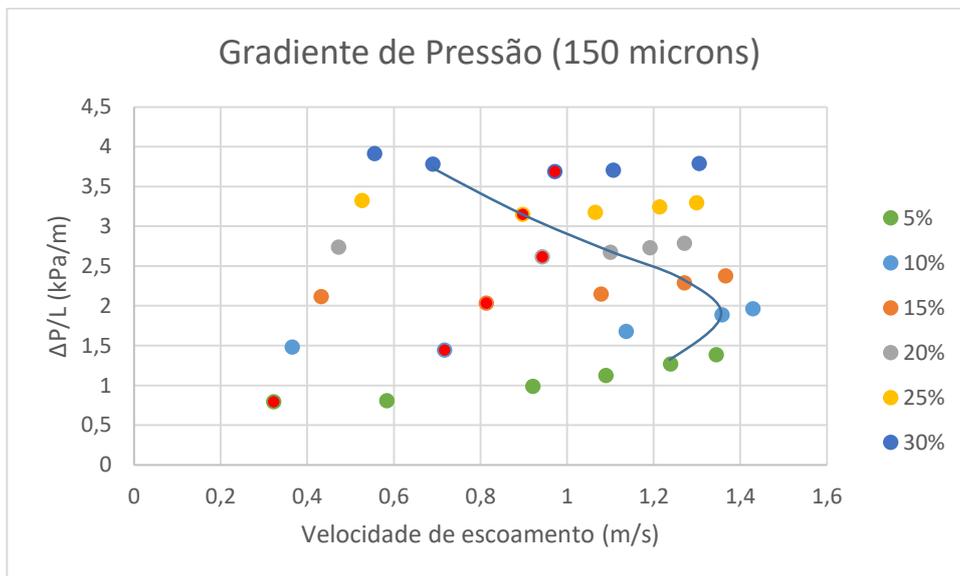


Figura 43 - Gradiente de pressão hematita, 150 microns, 1 polegada de diâmetro

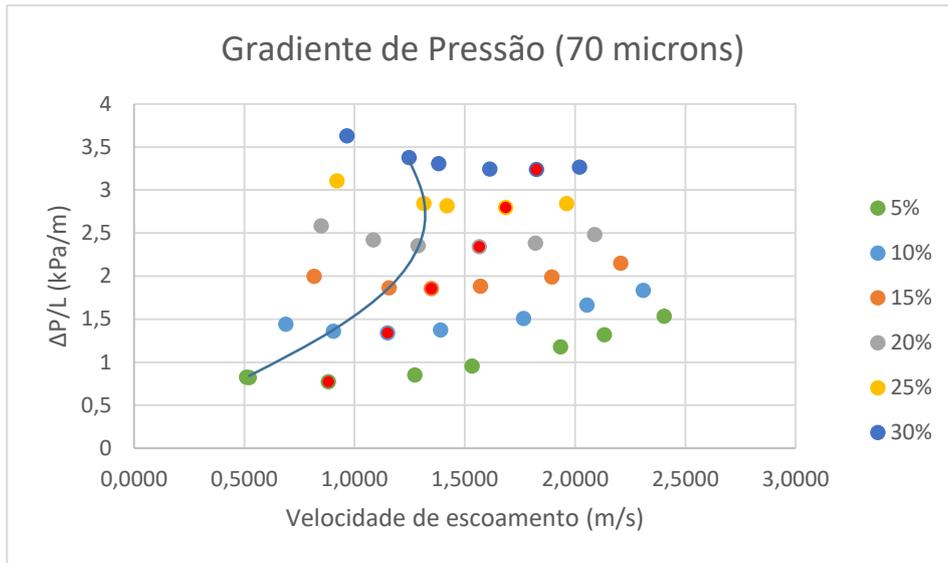


Figura 44 - Gradiente de pressão hematita, 70 microns, 2 polegadas de diâmetro.

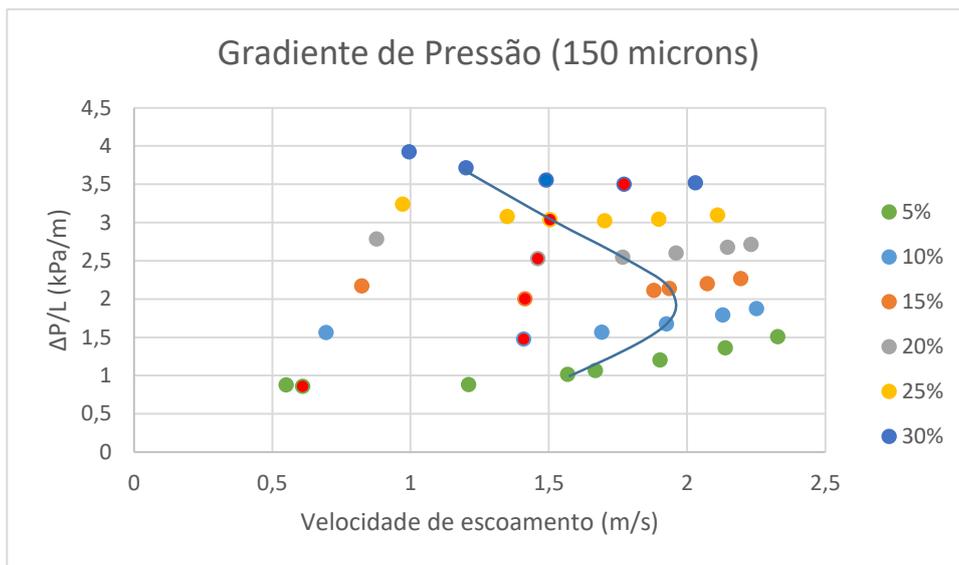


Figura 45 - Gradiente de pressão hematita, 150 microns, 2 polegadas de diâmetro.

