

Cássio Veloso Noronha

**CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E ESTUDOS DE BOMBEAMENTO
PARA REJEITO DE MANGANÊS**

Parauapebas, Pará

2020

Cássio Veloso Noronha

**CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E ESTUDOS DE BOMBEAMENTO
PARA REJEITO DE MANGANÊS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em Beneficiamento Mineral.

Orientador: Dr. Thiago Souza, D.Sc.

Parauapebas, Pará

2020

Título: Caracterização reológica e estudos de bombeamento para rejeito de manganês
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N852c

Noronha, Cássio Veloso
Caracterização reológica e estudos de bombeamento para rejeito de manganês/ Cássio Veloso Noronha - Ouro Preto, 2020.

51 f.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2020.
Orientador (a): Thiago Souza

1. Bombeamento. 2. Manganês. 3. Rejeitoduto. 4. Reologia.
I. Souza, Thiago. II. Título.

CDD. 23. ed. 622.7

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves – CRB 2 – 525

Cássio Veloso Noronha

**CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E ESTUDOS DE BOMBEAMENTO PARA
REJEITO DE MANGANÊS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Beneficiamento Mineral].

Orientador: Prof. Thiago Cesar Souza Pinto

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 22 de outubro de 2020 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Thiago Cesar Souza Pinto
Orientador – VALE

Jean Carlo Grijó Louzada
Membro externo – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA)

Alfredo Moises Sarkis
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/58FD-222A-83F3-6EA5> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/58FD-222A-83F3-6EA5> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 58FD-222A-83F3-6EA5



Hash do Documento

9A0891E7C81FBCE78C5A764377548D4F29F5E32F8C8EADC40295E3A994219704

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 26/10/2020 é(são) :

- ☒ Alfredo Moises Sarkis (Signatário) - em 26/10/2020 09:41 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: alfredo.sarkis@itv.org

Evidências

Client Timestamp Mon Oct 26 2020 09:40:45 GMT-0300 (Hora oficial do Brasil)

Geolocation Latitude: -2.4862993619680864 Longitude: -44.264634549414076 Accuracy: 121

IP 177.47.63.211

Hash Evidências:

46E2E2A3380349ED0F4E638B7A4AD8DA38E426C15A5BD075967F094C77F83A75

- ☒ Jean carlo grijó Louzada (Signatário) - em 24/10/2020 11:48 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: jeanlouzada@unifesspa.edu.br

Evidências

Client Timestamp Sat Oct 24 2020 11:48:41 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Location not shared by user.

IP 179.93.231.3

Hash Evidências:

00AED4C9FA6EF1C28B6B45AC04AFD8825FCE5ACF24E801B4309772527C66BFA5

- ☒ Thiago Cesar Souza Pinto (Signatário) - em 22/10/2020 16:33 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: thiago.souza@vale.com

Evidências

Client Timestamp Thu Oct 22 2020 16:34:06 GMT-0300 (Hora oficial do Brasil)

Geolocation Latitude: -19.97697 Longitude: -43.97599 Accuracy: 200

IP 177.25.213.17

Hash Evidências:

B324B019D1E034EA5CCFF8FDDF08AEB3E8964C4BB62262FBC9A88783C8A3E8C1



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda a grandiosidade da vida.

À minha família, por sempre estar suportando em todos os momentos difíceis, onde por muitas vezes tivemos de abrir mão do tempo juntos.

À Vale pelo suporte e oportunidade de desenvolvimento.

Ao meu coordenador Dr Thiago Souza, que não mediu esforços neste trabalho e em seus ensinamentos.

RESUMO

A Mina do Azul produz concentrados de manganês em operações unitárias de britagem, classificação e peneiramento. O rejeito, *overflow* do classificador, é bombeado para a barragem de rejeitos, através de rejeitoduto. Com composição mineralógica complexa e material fino, com diâmetro médio de Sauter ($d_{3,2}$) de $4,0\mu\text{m}$. O rejeito apresenta efeitos significativos em sua reologia e tal fato tem grande influência nos parâmetros de bombeamento. O presente trabalho teve como objetivo realizar uma caracterização reológica do rejeito, em função da concentração de sólidos em massa. A composição química revelou a presença de argilominerais, majoritariamente caulinita, com teores de alumina e sílica de 21% e 37%, respectivamente. O percentual de sólidos se revelou como parâmetro de grande influência no comportamento reológico do rejeito de manganês, sendo que para percentual em massa de 10%, o material pode ser considerado como dilatante, tendo seu comportamento alterado para pseudoplástico com o aumento da concentração de sólidos para 25,5%. A viscosidade para a menor concentração é praticamente constante ao longo de toda faixa de taxa de cisalhamento, com magnitude na ordem de 5,0cp, enquanto que, para operar na maior concentração, são indicadas altas taxas de cisalhamento, em que a magnitude da viscosidade está na ordem de 13cp. A velocidade de transição viscosa foi identificada com magnitude de 1,3 m/s e 1,6 m/s para as concentrações de 10% e 25,5%, respectivamente. Devido ao material ser muito fino, e se apresentar comportamento pseudo homogêneo no interior dos dutos, não houve segregação de partículas na seção transversal suficiente que pudesse gerar alguma concentração do manganês na base do tubo, devido a sua maior massa específica em relação aos minerais de ganga.

Palavras-Chave: Bombeamento. Manganês. Rejeitoduto. Reologia.

ABSTRACT

Azul Mine produces manganese concentrates in unit operations such as crushing, grinding and screening operations. The tailings, overflow from the classifier, are pumped into the tailings dam. With a complex mineralogical composition and very fine particulate material, within Sauter mean diameter of $4\mu\text{m}$, presents complexity in its rheology and this fact has a great influence on the pumping parameters. The present work aimed to carry out a rheological characterization of the tailings, as function of the solids mass concentration (w/w). The chemical composition revealed the presence of clay minerals, mostly kaolinite, with alumina and silica contents of 21% and 37%, respectively. The percentage of solids proved to be a parameter of great influence on the rheological behavior of manganese tailings, and for a mass percentage of 10% the material can be considered as dilating, with its behavior changing to pseudoplastic with the increase in the concentration for 25.5%. The viscosity for the lowest concentration is practically constant over the entire range of shear rates, with a magnitude of 5.0cp, while, to operate at the highest concentration, high shear rates are indicated, where the magnitude of the viscosity is in the order of 13cp. The viscous transition velocity was identified with magnitude of 1.3 m/s and 1.6 m/s for the concentrations of 10% and 25.5%, respectively. As the material is superfine, it presents a pseudo-homogeneous behavior inside the ducts and there was not enough segregation of particles that could generate some concentration of manganese at the base of the tube, as function of its higher specific mass compared to the main gangue minerals.

Keywords: Manganese. Pumping. Reject pipeline. Rheology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração do fluxograma de processo do Azul	15
Gráfico 1 - Comportamento da perda de carga em função da velocidade para escoamento heterogêneo (A) e homogêneo (B)	17
Gráfico 2 - Variação do parâmetro FL em função da granulometria de sólidos e da concentração.....	20
Figura 2 – Homogeneização da amostra de manganês em pilha longitudinal	24
Figura 3 - Reômetro Anton Paar e geometrias do tipo cilindros concêntricos e Vane	25
Figura 4 – Unidade experimental de transporte hidráulico instalada no LFQI	26
Figura 5 – Homogeneização da polpa mineral em tanque de mistura.....	26
Gráfico 3 – Distribuição do tamanho de partículas para o rejeito de manganês	28
Figura 6 – Fluxos da polpa do rejeito de manganês provenientes das regiões inferior, central e superior do tubo	30
Gráfico 4 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o rejeito de manganês.....	31
Gráfico 5 – Viscosidade em função da taxa de deformação para o rejeito de manganês	32
Gráfico 6 - Gradiente de pressão em função da velocidade de escoamento para a polpa de manganês ($C_{m/m} = 10\%$) em dutos de 2 polegadas de diâmetro	34
Gráfico 7 – Gradiente de pressão em função da velocidade de escoamento para a polpa de manganês ($C_{m/m} = 25,5\%$) em dutos de 2 polegadas de diâmetro.....	34
Figura 7 – Teores de manganês dos diferentes fluxos obtidos nos experimentos de transporte hidráulico ($C_{m/m} = 10\%$) nas velocidades de 1,8 m/s (a) e 1,0 m/s (b).....	36
Figura 8 – Teores de manganês dos diferentes fluxos obtidos nos experimentos de transporte hidráulico ($C_{m/m} = 25,5\%$) nas velocidades de 2,0 m/s (c) e 1,3 m/s (d)	36
Gráfico 8 – Recuperação metalúrgica do manganês ($C_{m/m} = 10\%$) nas diferentes seções do tubo	37
Gráfico 9 – Teores de manganês dos diferentes fluxos obtidos nos experimentos de transporte hidráulico ($C_{m/m} = 25,5\%$) nas velocidades de 2,0 m/s (c) e 1,3 m/s (d)	37
Gráfico 10 – Concentrações de sólidos nas diferentes seções do tubo, verificadas nas velocidades de 1,0 m/s e 1,8 m/s	38
Gráfico 11 – Concentrações de sólidos nas diferentes seções do tubo, verificadas nas velocidades de 1,3 m/s e 2,0 m/s	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Correlações para viscosidade de polpas concentradas.....	23
Tabela 2 – Resultados da análise química por fluorescência de raios-X.....	27
Tabela 3 – Resultados da análise granulométrica.....	28
Tabela 4 – Condições experimentais dos testes de concentração	29
Tabela 5 – Modelos reológicos e parâmetros de ajuste para polpas do rejeito de manganês..	32
Tabela 6 – Dados do gradiente de pressão e velocidade média de escoamento da polpa de manganês com 10% de sólidos em massa.....	33
Tabela 7 – Dados do gradiente de pressão e velocidade média de escoamento da polpa de manganês com 25,5% de sólidos em massa.....	33
Tabela 8 – Resultado dos experimentos de reologia com a polpa de manganês na concentração de 25,5 % de sólidos em massa.....	45
Tabela 9 – Resultado dos experimentos de reologia com a polpa de manganês na concentração de 25,5 % de sólidos em massa.....	46
Tabela 10 – Resultado dos experimentos de reologia com a polpa de manganês na concentração de 10 % de sólidos em massa.....	47
Tabela 11 – Resultado dos experimentos de reologia com a polpa de manganês na concentração de 10 % de sólidos em massa.....	48
Tabela 12 – Resultados dos testes de concentração do rejeito de manganês em unidade de bombeamento ($v = 1,8$ m/s)	50
Tabela 13 – Resultados dos testes de concentração do rejeito de manganês em unidade de bombeamento ($v = 1,0$ m/s)	50
Tabela 14 – Resultados dos testes de concentração do rejeito de manganês em unidade de bombeamento ($v = 2,0$ m/s)	51
Tabela 15 – Resultados dos testes de concentração do rejeito de manganês em unidade de bombeamento ($v = 1,3$ m/s)	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CD	Coeficiente de Arraste
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
LFQI	Laboratório de Fenômenos de Transporte e Físico-Química de Interfaces
μm	Micrômetro
ROME	Rom of Mine
U^*	Velocidade de Cisalhamento
V_c	Velocidade Mínima de Transporte Crítica
V_D	Velocidade Mínima de Transporte de Deposição
V_T	Velocidade Crítica de Transição Viscosa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 OPERAÇÕES DE BOMBEAMENTO DE POLPAS MINERAIS.....	16
2.2 REOLOGIA DE POLPAS MINERAIS.....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 MATERIAIS	24
3.2 MÉTODOS	27
3.2.1 Massa específica, granulometria, caracterização mineralógica e análise química	27
3.2.2 Caracterização reológica	28
3.2.3 Curvas de bombeamento e concentração	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA	31
4.2 CURVAS DE BOMBEAMENTO E CONCENTRAÇÃO.....	33
5 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS	40
APÊNDICE A - RESULTADOS REFERENTES À REOLOGIA DAS POLPAS DE MANGANÊS	44
APÊNDICE B - BALANÇOS DE MASSA E METALÚRGICO DOS EXPERIMENTOS DE CONCENTRAÇÃO DO REJEITO DE MANGANÊS EM UNIDADE DE BOMBEAMENTO	49

1 INTRODUÇÃO

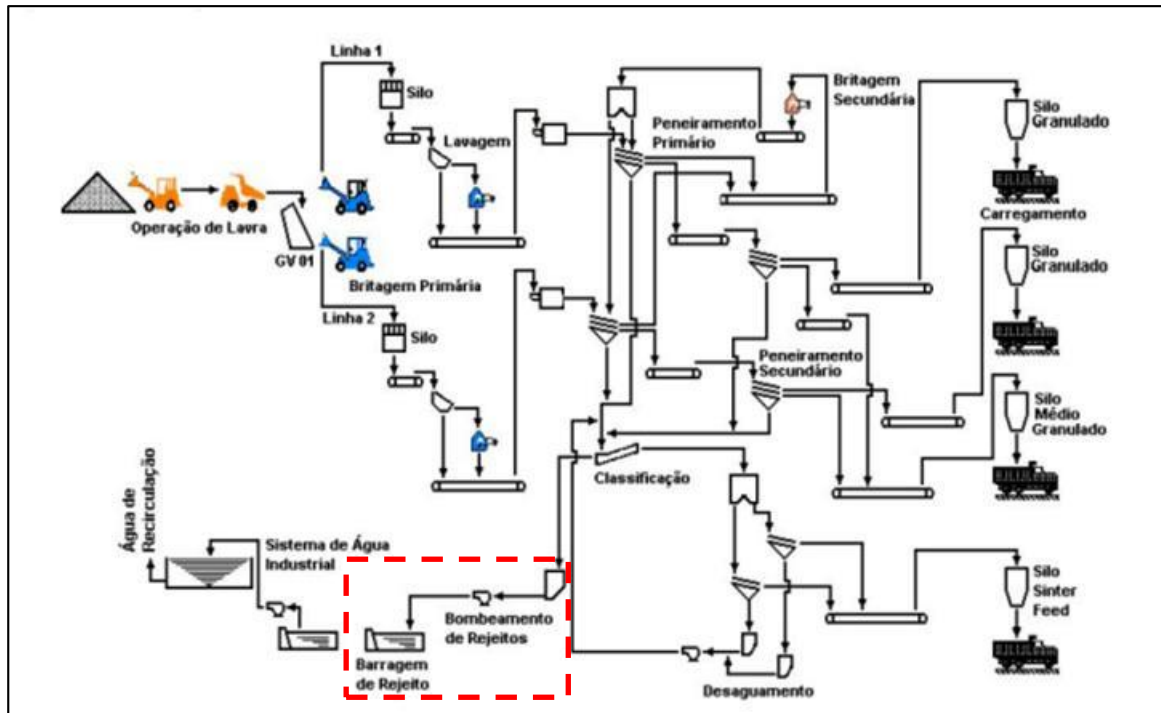
O mineral de manganês é um insumo de grande valor estratégico e encontra como principais aplicações o uso como agente dessulfurante e desoxidante em alto forno, bem como largo emprego na produção de ferro-ligas, sendo que o Brasil apresenta, em média, 19% das reservas mundiais (MME, 2017).

A Vale é atualmente a maior produtora de manganês no Brasil, e responde por cerca de 70% do mercado nacional. A Mina do Azul, no Pará, que apresenta reservas estimadas na ordem de 11 milhões de toneladas, é responsável por 80% da produção da empresa, e os demais 20% ficam distribuídos entre as minas de Urucum, no Mato Grosso e Morro da Mina, em Minas Gerais (VALE, 2020).

O beneficiamento do minério da Mina do Azul tem rota de processo a úmido, e é constituído pelas operações de britagem, peneiramento e lavagem, aproveitando-se apenas as frações mais grossas, que constituem os produtos denominados granulados e *sinter feed*. A fração mais fina ($<0,15\text{mm}$), obtida no *overflow* da hidrociclonagem, por apresentar menor teor de manganês, é descartada como rejeito na forma de polpa e bombeada para barragens de rejeito.

A relevância do presente estudo é justificada pela característica do comportamento complexo de polpas minerais de manganês quanto ao seu comportamento reológico, particularmente seu rejeito. O rejeito de manganês do Azul, de forma geral, é composto majoritariamente por argilominerais, em que a Caulinita corresponde a quase 70% de sua composição (SOUZA, 2014).

Figura 1 – Ilustração do fluxograma de processo do Azul



Fonte: SAMPAIO *apud* SOUZA, 2014.

Conforme Vale (2020), a mina do Azul tem produção anual média em torno de 1,2 milhões de toneladas, e a geração de rejeito está em torno de 8% do ROM, totalizando em média 80 mil toneladas ano.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo realizar a caracterização reológica para rejeito de manganês bem como identificar parâmetros de bombeamento, através de curvas de fluxo que correlacionam a perda de carga por metro de duto horizontal ($\Delta P/L$) em função da velocidade média de fluxo (V). Tais parâmetros permitem o entendimento do comportamento dos rejeitos de manganês em operações de bombeamento, identificando o papel do percentual de sólidos a ainda revelando parâmetros que podem ser úteis em processos de escalonamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 OPERAÇÕES DE BOMBEAMENTO DE POLPAS MINERAIS

Polpas minerais são fluidos constituídos por uma mistura de partículas minerais e água (usualmente o fluido carreador) sendo que o material particulado pode apresentar diferentes tamanhos, densidades, formas e composição química. Algumas destas características, tais como tamanho e densidade, interferem significativamente na homogeneidade da polpa e no grau de complexidade da operação de bombeamento.

Muitos autores (WASP; KENNY; GANDHI, 1977; JACOBS, 1991; WILSON *et al.* 2006; SOUZA PINTO, 2012) discutem que polpas minerais podem ser classificadas quanto ao comportamento como (pseudo) homogênea ou heterogênea. A primeira classe apresenta suspensões com partículas finas, usualmente com diâmetros menores que $75\mu\text{m}^1$, em que o líquido carreador e os sólidos são considerados como um fluido único. As partículas conseguem ser suspensas com a operação normal de bombeamento levando em consideração as propriedades do pseudo fluido. Neste tipo de polpa mineral, raramente ocorre deposição do material na base do duto, somente havendo sedimentação no interior do tubo com a interrupção da operação. Ainda de acordo com estes autores, uma segunda classe pode ser caracterizada por polpas que apresentam comportamento em que as partículas sólidas possuem maior potencial de sedimentação, apresentando um fluxo heterogêneo, onde os sólidos são mal distribuídos ao longo da seção transversal do duto, mesmo em altas velocidades de transporte. Os efeitos da adição dos sólidos mais grosseiros produzem uma perda de carga adicional, sendo que algumas literaturas indicam o tamanho crítico com $100\mu\text{m}$ e outras reportam partículas críticas ou com diâmetros a partir de $150\mu\text{m}$.

Para polpas pseudo homogêneas, assume relevância a velocidade crítica de transição viscosa (V_T), correspondente à transição de regime laminar/turbulento (WASP; KENNY; GANDHI, 1977). Por outro lado, partículas grossas ($d \geq 0,105\text{mm}$), devido à forte tendência de sedimentação no interior dos dutos, apresenta, frequentemente, segregação do material na seção transversal do tubo e a determinação da velocidade crítica de deposição (V_D) é de vital importância, sendo esta a velocidade mínima necessária para evitar entupimentos e

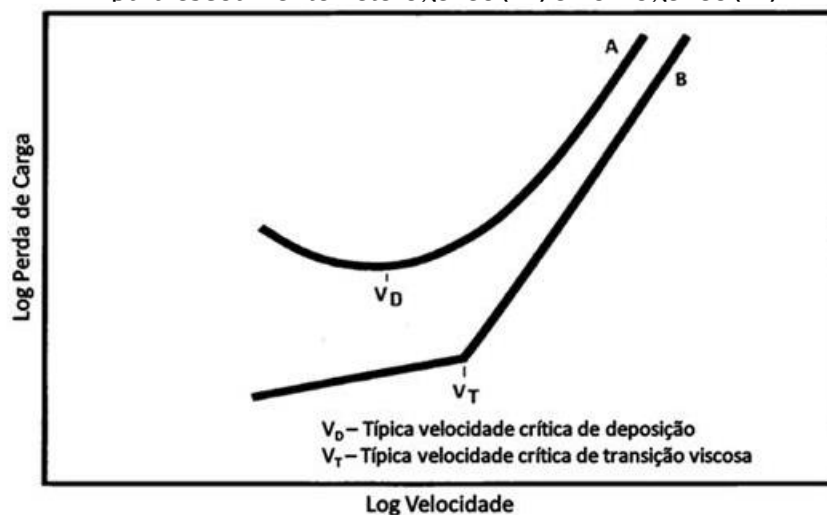
¹ O micrómetro, cujo símbolo é μm , consiste numa unidade da grandeza física comprimento. É um submúltiplo do metro. No sistema internacional de unidades (SI), o comprimento vem expresso em metros pelo que para converter micrómetros em metros é necessário reduzir micrómetros a metros, isto é, $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$.

obstruções da operação (SOUZA PINTO *et al.*, 2014).