Pode-se observar que para os pontos inferiores ao limite mínimo da faixa de granulometrias, sendo eles 40 e 70 microns, para 1 e 2 polegadas de diâmetro da seção de teste, respectivamente, o ponto de menor gradiente, destacado pelos pontos vermelhos nas figuras, encontra-se a velocidades de escoamento superiores a velocidade crítica de deposição, como apresentado pelas figuras 42 e 44. Já para as granulometrias superiores ao

limite máximo da faixa de granulometria, no caso 70 e 150 microns, para uma e duas polegadas, respectivamente, temos o menor gradiente de pressão à velocidades de transporte menores que V_c até 20% de concentração volumétrica, com 25% de C_v , o ponto do menor gradiente coincide com o ponto de velocidade crítica de deposição, a partir 30%, o ponto de menor gradiente se desloca para velocidades de escoamento maiores que V_c , como apresentado pelas figuras 43 e 45 acima, esse comportamento é tendência em todos os minerais estudados.

No estudo, diâmetros iguais a 1 e 2 polegadas e, as granulometrias de 70 e 100 microns, respectivamente, atendem a todos os minerais propostos se comportando da forma esperada, como será apresentado a seguir.

5.6 Gradiente de Pressão versus Velocidade de Escoamento

A partir dos resultados obtidos, foram construídos gráficos de gradiente de pressão por metro de tubulação versus velocidade de escoamento, como apresentados pelas Figuras 46 a 53. Como anteriormente já mencionado, serão apresentados gráficos apenas para algumas combinações de parâmetros, no caso, para os dois valores de granulometria (70 e 100 microns) e três valores de concentração volumétrica (5, 10 e 20%).

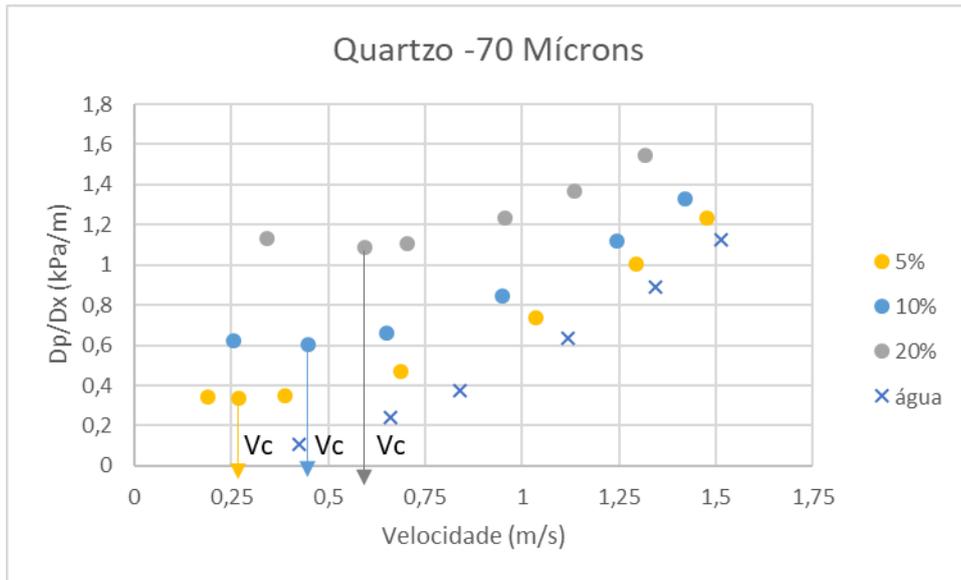


Figura 46 – Quartzo - 70 microns – 1 Polegada.

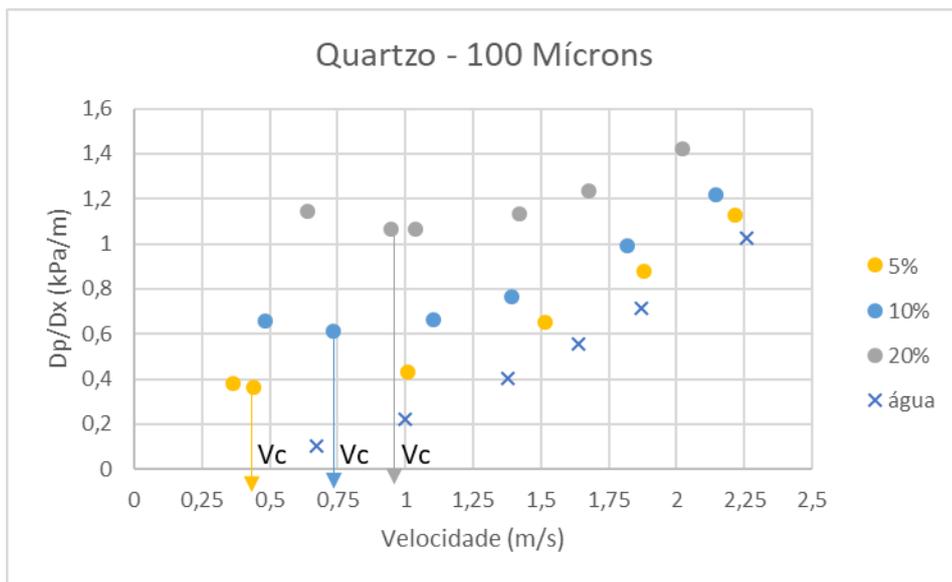


Figura 47 - Quartzo - 100 microns – 2 Polegadas.