O comportamento de suspensões contendo partículas minerais apresenta diferenças importantes quando comparadas com o comportamento de um fluido simples em operações de bombeamento em dutos. Para líquidos puros ou suspensões pseudo-homogêneas, tais parâmetros podem ser determinados a partir das propriedades físicas do líquido e do sistema de bombeamento, sendo que a operação permite alcançar uma completa faixa de velocidades em diferentes regimes de escoamentos (laminar, transição ou turbulento). Já para sistemas de bombeamento de polpas minerais, que apresentam partículas grossas, a caracterização de um sistema de bombeamento se apresenta com maior dificuldade devido às alterações provocadas pelas partículas grossas e pelo comportamento da polpa quando submetida a diferentes condições de velocidade e pressão (JACOBS *et al.*, 1991; WASP; KENNY; GANDHI, 1977; JACOBS, 1991; WILSON *et al.*, 2006).

O comportamento das curvas de bombeamento (perda de carga *versus* vazão/velocidade) para polpas pseudo-homogêneas difere do comportamento encontrado para polpas heterogêneas, sendo que a principal diferença se dá no regime de escoamento, que para polpas heterogêneas há necessidade de operação em regime predominantemente turbulento, onde há a necessidade de uma velocidade mínima de transporte, denominada crítica (V_c) ou de deposição (V_d) (BROWN; HEYWOOD, 1991; DORON; GRANICA; BARNEA, 1987), onde para valores de velocidade de fluxo abaixo de V_c inicia-se a sedimentação das partículas e a formação de um leito fixo na base dos dutos. O Gráfico 1 apresenta o comportamento típico para cada classificação de polpa.

Gráfico 1 - Comportamento da perda de carga em função da velocidade para escoamento heterogêneo (A) e homogêneo (B)



Fonte: SOUZA PINTO, 2012, p. 61.

Diferentemente do fluxo em regime laminar, o fluxo em regime turbulento possui mecanismos que podem suportar uma fração das partículas de maior tamanho. Neste regime, o gradiente de pressão possui dois componentes: o primeiro, associado ao fluido carreador, que varia inversamente com o diâmetro da tubulação; e o segundo, associado ao contato de carregamento de sólidos (concentração), o qual é independente do diâmetro do duto. O fluido carreador pode ser entendido como toda a polpa mineral exceto as partículas que estão sujeitas a se depositar (WILSON *et al.*, 2006).

A velocidade de cisalhamento (U^*) é o parâmetro básico no fluxo turbulento. Este parâmetro é uma forma de reescrever a tensão de cisalhamento na dimensão de velocidade, conforme demonstrado na equação 1. No regime turbulento as flutuações de velocidade associadas aos vórtices turbulentos têm a mesma ordem de magnitude de U^* . Num fluxo completamente turbulento, o gradiente de velocidade du/dy é diretamente proporcional a U^* .

$$U^* = \sqrt{\tau_w / \rho_m} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

U^* é a velocidade de cisalhamento (m/s);

τ_w é a tensão de cisalhamento na parede (Pa)

ρ_m é a massa específica da mistura (kg/m³).

A fórmula universal para a tensão de cisalhamento na parede do duto (τ_w) para regime turbulento e fluidos Newtonianos e não-Newtonianos, é dada pela Equação 2.

$$\tau_w = \frac{(\frac{\Delta P}{L}) \cdot D}{4L} \quad (\text{Equação 2})$$

Portanto, rearranjando as Equações 1 e 2, tem-se a Equação 3, utilizada para a determinação da velocidade de cisalhamento U^* (WILSON *et al.*, 2006).

$$U^* = \sqrt{\frac{D \cdot (\frac{\Delta P}{L})}{4 \rho_m}} \quad (\text{Equação 3})$$

O escalonamento de dados de velocidade e perda de carga são bem definidos para polpas pseudo homogêneas, onde a mesma pode ser considerada como um fluido único com viscosidade e densidade aparentes. Neste caso, leis hidrodinâmicas e de afinidade para escoamentos podem ser aplicadas. Já para polpas heterogêneas, onde o caráter de sedimentação das partículas é muito mais presente, tais leis não se adequam de forma apropriada, especialmente para fluxo em regime turbulento, e equações e modelos empíricos são comumente empregados (CHABRA; RICHARDSON, 1999; SLATTER, 2008).

Para polpas heterogêneas que são bombeadas em concentrações de sólidos mais altas, existe uma fração das partículas que são suportadas pelo contato das mesmas somado ao efeito inercial do fluxo turbulento, facilitando assim seu transporte em dutos. Wilson *et al.* (2006) apresentam interessante discussão abordando que, uma vez que a sedimentação das partículas não ocorra no interior dos dutos, as equações para escalonamento dos dados para polpas pseudo-homogêneas podem ser válidas, especialmente para predizer U^* . Uma vez que haja o suporte de parte das partículas pelo efeito da concentração de sólidos, a suspensão e transporte das mesmas não fica sendo única e exclusivamente função da carga turbulenta do sistema.

Para testes experimentais em fluxo não-newtoniano e turbulento, todas as variáveis do procedimento de escalonamento estão disponíveis para cada ponto experimental através de dados obtidos em ensaios de bombeamento ($\Delta P/L - Q$) em unidades do tipo "*test loop*".

Muitos trabalhos na literatura corrente apresentam testes empíricos em unidades de menor escala ou mesmo reportam resultados de pesquisa em equipamentos pilotos, ambos visando o projeto, dimensionamento e operação de minerodutos industriais. Especificamente para a predição da velocidade crítica de transporte (V_c), destacam-se: Durand (1952); Wilson e Judge (1976), Wasp; Kenny e Gandhi (1977), Turian (1987), Wasp e Slatter (2004), Souza Pinto *et al.* (2014). Por outro lado, Wasp e Slatter (2004) afirmam haver muita discordância entre os modelos propostos, devido, principalmente, ao fato das correlações não apresentarem suas faixas de aplicabilidade bem definidas.

O primeiro modelo de grande aplicação para a determinação da velocidade de deposição em dutos para polpas minerais, vem do clássico trabalho de Durand (1952), sendo este um dos pioneiros nesta temática, conforme ilustrado na Equação 4. Durand (1952) apresenta um parâmetro FL que é função do tamanho de partículas e da concentração de sólidos, sendo aplicável para partículas de até 1mm (WASP; KENNY; GANDHI, 1977; KAUSHAL; TOMITA; DIGHADE, 2001), conforme ilustrado no Gráfico 2. A base da formulação do

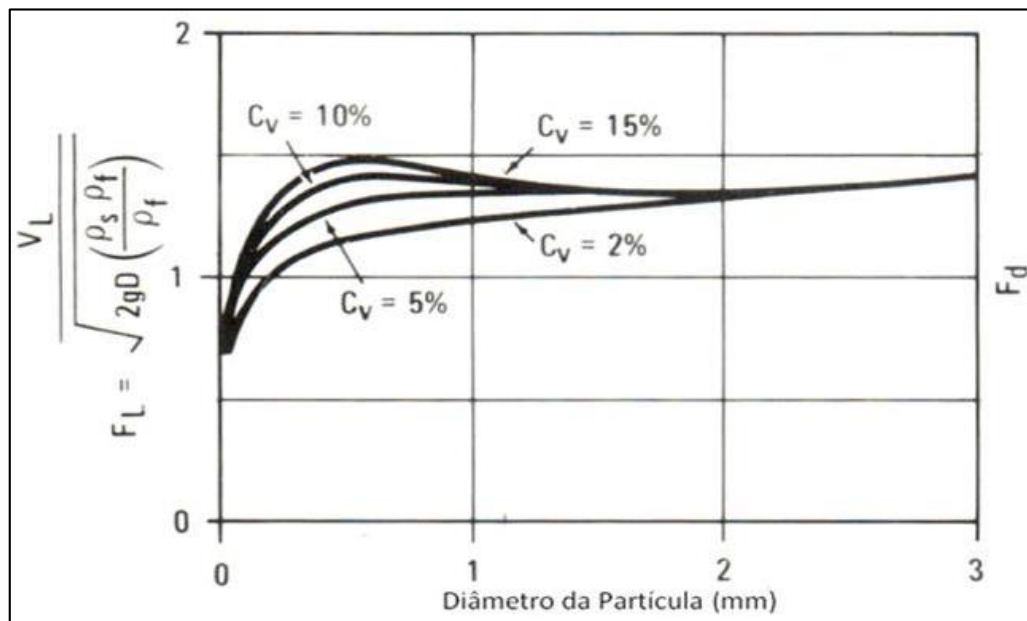
modelo proposto por Durand apresentou testes em dutos com diâmetros variando entre $38\text{mm} < D < 254\text{mm}$ ($1.5\text{in} < D < 10\text{in}$). O material utilizado foi quartzo e seixos (cascalhos), que variaram de $38\text{-}250\mu\text{m}$.

$$V_D = F_L \cdot [2gD(S-1)]^{0.5} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

- VD: velocidade crítica de deposição [m/s];
 FL: fator de Durand, função da granulometria e da diluição polpa;
 g: aceleração da gravidade [m/s^2];
 D: diâmetro da tubulação [m];
 S: densidade relativa (sólido/líquido).

Gráfico 2 - Variação do parâmetro FL em função da granulometria de sólidos e da concentração



Fonte: WASP *et al.* (1977 *apud* MARTINS, 2014, p. 22).

O modelo apresentado por Wilson e Judge (1976) foi desenvolvido de forma mecanística, utilizando um grupo adimensional na razão entre diâmetro do duto e da partícula, aplicando-se para partículas de até $150\mu\text{m}$, conforme apresentado na Equação 5. Os autores também evidenciaram o efeito da forma da partícula no escoamento e na magnitude da velocidade crítica a ser empregada através do Coeficiente de Arraste (CD).

$$V_D = 2.0 + 0.3 \log \left(\frac{d}{D.C_D} \right) [2.g.D(S-1)]^{0.5} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

VD: velocidade crítica de deposição [m/s];
d: diâmetro médio das partículas [m];
D: diâmetro da tubulação [m];
CD: coeficiente de arraste;
g: aceleração da gravidade [m/s²];
S: densidade relativa (sólido/líquido).

Wasp e Slatter (2004) propuseram um modelo para previsão da velocidade crítica de deposição (V_D) em polpas constituídas por partículas finas, expresso pela Equação (6) (SOUZA PINTO *et al.*, 2014):

$$V_D = 0,18(S-1)^{0,5} \left(\frac{d_{95}\rho_s\sqrt{gD}}{\mu_f} \right)^{0,22} e^{4,34C_V} \quad (\text{Equação 6})$$

Souza Pinto (2012) também desenvolveu um modelo para a velocidade crítica (V_C) em polpas constituídas por partículas exclusivamente grossas ($d > 106\mu\text{m}$), baseado no modelo de Wasp e Slatter (2004) e que incorpora o efeito de forma das partículas através do coeficiente de esfericidade, conforme apresentado pela Equação (7):

$$V_C = 0,124(S-1)^{0,5} \left(\frac{d_s\rho_m\sqrt{gD}}{\mu_f} \right)^{0,37} \left(\frac{d_s\Psi}{D} \right) e^{3,10C_V} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo (Eq. 6 e 7):

S a densidade relativa sólido/líquido;
 d_{95} o diâmetro de partícula no qual 95% é passante;
 d_s o diâmetro médio de Sauter;
 ρ_s a massa específica das partículas;
 ρ_m a massa específica da polpa;
 D o diâmetro do tubo;
 μ_f a viscosidade do fluido carreador;
 Ψ a esfericidade da partícula;
 C_V concentração de sólidos em volume.

2.2 REOLOGIA DE POLPAS MINERAIS

A definição de fluidos pode ser definida como substâncias que se deformam continuamente quando submetidos a uma tensão cisalhante, e a reologia é a ciência que classifica os fluidos quanto ao seu comportamento, mediante a aplicação de uma força cisalhante (MACOSKO, 1993). Estudos do fluxo e sua deformação se apresentam de suma importância, principalmente para análise e projeto de equipamentos como bombas, tubulações e acessórios, tanques com impulsores mecânicos, dentre outros (WILSON *et al.*, 2006).

Para a caracterização reológica da polpa mineral, principalmente na presença de partículas grossas ($d_p > 100\mu\text{m}$), Slatter (1999) e Whiten; Steffens; Hitchens (1993) afirmam que medidas em viscosímetros de tubo (ou *test loop*) são mais realistas e os resultados mais reprodutivos, já que este tipo de viscosímetro minimiza o efeito de segregação e sedimentação das partículas, utilizando a perda de carga e fatores de fricção conhecidos em função da vazão, para o levantamento do pseudoreograma de uma polpa mineral.

O efeito da concentração de sólidos é um fator de extrema importância na caracterização reológica de suspensões. Segundo Cox e Brenner (1970), as interações entre as partículas afetam o comportamento e a caracterização reológica da suspensão, se revelando mais complexo quanto maior a concentração dos sólidos.

Souza Pinto (2012) apresenta e discute o efeito do percentual de sólidos em operações de bombeamento de polpas minerais para partículas grossas, e apresenta algumas correlações da literatura aberta para determinação da viscosidade aparente de suspensões (Tabela 1).

Slatter (1999) afirma que o modelamento reológico de polpas minerais pode ser realizado de forma satisfatória através dos modelos pseudoplástico e de plástico de Bingham, em que cada modelo apresenta “yield stress” $\tau_y = 0$ e índice de consistência $n=1$, respectivamente.

Tabela 1- Correlações para viscosidade de polpas concentradas

AUTOR	MODELO
Tomas (1965)	$\frac{\mu}{\mu_f} = 1 + 2,5\phi + 10,05\phi^2 + 0,00273e^{16,6\phi}$
Heiskanen e Laapas (1979)	
Shook e Roco (1991)	$\frac{\mu}{\mu_f} = 1 + 2,5\phi + 14,1\phi^2 + 0,00273e^{16,6\phi}$
Krieger e Dougherty (1959)	
Senepati e outros (2009)	$\frac{\mu}{\mu_f} = 1 + 2,5\phi + 10\phi^2 + 0,0019e^{20\phi}$
	$\frac{\mu}{\mu_f} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{\mu \cdot \phi_m}$
	$\frac{\mu}{\mu_f} = \frac{10C_u}{d_{50}} \left[1 + \frac{\mu}{\gamma^{0,4}} \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_m - \phi} \right) \right]^{3,5}$

Fonte: SOUZA PINTO, 2012, p. 41.

Sendo:

ϕ_m o máximo empacotamento da suspensão

C_u coeficiente de uniformidade

d_{50} granulometria em que 50% é passante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os estudos foram conduzidos com uma amostra de rejeito de manganês proveniente da Mina do Azul, Carajás, Pará, tendo sido fornecida pela empresa Vale S/A. Após seu recebimento, a amostra foi seca em estufa (80°C), desagregada e homogeneizada em pilha longitudinal. Subsequentemente, foi retirada uma alíquota representativa para as etapas de caracterização granulométrica, mineralógica, química e reológica. Finalmente, procedeu-se o quarteamento do material em amostras de 5 kg e 2 kg para os experimentos de transporte hidráulico. A Figura 2 mostra a pilha de homogeneização da amostra do rejeito, com massa total de 67,68 kg.

Figura 2 – Homogeneização da amostra de manganês em pilha longitudinal



Fonte: Elaboração própria, 2020.

A caracterização reológica do rejeito de manganês foi conduzida em um reômetro rotacional Anton Paar equipado com geometria do tipo cilindros concêntricos (Figura 3), o qual permitiu a obtenção da tensão de cisalhamento e da viscosidade em função da taxa de deformação. As concentrações de sólidos em massa praticadas na presente investigação foram de 10% e 25,5%.

Figura 3 - Reômetro Anton Paar e geometrias do tipo cilindros concêntricos e vane



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Os experimentos de transporte hidráulico, necessários à obtenção das curvas de fluxo e à concentração do rejeito estudado, foram realizados em uma unidade experimental de bombeamento, construída com dutos de 2 polegadas e equipada com tanque agitado para preparação da polpa, bomba centrífuga, medidores de vazão, manômetros e calhas, sendo estas acopladas no ponto de descarga e destinadas à coleta dos produtos que escoam nas regiões inferior (produto de base), central (produto de meio) e superior do tubo (produto de topo). Um trecho horizontal da unidade experimental foi construído com tubo de acrílico, de modo a permitir a visualização do fluxo e identificar uma possível sedimentação das partículas. Os experimentos foram realizados com polpas minerais preparadas nas concentrações de 10% e 25,5% de sólidos em massa, mantidas sob agitação vigorosa no tanque de mistura para garantir a homogeneidade das mesmas (Figuras 4 e 5, a seguir).

Figura 4 – Unidade experimental de transporte hidráulico instalada no LFQI



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Figura 5 – Homogeneização da polpa mineral em tanque de mistura



Fonte: Elaboração própria, 2020.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Massa específica, granulometria, caracterização mineralógica e análise química

A massa específica das partículas foi realizada por picnometria, no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Físico-Química de Interfaces (LFQI), da Escola Politécnica da USP, em um picnômetro a gás fabricado pela Quanta chrome Instruments. O valor médio obtido com base em seis determinações foi de 3125,3 kg/m³.

As etapas de caracterização mineralógica, química e granulométrica foram conduzidas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo (LCT/PMI/USP). A identificação das fases cristalinas foi realizada por difratometria de raios-X (DRX) pelo método do pó, indicando a presença de quartzo (SiO₂), birnessita (Na_{0,58}Mn₂O₄(H₂O)_{1,5}), caulinita (Al₂(Si₂O₅)(OH)₄), além das possíveis presenças de todorokita (Mn₆O₁₂(H₂O)₃) e tridimita (SiO₂). A análise química foi feita em espectrômetro de fluorescência de raios-X (FRX) (MalvernPanalytical) por comparação com materiais de referência certificados, cujos teores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da análise química por fluorescência de raios-X

Elementos/óxidos	Teor (%)
Mn	13,2
Fe	4,66
P	0,054
Al ₂ O ₃	21,4
K ₂ O	0,69
BaO	< 0,10
SiO ₂	37,6
PF	12,2

Fonte: Elaboração própria, 2020.

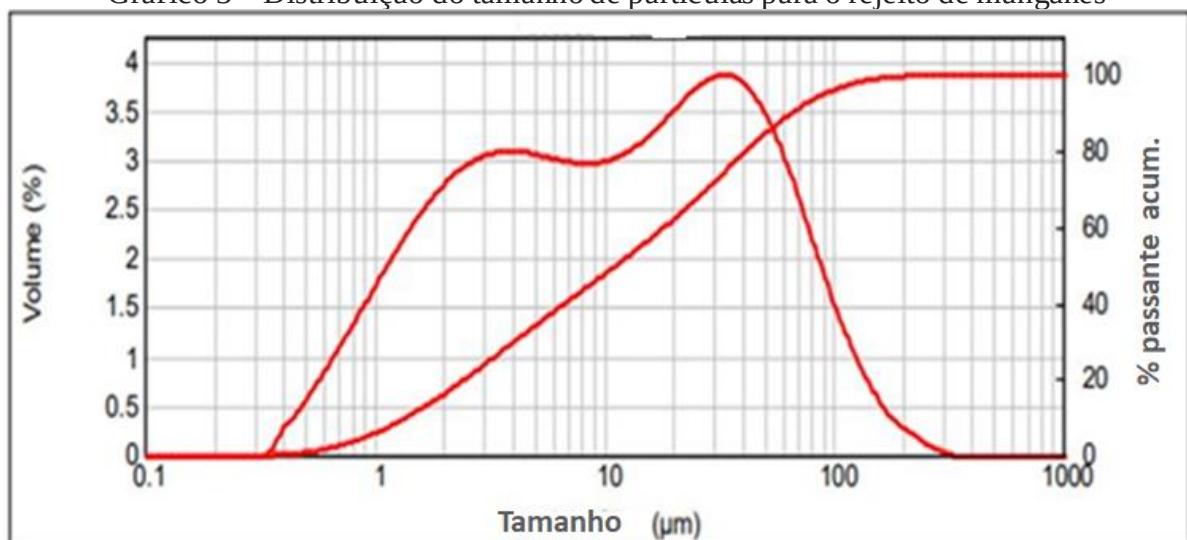
A distribuição do tamanho de partículas foi obtida no equipamento Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Ltd.) e revelou um diâmetro médio de Sauter de 3,934 µm, d₅₀ = 11,346 µm e uma área superficial específica de 1,53 m²/g, conforme apresentado na Tabela 3. A distribuição do tamanho de partículas é apresentada no Gráfico 3.

Tabela 3 – Resultados da análise granulométrica

Diâmetros	Valor (μm)
d ₁₀	1,390
d ₃₂	3,934
d ₄₃	24,955
d ₅₀	11,346
d ₉₀	65,827

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Gráfico 3 – Distribuição do tamanho de partículas para o rejeito de manganês



Fonte: Elaboração própria, 2020.

3.2.2 Caracterização reológica

Taxas de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) na faixa de 16,4 a 604 s⁻¹ foram aplicadas visando à obtenção das curvas reológicas. Subsequentemente, foram feitos ajustes dos dados experimentais empregando-se os modelos reológicos Lei da Potência e de Phillips-Deutsch, representados pelas Equações 8 (TURIAN *et al.*, 1998) e 9 (DIAB *et al.*, 2020), respectivamente, os quais proporcionaram os melhores ajustes das curvas experimentais.