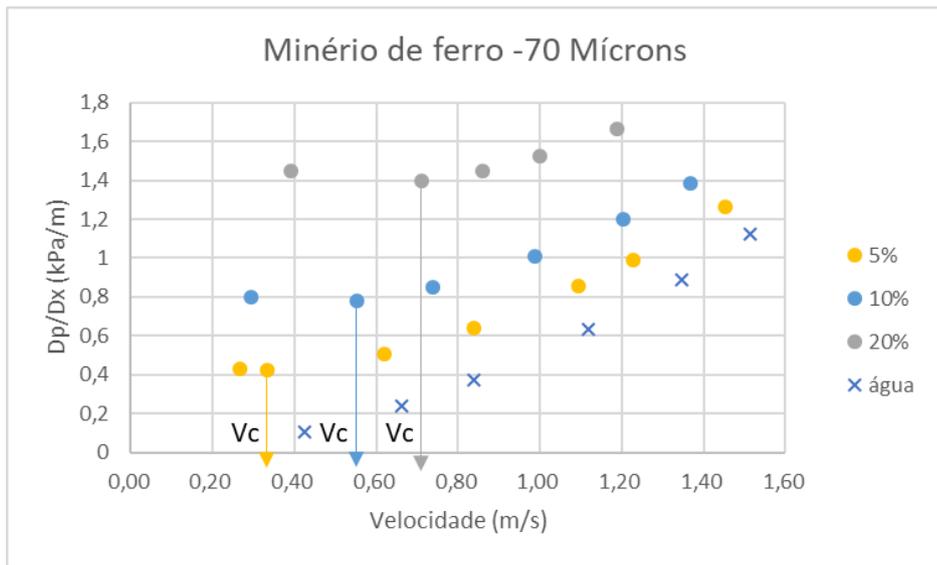


Figura 48 – Minério de Ferro – 70 microns – 1 Polegada.

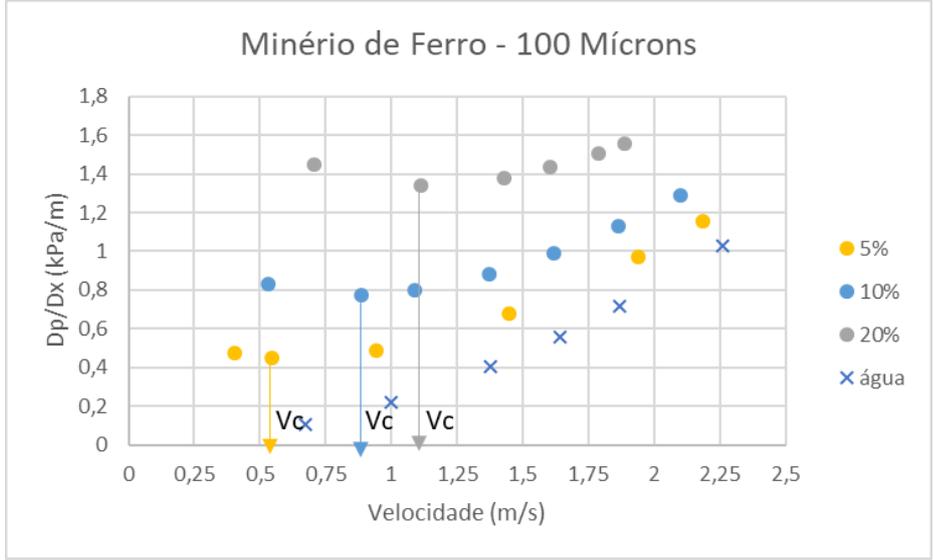


Figura 49 – Minério de Ferro – 100 microns – 2 Polegadas.

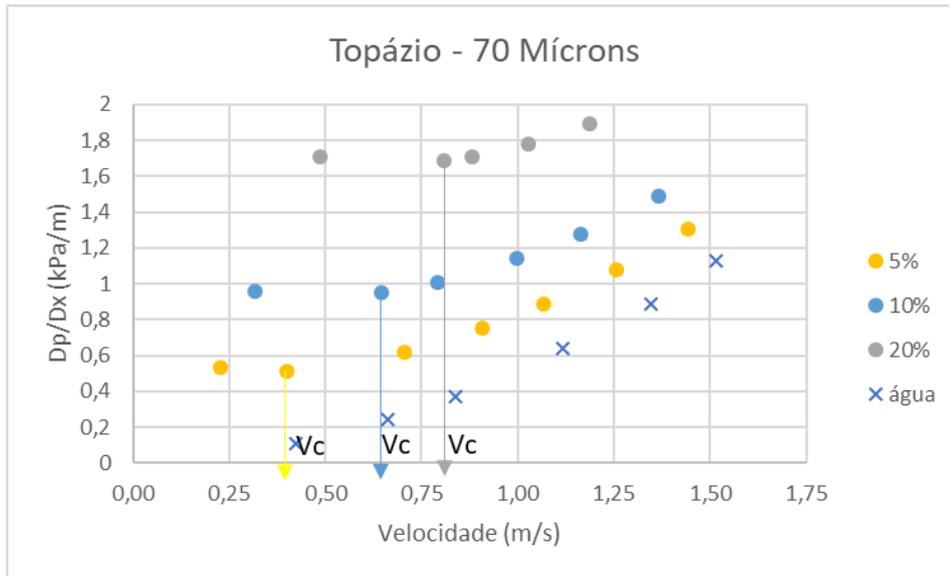


Figura 50 – Topázio – 70 microns – 1 Polegada.

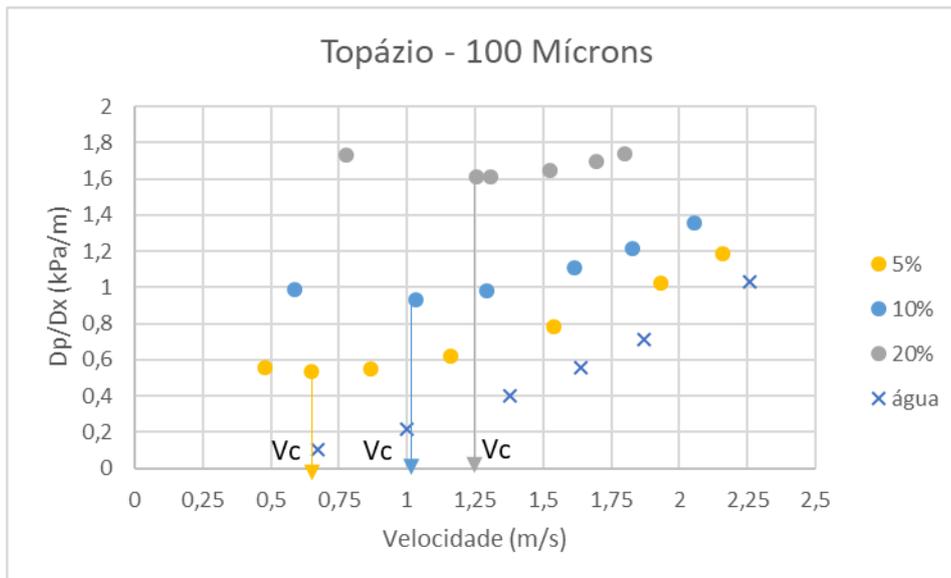


Figura 51 – Topázio – 100 microns – 2 Polegadas.

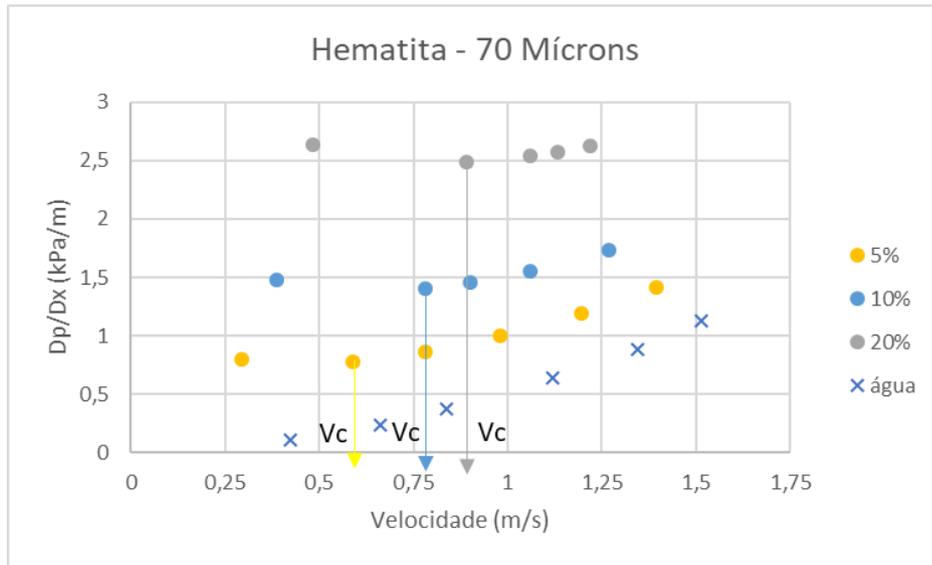


Figura 52 – Hematita – 70 microns – 1 Polegada.

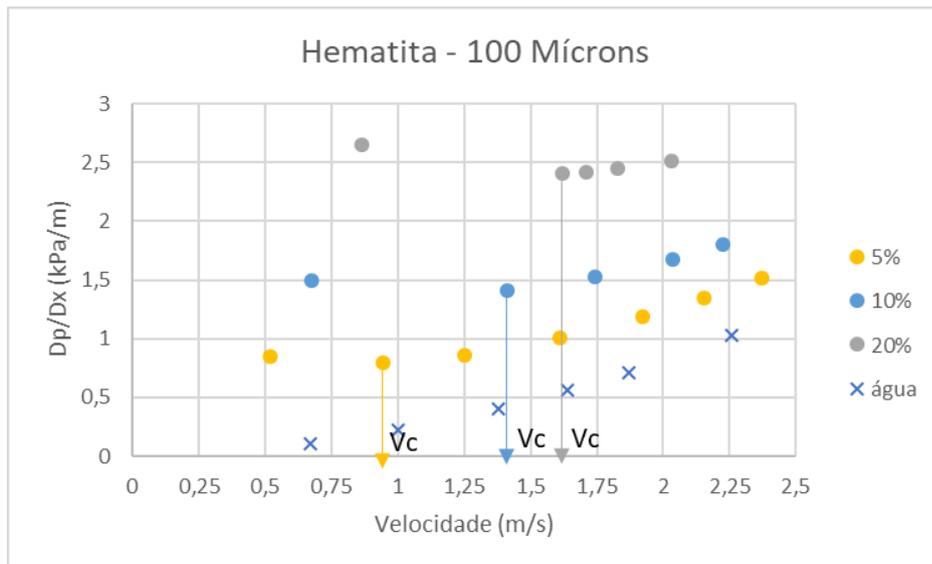


Figura 53 – Hematita – 70 microns – 2 Polegadas.