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (\text{Equação 8})$$

$$\tau = C_1 \left[\frac{1 + C_2 \dot{\gamma}^2}{1 + C_3 \dot{\gamma}^2} \right] \dot{\gamma} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

τ : a tensão de cisalhamento (Pa);

K : o índice de consistência do fluido (Pa.s);

n : o índice de comportamento do fluido e indica como ele se comporta em relação ao fluido Newtoniano (adimensional);

$\dot{\gamma}$: a taxa de cisalhamento ou de deformação (1/s);

C_1, C_2, C_3 coeficientes de ajuste do modelo.

3.2.3 Curvas de bombeamento e concentração

O procedimento experimental para a obtenção da curva de fluxo consiste na circulação da polpa mineral na unidade de bombeamento, variando-se a velocidade média de escoamento (v), por meio de um inversor de frequência, a fim de se obter os gradientes de pressão correspondentes ($\Delta P/L$).

Após a obtenção das curvas de fluxo, foram definidas as velocidades de operação utilizadas na etapa de concentração do rejeito estudado, conforme apresentado na Tabela 4. O critério foi adotar uma velocidade ligeiramente abaixo da crítica e outra acima, para observar os critérios de deposição e distribuição do manganês.

Tabela 4 – Condições experimentais dos testes de concentração

Teste	$C_{m/m}$ (%)	v (m/s)
1	10	1,8
2	10	1,0
3	25,5	2,0
4	25,5	1,5

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Após 20 minutos de operação em cada velocidade de escoamento praticada, iniciou-se a amostragem dos fluxos da polpa, provenientes das regiões inferior (produto de base), central (produto de meio) e superior (produto de topo) do tubo (Figura 6, a seguir).

Figura 6 – Fluxos da polpa do rejeito de manganês provenientes das regiões inferior, central e superior do tubo



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Foram coletadas três alíquotas de cada fluxo para a composição da amostra total. As alíquotas foram pesadas, secas, desagregadas, homogeneizadas e enviadas ao Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) para a análise química dos diferentes produtos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

Os resultados de caracterização do rejeito de manganês são apresentados nos Gráficos 4 e 5. Na concentração de 10% de sólidos em massa, verifica-se pelo aspecto da curva, que a polpa de manganês exibe um comportamento dilatante. Tal comportamento é corroborado pelos parâmetros de ajuste do modelo Lei da Potência apresentados na Tabela 5, cujo índice de comportamento foi superior a 1 ($n = 1,2155$). Ainda em relação à concentração de 10% de sólidos, o modelo de Philips-Deutsch, originalmente concebido para a reologia do sangue (PHILIPS; DEUTSCH, 1975), foi capaz de promover um ajuste ainda melhor ($R^2 = 0,999$) comparado à Lei da Potência ($R^2 = 0,983$). Os resultados também revelaram que o rejeito de manganês, diferentemente da concentração menor, apresenta um comportamento pseudoplástico na concentração de 25,5% de sólidos em massa. O aspecto da curva apresentada no Gráfico 4 mostra a “união” de duas curvas características do comportamento pseudoplástico nos intervalos de $16,4 \leq \dot{\gamma} \leq 474$ e $474 \leq \dot{\gamma} \leq 604$. Por essa razão, os resultados experimentais foram ajustados satisfatoriamente pelo modelo Lei da Potência nos dois intervalos supracitados para taxa de cisalhamento, conforme apresentado na Tabela 5. O Gráfico 5 também mostra o comportamento tipicamente pseudoplástico da polpa a 25,5% de sólidos, ou seja, o decréscimo da sua viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Por outro lado, a curva relacionada à polpa com 10% de sólidos mostra um pequeno aumento na viscosidade com a taxa de deformação, comportamento típico de fluidos dilatantes.

Gráfico 4 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o rejeito de manganês

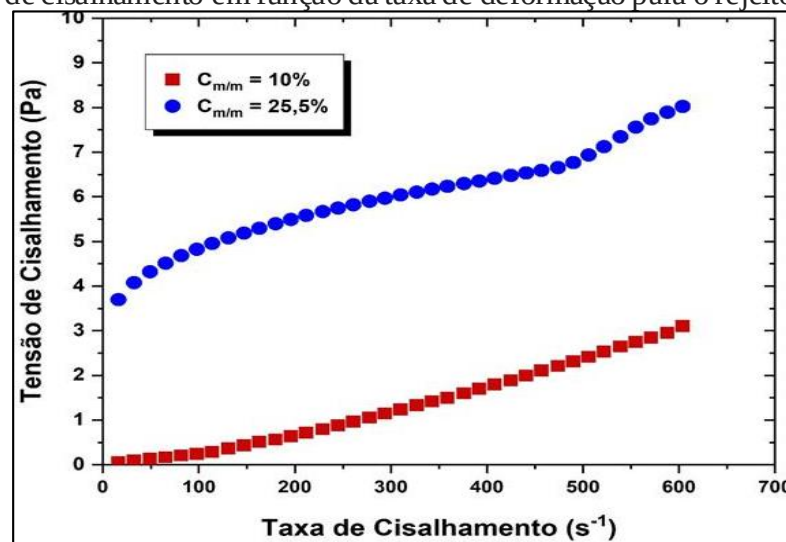
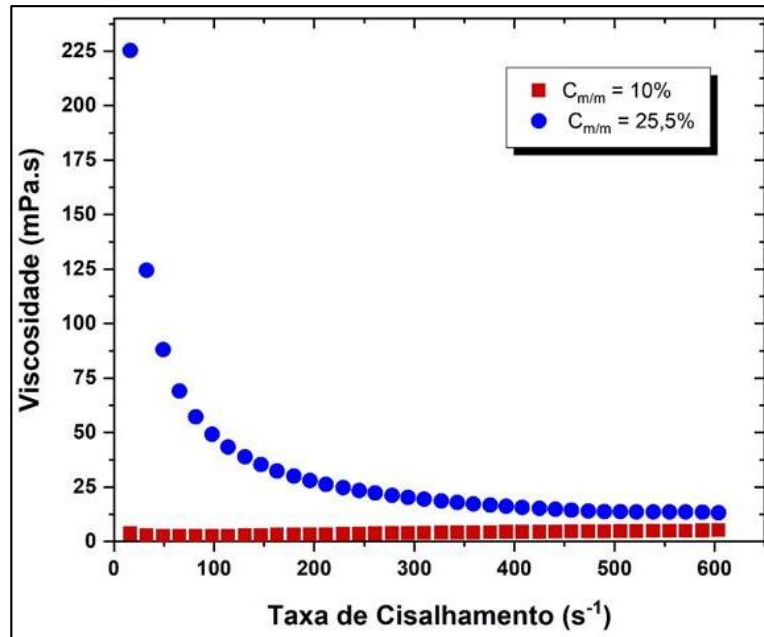


Gráfico 5 – Viscosidade em função da taxa de deformação para o rejeito de manganês



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 5 – Modelos reológicos e parâmetros de ajuste para polpas do rejeito de manganês

$C_{m/m} (\%)$	$\dot{\gamma} (s^{-1})$	Modelo	Parâmetros
10	$16,4 \leq \dot{\gamma} \leq 604$	$\tau = K(\dot{\gamma})^n$	$K = 1,1588 \times 10^{-3}$ $n = 1,2155$ $R^2 = 0,983$
10	$16,4 \leq \dot{\gamma} \leq 604$	$\tau = C_1 \left[\frac{1 + C_2 \dot{\gamma}^2}{1 + C_3 \dot{\gamma}^2} \right] \dot{\gamma}$	$C_1 = 2,5649 \times 10^{-3}$ $C_2 = 1,3584 \times 10^{-5}$ $C_3 = 5,4262 \times 10^{-6}$ $R^2 = 0,999$
25,5	$16,4 \leq \dot{\gamma} \leq 474$	$\tau = K(\dot{\gamma})^n$	$K = 2,1363$ $n = 0,18108$ $R^2 = 0,992$
25,5	$474 \leq \dot{\gamma} \leq 604$	$\tau = K(\dot{\gamma})^n$	$K = 4,2974 \times 10^{-2}$ $n = 0,81736$ $R^2 = 0,995$

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Segundo Slatter (1997), a concentração de sólidos é um dos parâmetros que mais influenciam no comportamento reológico de polpas minerais. Este mesmo parâmetro foi

responsável pela mudança do comportamento dilatante para pseudoplástico do material estudado.

4.2 Curvas de bombeamento e concentração

As Tabelas 6 e 7 e os Gráficos 6 e 7 apresentam os resultados das curvas de bombeamento para suspensões de manganês.

Tabela 6 – Dados do gradiente de pressão e velocidade média de escoamento da polpa de manganês com 10% de sólidos em massa

v (m/s)	$\Delta P/L$ (Pa/m)
1,20	876,06
1,30	712,61
1,40	725,69
1,50	830,29
1,60	1078,73
1,70	1046,04
1,80	1235,63
1,90	1346,77

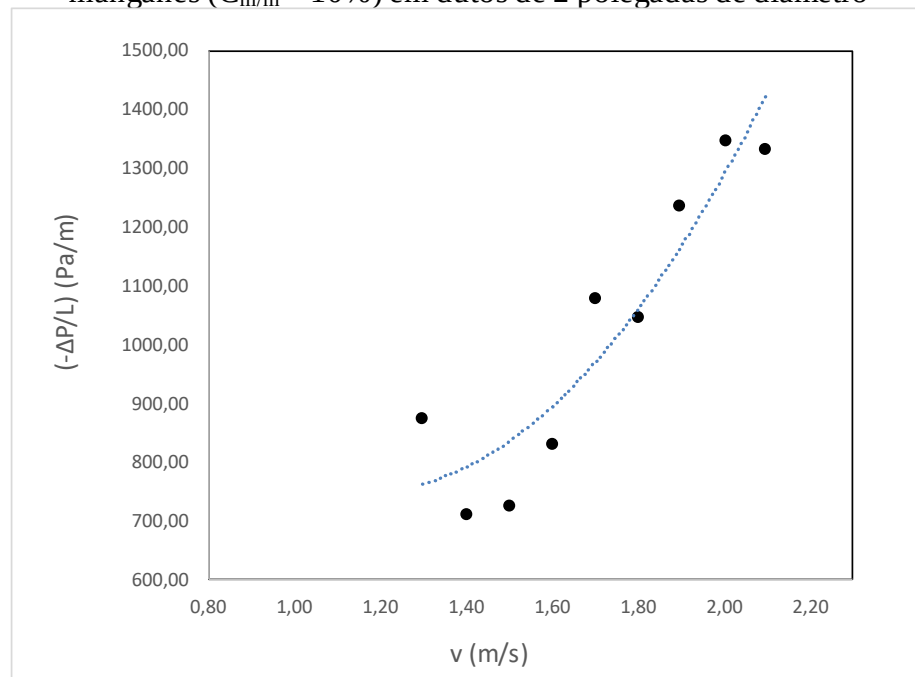
Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 7 – Dados do gradiente de pressão e velocidade média de escoamento da polpa de manganês com 25,5% de sólidos em massa

v (m/s)	$\Delta P/L$ (Pa/m)
1,52	2373,20
1,61	2360,12
1,71	2360,12
1,82	2432,04
1,91	2543,18
2,01	2628,17