Pode-se observar pelas Figuras 46 a 53 que os resultados obtidos correspondem a tendência esperada para polpas heterogêneas, onde o ponto de menor gradiente de pressão corresponde ao ponto da velocidade crítica de deposição, conforme já obtido por Wasp et al., 1977; Jacobs, 1991; Wilson et al., 2006; Souza Pinto et al., 2014.

O aumento da concentração volumétrica promove aumento da velocidade crítica de deposição em todos os casos, justificado pelo maior volume de sólidos presentes na polpa que ocasiona maior perda de pressão devido ao atrito e necessidade de velocidade maior para evitar o depósito dos sólidos.

O incremento da gravidade específica promove, também, aumento da velocidade crítica de deposição, como observado, por exemplo, nas figuras 46,48, 49 e 50, uma vez que partículas de minerais mais densos, demandam maior energia para ficarem suspensas durante o transporte. Como exemplo, para 1 polegada de diâmetro de tubulação na seção de teste, 20% de concentração volumétrica, a alteração do material de menor gravidade específica para uma maior, ou seja, do quartzo (SG 2,62) para o minério de ferro (SG 3,11) e depois o topázio (SG 3,56) para a hematita (SG 4,9) indica valores de velocidade crítica de deposição iguais a 0,5530, 0,6729, 0,7745 e 1,043 m/s respectivamente, um aumento de 17,81% na comparação entre quartzo e minério de ferro, 13,12% quando se compara o minério de ferro e topázio e, por fim, 25,74% na alteração do topázio para a hematita. Comportamentos semelhantes foram observados para outras combinações de granulometria e diâmetro da tubulação da seção de testes.

5.7 Comparação dos Modelos Preditivos

Na tentativa de estabelecer devida comparação entre os resultados obtidos no presente trabalho e a correlações disponíveis na literatura para a determinação da velocidade crítica de deposição (analisadas no capítulo 3. Velocidade crítica de deposição), faz-se necessária a extrapolação dos resultados para diâmetro de 1 (26,64mm) e 2 (52,5mm) polegadas até diâmetro de 0,35 m. Os resultados são mostrados na Figura 54. Nessa figura observa-se que os resultados simulados são aqueles correspondentes a $d < 0,05\text{m}$ (linha vertical tracejada) e os extrapolados, correspondem à faixa de $0,05 < d < 0,35\text{m}$. A extrapolação

do diâmetro foi realizada apenas para granulometria de 100 microns e concentração volumétrica de 15%, considerando o grande número de resultados obtidos.

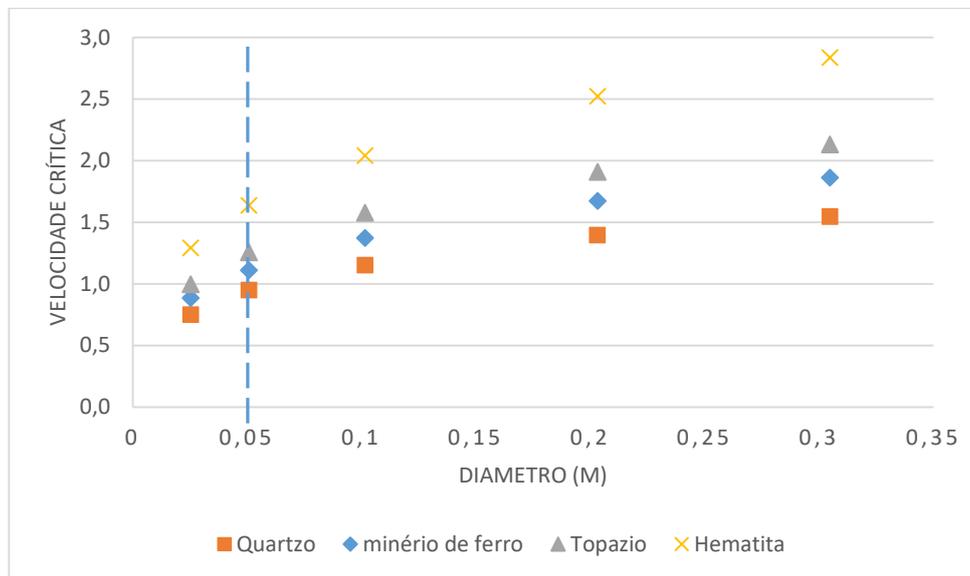


Figura 54 - Velocidade máxima de deposição x Diâmetro de tubulação.

A partir dos resultados aqui obtidos e de outros trabalhos da literatura foi possível construir um gráfico, como o mostrado pela Figura 55, onde é realizada a comparação de alguns modelos preditivos para a velocidade máxima de deposição com os resultados deste trabalho para o quartzo (S.G 2.62) com concentração volumétrica de 15% os que, conforme acima comentado, foram extrapolados para valores de diâmetro de até 0,35m. Os resultados da literatura utilizados para comparação são as correlações propostas por Durand (1953), Schiller e Herbich (1991), Wasp e Slatter (2004) e Souza Pinto (2012) para o estudo com o quartzo (S.G 2,62) e concentração volumétrica de 15%.