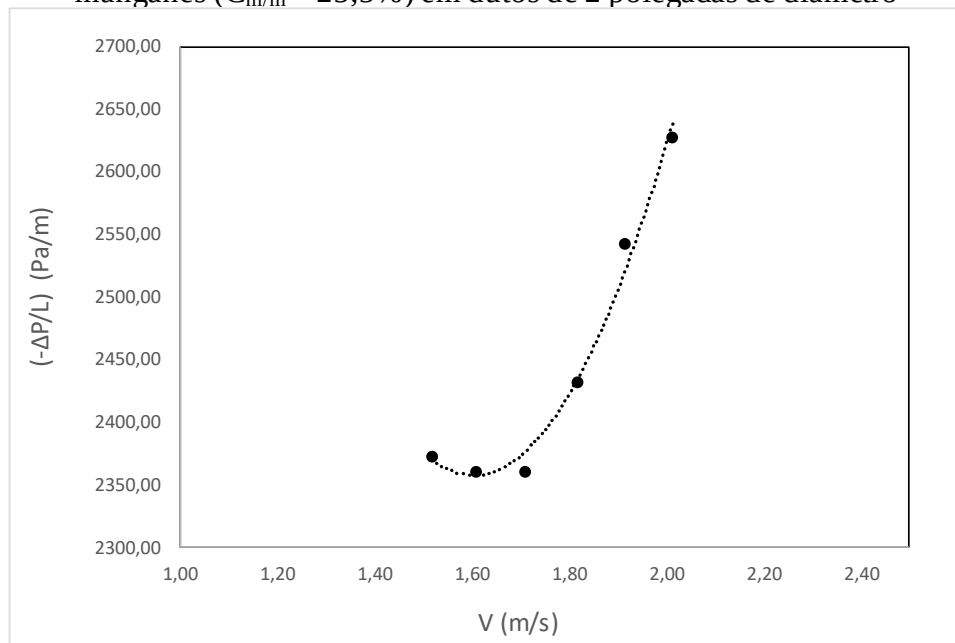
Fonte: Elaboração própria, 2020.

Gráfico 6 - Gradiente de pressão em função da velocidade de escoamento para a polpa de manganês ($C_{m/m} = 10\%$) em dutos de 2 polegadas de diâmetro



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Gráfico 7 – Gradiente de pressão em função da velocidade de escoamento para a polpa de manganês ($C_{m/m} = 25,5\%$) em dutos de 2 polegadas de diâmetro



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Muito embora as curvas de fluxo obtidas para o rejeito de manganês apresentem regiões características que aparentemente indicam fluxo heterogêneo, com possível velocidade crítica de deposição, visualmente não foi constatada nenhuma sedimentação de partícula. Em todas as velocidades (Tabelas 6 e 7) e concentrações (10% e 25,5%) praticadas, o fluxo permaneceu visualmente como pseudo homogêneo. Tal condição de escoamento pode ser explicada pelo estado de plena turbulência aliada à granulometria fina do material ($d_{50} = 11,35 \mu\text{m}$), que fizeram com que as partículas permanecessem homogeneamente distribuídas ao longo da seção transversal do tubo.

No que se refere à concentração do rejeito de manganês, as Figuras 7 e 8 apresentam os teores dos produtos obtidos nas regiões inferior, central e superior do tubo. Os resultados mostram que não houve concentração em nenhuma das condições de agrupamento de sólidos e velocidade investigados. Como já mencionado, a plena turbulência em todas as condições experimentais e a granulometria fina ($d_{50} = 11,35 \mu\text{m}$), garantiram que a polpa permanecesse homogeneamente distribuída na seção transversal do tubo.

A Figura 7 refere-se à polpa com percentagem de sólidos de 10% em massa, transportadas com velocidades médias de 1,0 m/s e 1,8 m/s. Na Figura 8 os resultados referem-se à polpa com 25,5% de sólidos e velocidades de 1,5 m/s e 2,0 m/s.

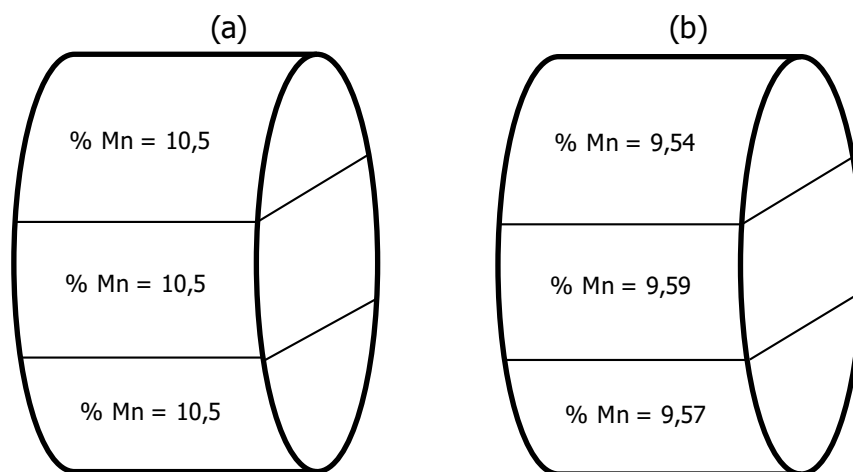
Sendo silicatos e argilominerais os principais constituintes da ganga no rejeito de manganês, por razões de diferenças de massa específica com o mineral de manganês, poderia haver algum tipo de segregação em função desta diferença no interior dos dutos. Tal fato poderia levar a uma concentração do manganês na base do tubo, uma vez que o mesmo se apresenta mais denso. Todavia, frente à homogeneidade da distribuição de massa ao longo da seção transversal do duto, principalmente pela granulometria fina do material, não foi observada nenhuma concentração do manganês por segregação no interior dos dutos.

Os Gráficos 8 e 9 apresentam as distribuições e a partição do manganês, obtidas a partir do transporte hidráulico do rejeito de manganês, coletadas individualmente na calha distribuidora, instalada na saída do duto de descarga. As concentrações de sólidos em massa para todas as condições experimentais estudadas são reportadas nas Figuras 7 e 8. A partir destes resultados fica evidente a distribuição uniforme de partículas ao longo da seção transversal do tubo. Fatores como a baixa concentração de sólidos, a granulometria fina e a turbulência foram os responsáveis pelas condições de homogeneidade.

Muito embora não tenha havido a concentração do manganês através de segregação do material no interior dos dutos, o que poderia agregar ainda mais valor para a operação de

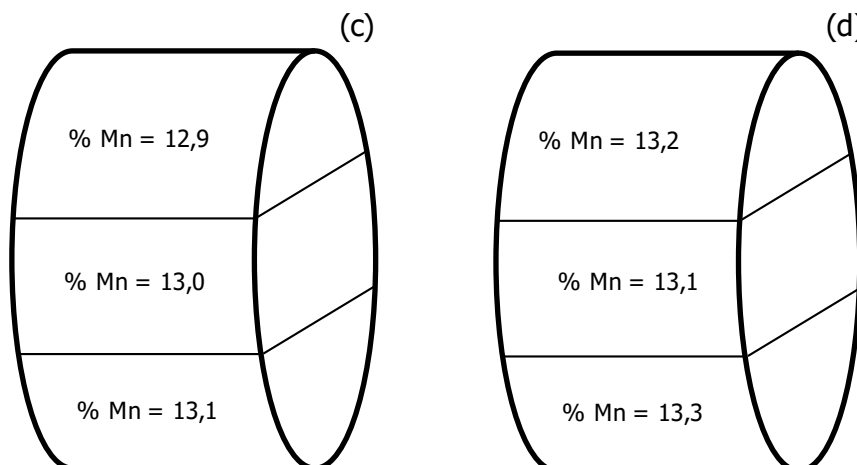
bombeamento do rejeito, o transporte hidráulico aplicado como operação unitária de concentração de minérios de manganês pode ser promissor, desde que se garanta a presença de material mais grosseiro no rejeito, sendo que estas frações são onde o manganês se concentra mais para o material do Azul. Condições experimentais que incluam velocidades de escoamento mais baixas ($v < 1,0$ m/s), granulometria mais grossa e concentrações de sólidos mais altas ($C_{m/m} > 25,5$ %) podem contribuir para o êxito do processo.

Figura 7 – Teores de manganês dos diferentes fluxos obtidos nos experimentos de transporte hidráulico ($C_{m/m} = 10\%$) nas velocidades de 1,8 m/s (a) e 1,0 m/s (b)



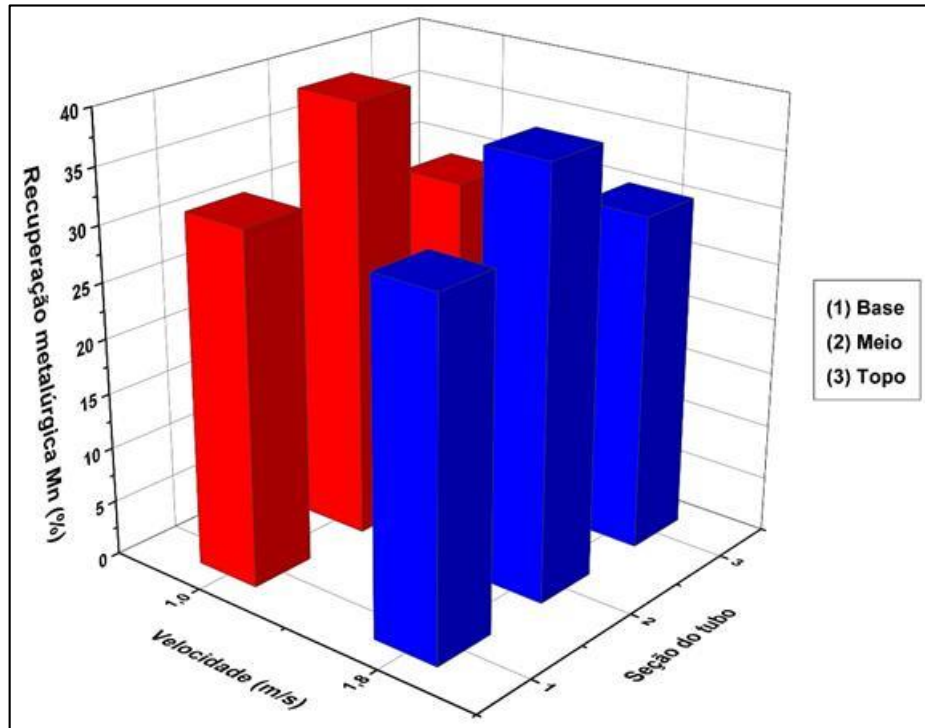
Fonte: Elaboração própria, 2020.

Figura 8 – Teores de manganês dos diferentes fluxos obtidos nos experimentos de transporte hidráulico ($C_{m/m} = 25,5\%$) nas velocidades de 2,0 m/s (c) e 1,5 m/s (d)



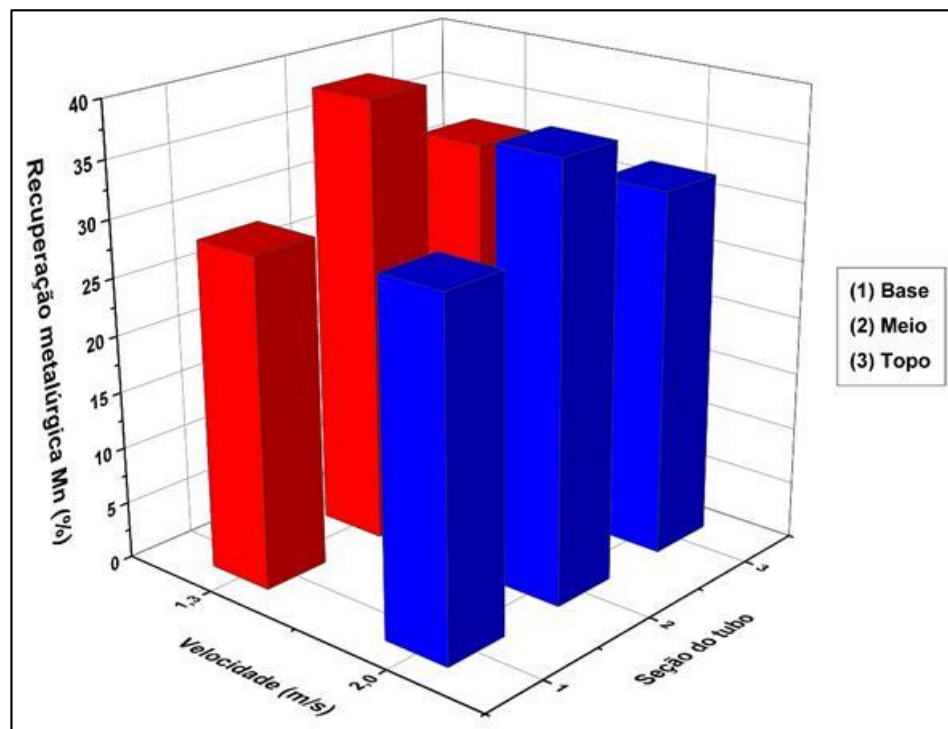
Fonte: Elaboração própria, 2020.

Gráfico 8 – Recuperação metalúrgica do manganês ($C_{m/m} = 10\%$) nas velocidades de 1,0 m/s (a) e 1,8 m/s nas diferentes seções do tubo



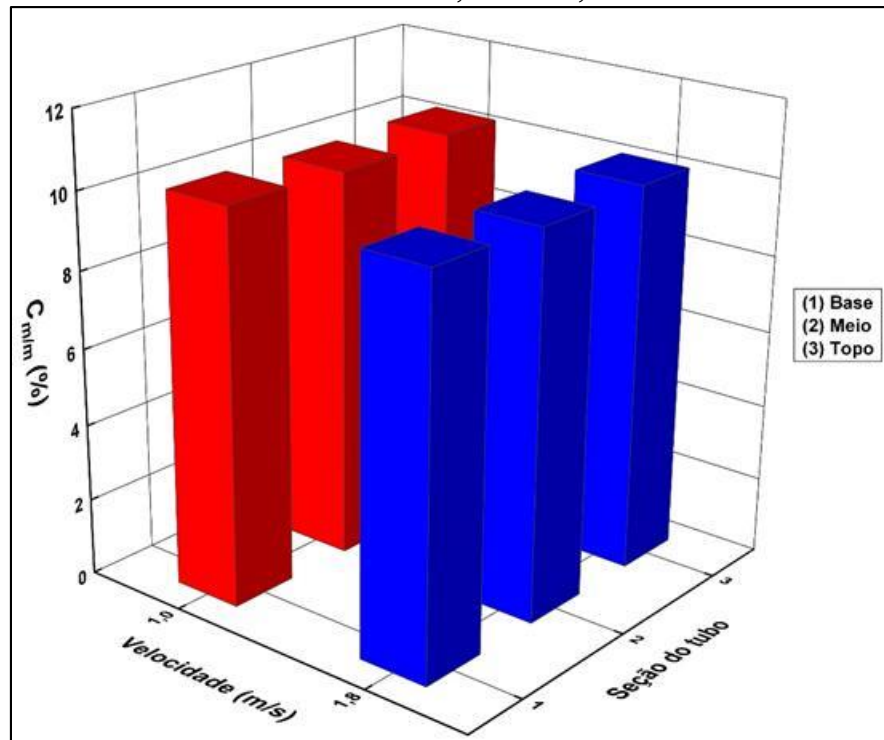
Fonte: Elaboração própria, 2020.

Gráfico 9 – Recuperação metalúrgica do manganês ($C_{m/m} = 25,5\%$) nas velocidades de 1,5 m/s e 2,0 m/s nas diferentes seções do tubo



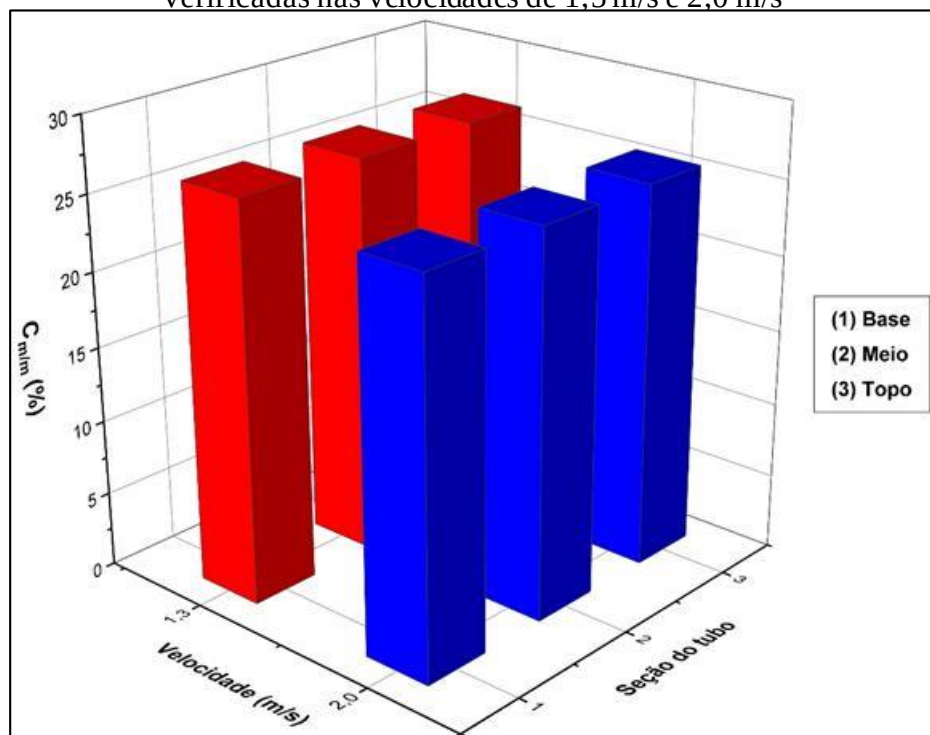
Fonte: Elaboração própria, 2020.

Gráfico 10 – Concentrações de sólidos nas diferentes seções do tubo, verificadas nas velocidades de 1,0 m/s e 1,8 m/s



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Gráfico 11 – Concentrações de sólidos nas diferentes seções do tubo, verificadas nas velocidades de 1,5 m/s e 2,0 m/s



5 CONCLUSÕES

Com base em todos os resultados obtidos é possível concluir que:

- O rejeito de manganês exibe massa específica de $3125,3 \text{ kg/m}^3$, área superficial específica de $1,53 \text{ m}^2/\text{g}$ e $d_{3,2} = 3,9 \text{ }\mu\text{m}$. Trata-se, portanto, de um material particulado com granulometria extremamente fina, não havendo assim segregação de partículas no interior dos dutos, sob qualquer condição de fluxo;
- Os reogramas obtidos na temperatura de 22°C exibiram características distintas: na concentração de 10% de sólidos, a polpa de manganês apresentou um comportamento ligeiramente dilatante e na concentração de 25,5% de sólidos revelou um comportamento pseudoplástico. A mudança de comportamento reológico deve-se ao aumento na concentração de sólidos. O modelo Lei da Potência ajustou de modo satisfatório os resultados experimentais nas duas concentrações supracitadas;
- Durante os experimentos de transporte hidráulico não se verificou a sedimentação das partículas nem tampouco a formação de leito estacionário ou móvel em nenhuma das condições experimentais investigadas;
- As polpas preparadas com rejeito de manganês nas concentrações de 10% e 25,5% de sólidos em massa se comportaram nos experimentos de transporte hidráulico como uma mistura pseudo-homogênea;
- O efeito da concentração de sólidos afeta a velocidade crítica de transição de regime, sendo que para polpa com 10% de sólidos em massa a velocidade de transição foi de $1,3 \text{ m/s}$, enquanto para 25,5% foi de $1,6 \text{ m/s}$;
- Para se avaliar o potencial de concentração do manganês no rejeito, através da segregação do material em dutos, faz-se necessário que partículas mais grossas sejam empregadas, provocando assim a formação de leito móvel na base dos mesmos, uma vez que o manganês, notoriamente apresenta maior teor em granulometrias mais grossas.