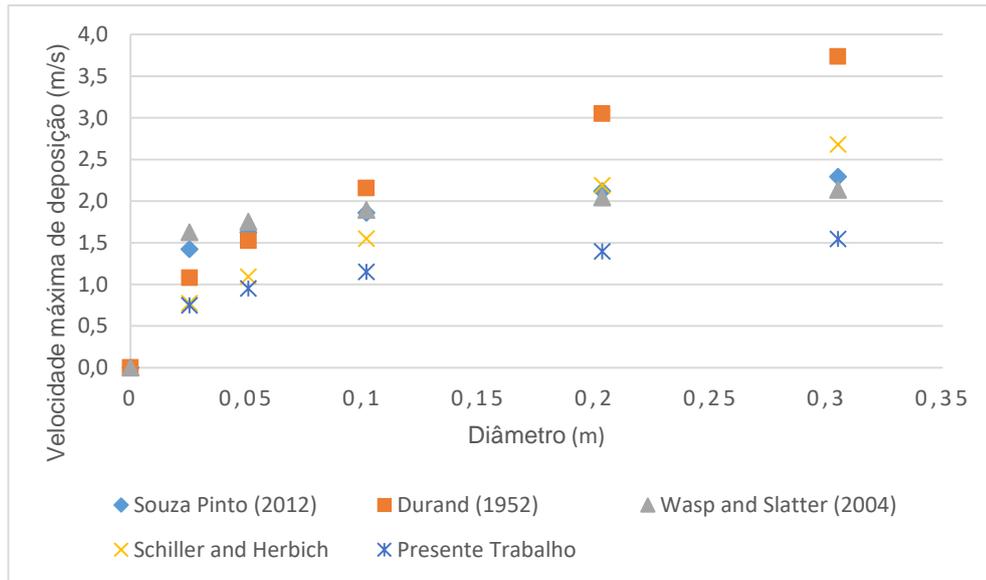


Figura 55 - Comparação de modelos preditivos de velocidade crítica para polpa de quartzo com Cv de 15%.

Pode-se observar pela Figura 55 acima que todos as propostas seguem a mesma tendência, tendo um incremento no valor de velocidade máxima de deposição, com o aumento do diâmetro da tubulação. E confirma-se, como já mostrado pelas figuras 16 e 17 que cada método/correlação difere do outro devido aos limites de aplicabilidade de cada um.

5.8 Melhores condições de escoamento

Para encontrar as melhores condições de escoamento dentre as simulações analisadas para cada material, do ponto de vista econômico, foi realizado um estudo através de um indicador energético I, que mede o consumo de energia em quilowatts-hora para bombear um metro cúbico de polpa mineral. O indicador energético é expresso, conforme a equação (35):

$$\text{Indicador Energético I} = \frac{\text{Potência (kW)}}{\text{vazão } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)} \quad (35)$$

Esse indicador já foi utilizado, com sucesso, para caracterizar energeticamente, sistemas de bombeamento de polpas de minério de ferro (Ferreira, 2016). Devido ao grande conjunto de resultados, está apresentado somente os resultados referentes a granulometria de 100 microns, 20 % de concentração volumétrica e diâmetro de tudo de duas polegadas. Como está apresentado pela Figura 56, foi construído um gráfico para relacionar a velocidade de escoamento com o indicador energético I.

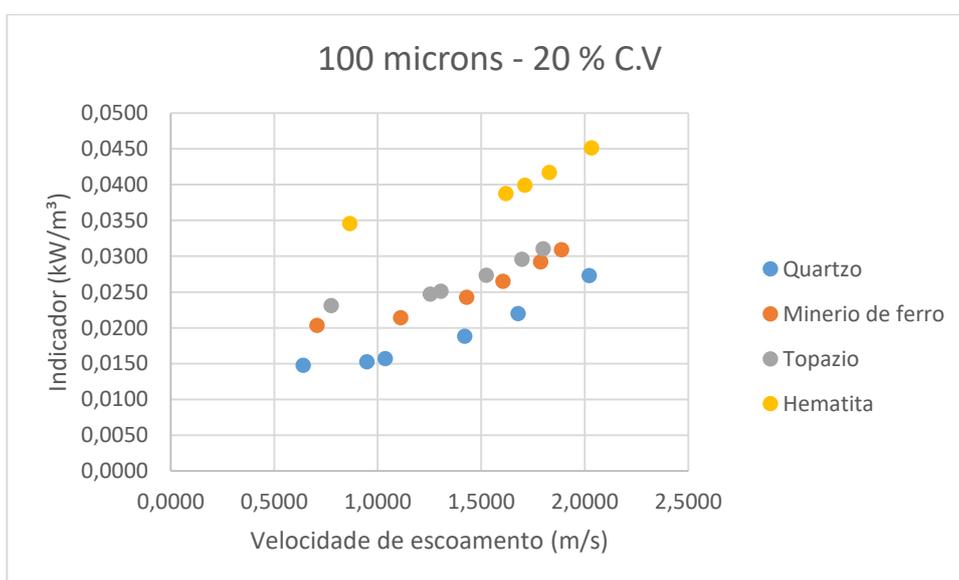


Figura 56 – Relação do indicador energético I e velocidade de escoamento.

Os resultados mostram que, para qualquer mineral, a redução da velocidade de escoamento promove, redução do indicador de consumo de energia, esse comportamento é tendência em todas as combinações de variáveis estudadas. Assim realizar o transporte com velocidades menores, mas sem risco de deposição, é muito interessante, já que consome menor energia e promove menor desgaste do material.

O transporte, do sólido em forma de polpa, através de tubulação requer menos energia quando é realizado próximo, um pouco acima, da velocidade crítica de deposição, região que tem o menor ponto de perda de pressão, assim como já discutido por Chaves (2002).

Os resultados apresentados no presente trabalho têm por objetivo mostrar que a metodologia proposta é adequada, fornecendo resultados esperados, condizentes com a teoria, na faixa de limitações dos experimentos simulados estudados. Podendo servir de base para a indústria da mineração, para que o transporte de minerais em tubulação possa ser feito de uma maneira mais fácil, rápida e eficiente. Uma vez que foram utilizados minerais comumente utilizados na matriz brasileira.