REFERÊNCIAS

- BROWN, N.P.; HEYWOOD, N.I. **Slurry Handling**: Design of solid-liquid systems; New York, Elsevier Handling and Processing of Solids Series, Elsevier Science Publishers, 680p., 1991.
- CHHABRA R.P.; RICHARDSON, J.F. **Non-Newtonian flow in the Process Industries**, 1.ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
- COX, R.G.; BRENNER, H. The Rheology of a suspension of particles in a Newtonian fluid; **Chemical Eng. Science**, v. 26, n. 1, p. 69-93, 1970.
- DIAB, A. *et al.* Rheological models for non-newtonian viscosity of modified asphalt binders and mastics. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 29, p. 105 – 112, 2020.
- DORON, P.; GRANICA, D.; BARNEA, D. Slurry Flow in Horizontal Pipes—Experimental and Modeling. **International Journal Multiphase Flow**, vol. 13, n. 4, p. 535-547, 1987.
- DURAND, R. The hydraulic transportation of coal and other materials in pipes, **Conf. of National Coal Board**, Londres, 1952.
- JACOBS, B.E.A. **Design of slurry transport systems**. Elsevier Science Publishers, BHR Group, 1991. 312 p.
- 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, 2001.
- MACOSKO, C;W. **Rheology**: Principles, measurements and Application, New York, Wiley-VCH Inc. 1993, 568p.
- MARTINS, S. A. **Comparativo entre sistemas de bombeamento de polpa de minério de ferro com diferentes granulometrias**. Programa de Graduação em Eng. Mecânica; Universidade Federal de Minas Gerais; Belo Horizonte, MG; 2014.
- MME - **Ministério de Minas e Energia**. Boletim do Setor Mineral, 2019, p. 4.
- PHILLIPS, W.M., DEUTSCH, S. Toward a constitutive equation for blood. **Biorheology**, v. 12, p. 383-389, 1975.
- SHAHEEN, E. Rheological studies of viscosity and pipeline flow of concentrated slurries. **Powder technology**, Elsevier, v. 5, ed. 4, p. 245-256, 1971.
- SHAHEEN, E. Rheological studies of viscosity and pipeline flow of concentrated slurries, **Powder technology**, Elsevier, p. 245-256, 1971.

SLATTER P.T. The laminar/turbulent transition prediction for non-Newtonian slurries. Proceedings of the International Conference “Problems in Fluid Mechanics and Hydrology” **Academy of Sciences of the Czech Republic**, Prague, p. 247-256, 1999.

SLATTER, P.T. Pipe flow of highly concentrates sludge. **Journal of Environmental Science and Health**, Part A:v. 43, n. 13, p. 1516-1520, 2008.

SLATTER, P.T., The rheological characterization of sludges. **Wat. Sci. Tech.**, v. 36, p. 9-18, 1997.

SOUZA PINTO, T. C; MORAES JUNIOR, D.; SLATTER, P.T.; LEAL FILHO, L.S. Modeling the critical velocity for heterogeneous flow of mineral slurries. **International Journal of Multiphase Flow**, 65, pp. 31-37, 2014.

SOUZA PINTO, T.C. *et al.* Modelling the critical velocity for heterogeneous flow of mineral slurries. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 65, pp. 31 – 37, 2014.

SOUZA PINTO, T.C., **Modelagem da velocidade crítica de transporte de polpas minerais contendo partículas grossas**. 2012. 191 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da USP - Universidade de São Paulo. Depto de Engenharia de Minas e Petróleo. São Paulo, 2012.

SOUZA, H.S. **Concentração do Rejeito de Manganês por Flotação**. 2014. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da USP - Universidade de São Paulo. Depto de Engenharia de Minas e Petróleo. São Paulo, 2014.

TURIAN, R.M. *et al.* Flow of concentrated non-Newtonian slurries: 1. Friction losses in laminar, turbulent and transition flow through straight pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 24, p. 222-242, 1998.

TURIAN, R.M. HSU, F.L.; MA, W. Estimation of the critical velocity in pipeline flow of slurries. **Powder Technology**, v. 51, n. 1, p. 35-47, 1987.

VALE (2020). **Conheça as minas do Sistema Centro-Oeste no Mato Grosso do Sul**. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/conheca-minas-sistema-centro-oeste-mato-grosso-sul.aspx>> Acesso em: 06 set. 2020.

WASP, E. J; SLATTER, P. **Deposition velocities for small particles in large pipes**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORT & SEDIMENTATION OF SOLIDS PARTICLES, 12th. Prague, Czech Republic, 2004.

WASP, E.J., KENNY, J.P., GANDHI, R.L. **Solid-liquid flow slurry pipeline transportation**. Series on Bulk Materials Handling, v. 1, n. 4, 3.ed. (1975/77). Trans Tech Publications, 1977, 224 p.

WHITEN, W.; STEFFENS, P.; HITCHENS, J.; **An examination of pulp viscosity in tubes at higher shear rates**. Minerals Engineering, v. 6, n. 4, p. 397-404, 1993.

WILSON, K.C. *et al.* **Slurry Transport Using Centrifugal Pumps**. 3 ed., New York, Springer Science+Business Media Inc, 2006, 432 p.

WILSON, K.C.; JUDGE, D.G. **New techniques for the scale-up pf pilot-plant results to coal slurry pipelines.** Proc. Int, Symp on Freight Pipelines, Univ. Pennsylvania, p. 1-29, 1976.

APÊNDICE

**APÊNDICE A - RESULTADOS REFERENTES À REOLOGIA DAS POLPAS DE
MANGANÊS**

Tabela 8 – Resultado dos experimentos de reologia com a polpa de manganês na concentração de 25,5 % de sólidos em massa

Taxa de Cisalhamento (s^{-1})	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (mPa.s)	Torque (mN.m)
604	8,0222	13,28	1,3485
588	7,8939	13,43	1,3269
571	7,748	13,558	1,3024
555	7,5567	13,612	1,2703
539	7,3417	13,626	1,2341
522	7,1248	13,636	1,1977
506	6,934	13,699	1,1656
490	6,7653	13,811	1,1372
474	6,6539	14,052	1,1185
457	6,5891	14,412	1,1076
441	6,5335	14,82	1,0983
425	6,4758	15,254	1,0886
408	6,4146	15,714	1,0783
392	6,3553	16,217	1,0683
376	6,2941	16,759	1,058
359	6,234	17,354	1,0479
343	6,1707	17,995	1,0373
327	6,1063	18,697	1,0264
310	6,0388	19,464	1,0151
294	5,9686	20,305	1,0033
278	5,8978	21,245	0,9914
261	5,8234	22,287	0,97889
245	5,7482	23,465	0,96626
229	5,6687	24,793	0,95288
212	5,5837	26,299	0,93859
196	5,4931	28,027	0,92337
180	5,3948	30,026	0,90685

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 9 – Resultado dos experimentos de reologia com a polpa de manganês na concentração de 25,5 % de sólidos em massa

Taxa de Cisalhamento (s^{-1})	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (mPa.s)	Torque (mN.m)
163	5,2952	32,417	0,89009
147	5,1893	35,296	0,8723
131	5,0781	38,854	0,85361
114	4,9575	43,345	0,83333
98	4,8264	49,226	0,8113
81,7	4,6808	57,277	0,78683
65,4	4,5151	69,041	0,75898
49,1	4,3209	88,05	0,72633
32,7	4,0759	124,46	
16,4	3,6995	225,24	

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 10 – Resultado dos experimentos de reologia com a polpa de manganês na concentração de 10 % de sólidos em massa

Taxa de Cisalhamento (s^{-1})	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (mPa.s)	Torque (mN.m)
604	3,1047	5,1394	0,52189
588	2,952	5,0223	0,49622
571	2,8439	4,9765	0,47805
555	2,7486	4,9512	0,46202
539	2,6443	4,9077	0,4445
522	2,5328	4,8475	0,42575
506	2,41119	4,7651	0,40543
490	2,3115	4,7191	0,38856
474	2,2091	4,6653	0,37134
457	2,1048	4,604	0,35381
441	1,9943	4,5237	0,33524
425	1,8884	4,4481	0,31743
408	1,7974	4,403	0,30213
392	1,698	4,3329	0,28543
376	1,5961	4,2498	0,2683
359	1,4983	4,1707	0,25186
343	1,4146	4,1254	0,23779
327	1,3313	4,0763	0,22379
310	1,2376	3,9888	0,20803
294	1,1437	3,8908	0,19224
278	1,0556	3,8024	0,17744
261	0,9649	3,6928	0,1622
245	0,87974	3,5913	0,14788
229	0,7937	3,4713	0,13342
212	0,71188	3,3529	0,11966
196	0,6327	3,2282	0,10635
180	0,55907	3,1117	0,093978

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 11 – Resultado dos experimentos de reologia com a polpa de manganês na concentração de 10 % de sólidos em massa

Taxa de Cisalhamento (s^{-1})	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (mPa.s)	Torque (mN.m)
163	0,51257	3,138	0,086162
147	0,43362	2,9494	0,072891
131	0,36537	2,7956	0,061417
114	0,28202	2,4658	0,047407
98	0,23964	2,4442	0,040283
81,7	0,20461	2,5037	0,034394
65,4	0,1674	2,5598	0,02814
49,1	0,13046	2,6584	0,02193
32,7	0,095645	2,9205	0,016077
16,4	0,060067	3,6572	0,010097

Fonte: Elaboração própria, 2020.

**APÊNDICE B - BALANÇOS DE MASSA E METALÚRGICO DOS EXPERIMENTOS
DE CONCENTRAÇÃO DO REJEITO DE MANGANÊS EM UNIDADE DE
BOMBEAMENTO**

Tabela 12 – Resultados dos testes de concentração do rejeito de manganês em unidade de bombeamento ($v = 1,8 \text{ m/s}$)

Fluxos	$C_{m/m}$ (%)	Recuperação mássica (%)	Mn (%)	Recuperação Mn (%)
Alimentação	10,07	100	10,5	100
Base	10,10	31,45	10,5	31,45
Meio	10,03	38,24	10,5	38,24
Topo	10,10	30,31	10,5	30,31

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 13 – Resultados dos testes de concentração do rejeito de manganês em unidade de bombeamento ($v = 1,0 \text{ m/s}$)

Fluxos	$C_{m/m}$ (%)	Recuperação mássica (%)	Mn (%)	Recuperação Mn (%)
Alimentação	10,19	100	9,57	100
Base	10,22	31,80	9,57	31,80
Meio	10,14	39,17	9,59	39,26
Topo	10,23	29,03	9,54	28,94

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 14 – Resultados dos testes de concentração do rejeito de manganês em unidade de bombeamento ($v = 2,0$ m/s)

Fluxos	C_{m/m} (%)	Recuperação mássica (%)	Mn (%)	Recuperação Mn (%)
Alimentação	25,53	100	13,0	100
Base	25,56	30,23	13,1	30,47
Meio	25,53	37,59	13,0	37,60
Topo	25,51	32,18	12,9	31,93

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 15 – Resultados dos testes de concentração do rejeito de manganês em unidade de bombeamento ($v = 1,3$ m/s)

Fluxos	C_{m/m} (%)	Recuperação mássica (%)	Mn (%)	Recuperação Mn (%)
Alimentação	26,48	100	13,2	100
Base	26,49	28,63	13,3	28,87
Meio	26,49	39,11	13,1	38,84
Topo	26,46	32,26	13,2	32,29

Fonte: Elaboração própria, 2020.