6. Conclusões

Do estudo realizado, é possível ressaltar a importância da velocidade crítica de deposição nos sistemas de bombeamento de polpa, uma vez que o transporte abaixo dessa velocidade ocasiona decantação no tubo e obstrução do caminho. A combinação de menor gasto de energia sem deposição, é aquela em que a velocidade de escoamento é ligeiramente superior à velocidade crítica e com a correta seleção e controle de todos os parâmetros envolvidos no bombeamento de polpa pode-se realizar um transporte eficiente com o menor consumo de energia.

O estudo comprovou a considerável discordância e limitações dos diferentes modelos propostos para prever a velocidade crítica de deposição, ou em muitos casos, prever somente a velocidade máxima de deposição, uma vez que cada correlação tem sua aplicabilidade limitada às condições específicas de cada proposta.

Os resultados mostram que a metodologia proposta é adequada, apresentando comportamento da velocidade crítica de deposição condizente com a literatura, ou seja, o aumento da granulometria, concentração volumétrica e gravidade específica promovem aumento da velocidade crítica de deposição. A granulometria possui a maior influência, dentre as variáveis em análise, sobre a resposta da velocidade crítica de deposição. A correta caracterização reológica da polpa é de suma importância para prever o comportamento do escoamento, podendo ser tratado como decantável ou não decantável.

Com a determinação dos índices de carga (HR) e eficiência (ER) foi possível prever as condições que a bomba centrífuga irá operar com o transporte de polpa para as diferentes combinações de parâmetros estudados. Tendo uma redução dos valores de ER e HR com o aumento de granulometria das partículas, com aumento da concentração volumétrica e aumento da gravidade específica. Já com relação ao diâmetro de tubulação o comportamento se inverte, com o aumento de diâmetro do tubo, ocorre aumento dos índices.

Através dos resultados pode-se concluir sobre a importância do estudo e determinação correta da velocidade crítica de deposição uma vez que o escoamento abaixo desse valor representa risco e podem comprometer o transporte. Pode observar, conforme discutido por vários autores que é possível o escoamento abaixo do valor de V_{sm} , sem possibilidade de sedimentação, uma vez conhecidos e controlados muito bem os parâmetros, o que promove uma redução da potência consumida e aumento de eficiência energética dos sistemas.

Por meio da metodologia e resultados apresentados, este trabalho, mostra a importância do estudo de velocidade crítica de deposição no transporte de polpas minerais, constituindo-se em um campo ainda em expansão.

7. Trabalho Futuro

Como proposta para trabalho futuro seria interessante o estudo de concentrações mais elevadas, visto que na maioria dos trabalhos realizados na literatura é utilizado índices de concentrações até na ordem de 30%, seja do ponto de vista ambiental e econômico pelo uso da água, ou também como pelos resultados iniciais obtidos que mostram que o uso de concentrações maiores pode diminuir o valor de V_c , possibilitando o escoamento a velocidades menores, sem risco de sedimentação do fundo do tubo, reduzindo o gasto de energia e tornando o processo mais eficiente energeticamente.

Seria muito interessante também ampliar o gráfico da figura 33 da região de decantação para maiores diâmetros de tubulação, de forma a abranger uma faixa grande que atenda a maior parte dos diâmetros normalmente utilizados em todos os transportes realizados pela mineradora assim fornecer de forma rápida e fácil, subsídios para o setor da mineração, e assim projetar de forma eficiente os transportes dos minerais.

A ampliação dos trabalhos a outras faixas de granulometria, concentração volumétrica e diâmetro de tubulação, poderia utilizar técnicas estatísticas, para tentar obter um modelo mais geral que permitisse caracterizar a velocidade crítica.

O aumento do diâmetro da tubulação de 2 para 4 para 8 para 12 polegadas, a velocidade crítica de deposição passa de 1,613 para 1,823 para 1,87 e finalmente 1,795 m/s para o caso de 12 polegadas. Mais um campo a ser estudado, onde a velocidade crítica aumenta até certo valor de diâmetro e depois começa a cair com o continuo aumento do diâmetro.

8. Referências

ABULNAGA, B. E. Slurry Systems Handbook. 2002. USA: McGraw Hill.

AWUAH-OFFEI, K. Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations. Journal of Cleaner Production. 2016, 117:89-97. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.035>.

CHAVES, Arthur P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 2ª edição, editora Signus. 2002.

CHAVES, A.P. Teoria e Prática do tratamento de minérios. Rio de Janeiro, v.1, 2009.

CROWE, Clayton T. Multiphase flow handbook. Taylor & Francis Group: New York, 2006.

DORON, P., GRANICA, D., & BARNEA, D. Slurry flow in horizontal pipes, experimental and modeling. 1987. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 13, No. 4., 535-547.

DORON, P., & BARNEA, D. A three-layer model for solid liquid flow in horizontal pipes. 1993. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 19, No.6., 1029-1043.

DURAND, R. Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes - Experimental Research. Proceedings of the International Association of Hydraulic Research. Minneapolis. 1953.

FERREIRA, M.T. Indicador energético para análise de sistemas de bombeamento de polpa mineral via simulação computacional e planejamento de experimentos. 2016, 104 p. Monografia, (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade federal de São João del-Rei.

FERREIRA, M.T. Comparative study of the power consumption in two different configurations of medium-length slurry pumping systems. Ingeniería Mecánica. Vol. 20. No. 2, mayo-agosto, 2017, p. 91-98. 2017.

FERREIRA, M.T Análise energética de sistemas de transporte de polpa mineral através de bomba centrífuga via simulação computacional. 2018, 54 p. Monografia, (Pós-Graduação Lato Sensu MBA em Energia) - Faculdade Unyleya - Brasília.

GILLIES, R.G. Pipeline Flow of Coarse Particles Slurries. 201p Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Saskatchewan, 1993.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Economia Mineral Brasileira 2015. Disponível em:<<http://www.ibram.org.br/>>. Acesso em: 12 janeiro. 2017.

JACOBS, B.E.A. Design of slurry transport systems. Elsevier Science Publishers, BHR Group, 1991, 312p.

JIE WU, Lachlan Graham, Steven Wang, Rajarathinam Parthasarathy. Energy efficient slurry holding and transport. 2010.

KAUSHAL, D. R.; TOMITA, Y.; DIGHADE, R. R. Concentration at the pipe bottom at deposition velocity for transportation of commercial slurries through pipeline. Powder Technology, V. 125, p. 89-101, 2002.

Kaushal, D. R., & Tomita, Y. Solids concentration profiles and pressure drop in pipeline flow of multisized particulate slurries. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 28., 1697-1717. 2002b

KAUSHAL D.R.; TOMITA, Y.; KUCHII, S. CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration. International Journal of Multiphase Flow. 2012.

LAHIRI, S. K. Study on slurry flow modelling in pipeline. Durgapur, India: National Institute of Technology, Durgapur, India. (2009).

LEVESQUE M, Millar D, Paraszczak J. Energy and mining – the home truths. Journal of Cleaner Production. 2014, 84:233-255. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.088>.

MATOUSEK, V. Predictive model for frictional pressure drop in settling-slurry pipe with stationary deposit. Powder Technology, 367-374. 2009.

MIEDEMA, Sape A. Slurry Transport Fundamentals, A Historical Overview & The Delft Head Loss & Limit Deposit Velocity Framework. 2016

POLOSKI, A.P. A Pipeline Transport Correlation for Slurries with Small But Dense Particles. 2010, Canadian Society for Chemical Engineering DOI 10.1002/cjce.20260.

SCHILLER, R.E., HERBICH, P.E., 1991. Sediment transport in pipes. In: Herbich, P.E. (Ed.), Handbook of Dredging. McGraw-Hill, New York.

SINGH, J. P., KUMAR, S., MOHAPATRA, S, K., Modelling of two phase solid-liquid flow in horizontal pipe using computational fluid dynamics technique.2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.060>.

SOUZA PINTO, T.C Modelagem da velocidade crítica de transporte de polpas minerais contendo partículas grossas. Tese de PhD. Universidade de São Paulo, São Paulo. 180p. 2012.

SOUZA PINTO, T.C Modelling the critical velocity for heterogeneous flow of mineral slurries. International Journal of Multiphase Flow. 311- 37 p. 2014.

SHOOK, C.A., DANIEL, S.M., 1965. Flow of suspensions of solids in pipeline. Can. J. Chem. Eng. 43, 56–61.

TARODIYA R, Gandhi B.K. Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal slurry pumps - A review. Powder Technology. Vol.305, 27-38, 2017.

TURIAN, R.M., Hsu, F.L., Ma, W., 1987. Estimation of the critical velocity in pipeline flow of slurries. Powder Technol. 51, 35–47.

VAEZI, M., VERMA, S., KUMAR, A., Application of High-Frequency Impedance Approach in Measuring the Deposition Velocities of Biomass and Sand Slurry Flows in Pipelines.2018. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.10.013>.

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. Introdução ao tratamento de minérios, Ed. UFMG, 2007, 234p.

WASP, E. J., KENNY, J. P., & GANDHI, R. L. Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation. São Francisco: Trans Tech Publications. 1977.

WASP, E. J., & SLATTER, P. T. Deposition velocities for small particles in large pipes. 12th International Conference on Transport & Sedimentation of Solid Particles, (pp. 20-24). Prague, Czech Republic. 2004.

WEIR. Slurry pumping Handbook. A technical application guide for users of Centrifugal slurry pumps and slurry pumping systems Primeira edição. Janeiro de 2002.

WILSON, K.C. A Unified Physically Based Analysis of Solid-Liquid Pipeline Flow, in "Proc. 4th Int. Conf. On Hydraulic Transport of Solids", BHRA Fluid Engineering, Cranfield, UK, Paper A1, pp. 1–16, 1976.

WILSON, K.C., JUDGE, D.G., 1976. New techniques for the scale-up of pilot-plant results to coal slurry pipelines. In: Proc. Int. Symp. on Freight Pipelines, Univ. Pennsylvania, pp. 1–29.

WILSON, K.C. Deposition-limit nomograms for particles of various densities in pipeline flow, Proc. Hydrotransport 6, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, UK, pp 1-12. 1979.

WILSON, K. C. Deposition limit nomograms for particles of various densities in pipeline flow. Hydrotransport 6 (p. 12). Canterbury, UK: BHRA Fluid Engineering. 1979.

WILSON, K.C. Effect of solids concentration on deposit velocity. Jour. Pipelines Elsevier, Vol 5, pp. 251-257. 1986.

WILSON, K.C., ADDIE, G.R., SELLGREN, A., CLIFT, R. Slurry Transport Using Centrifugal Pumps. 2006. Springer Science+Business Media Inc.

ZANDI, I., GOVATOS, G. Heterogeneous flow of solids in pipelines. 1967. Proc. ASCE, J. Hydraul. Div. 91, 145–159.

XIAOMENG, L. XIANGRUI, M. Evaluation and empirical research on the energy efficiency of 20 mining cities in Eastern and Central China.2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.01.002>.