

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Igor Moreira de Carvalho

**Proposta de um método para monitoramento e controle da perda de carga em
minerodutos com base em variáveis operacionais do processo: um estudo de caso**

Dissertação de Mestrado

Belo Horizonte
2023

Igor Moreira de Carvalho

Proposta de um método para monitoramento e controle da perda de carga em minerodutos com base em variáveis operacionais do processo: um estudo de caso

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Carlos Barreira Martinez
Coorientadora: Edna Maria de Faria Viana

Belo Horizonte
2023

C331p

Carvalho, Igor Moreira de.

Proposta de um método para monitoramento e controle da perda de carga em minerodutos com base em variáveis operacionais do processo [recurso eletrônico] : um estudo de caso/ Igor Moreira de Carvalho. - 2023. 1 recurso online (104 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Barreira Martinez.

Coorientadora: Edna Maria de Faria Viana.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 100-104.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Minerodutos - Teses. 3. Ferro - Minas e mineração - Teses. 4. Transporte de materiais - Teses.

I. Martinez, Carlos Barreira. II. Viana, Edna Maria de Faria.

III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.

IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

“PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DA PERDA DE CARGA EM MINERODUTOS COM BASE EM VARIÁVEIS OPERACIONAIS DO PROCESSO: UM ESTUDO DE CASO”

IGOR MOREIRA DE CARVALHO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Carlos Barreira Martinez (Orientador – Departamento de Engenharia Mecânica/UNIFEI), Dr. Eduardo Bauzer Medeiros (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) Dr. José Antônio Perrella Balestieri (Departamento de Química e Energia/UNESP) e Dr. Frederico Fábio Mauad (Departamento de Ciências da Engenharia Ambiental/USP), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Dissertação aprovada no dia 20 de outubro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Barreira Martinez, Usuário Externo**, em 25/10/2023, às 17:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Bauzer Medeiros, Professor do Magistério Superior**, em 30/10/2023, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Antônio Perrella Balestieri, Usuário Externo**, em 31/10/2023, às 14:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Fabio Mauad, Usuário Externo**, em 20/11/2023, às 15:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2733238** e o código CRC **360C791C**.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas e organizações que desempenharam um papel importante na realização deste trabalho e na minha jornada acadêmica.

Primeiramente, agradeço a Carlos Martinez e Edna por sua orientação valiosa ao longo deste processo de pesquisa. Seus conselhos foram fundamentais para a qualidade deste trabalho e meu crescimento como pesquisador.

Também quero agradecer à Samarco, assim como aos gestores Vitor Quites e Gabriela Matioli, pela colaboração e apoio na autorização para utilizar e divulgar os dados contidos neste trabalho.

À minha noiva Juli e ao meu amigo Rafael Teixeira, agradeço por seu apoio constante e pelo incentivo que me deram para cursar o mestrado.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) pela oportunidade de realizar este mestrado.

Resumo

O transporte de minério por meio de minerodutos tem se tornado uma opção viável para as empresas mineradoras devido às grandes distâncias envolvidas nas etapas do processo produtivo. Comparado a outras modalidades de transporte, como ferrovias e rodovias, o transporte por dutos apresenta vantagens significativas, como baixo custo operacional, fornecimento contínuo, segurança e baixo impacto ambiental. No contexto brasileiro, o país destaca-se como um dos principais usuários dessa modalidade de transporte, possuindo aproximadamente 36,7% da extensão total de minerodutos no mundo, com capacidade para transportar até 75 milhões de toneladas de minério anualmente. A Samarco Mineração S.A. foi pioneira na adoção do transporte de polpa de minério por meio de minerodutos no Brasil, operando três minerodutos, cada um com aproximadamente 400 km de extensão. Devido à alta demanda de transporte do minério proveniente de sua mina Germano, a empresa utiliza o mineroduto 2 em sua capacidade máxima, registrando uma taxa de utilização de 99,7% em 2022. Diante dessa elevada demanda, é essencial compreender todas as variáveis que afetam a capacidade de bombeamento do mineroduto. Ao longo do tempo de operação de um duto, é possível que ocorra o acúmulo de material e alterações na rugosidade das paredes internas. Isso acarreta em variações no diâmetro da tubulação, resultando em um aumento na perda de carga e uma redução na eficiência de bombeamento. Portanto, torna-se fundamental monitorar e controlar a perda de carga para operar o mineroduto de maneira mais eficiente. Atualmente, os modelos de predição de perda de carga são amplamente utilizados no estágio de projeto e construção de minerodutos, porém, apresentam limitações quando se consideram as importantes variáveis operacionais. Neste estudo, propõe-se um modelo para o monitoramento e controle da perda de carga. Para tal, o mineroduto 2 da Samarco foi selecionado como estudo de caso, onde foram coletados dados operacionais a cada 2 horas ao longo de um período de 7 meses. Por meio da correlação, verificou-se que a vazão é a variável operacional que mais impacta na perda de carga. Dessa forma, ao estabelecer uma equação de regressão linear com base na vazão, tornou-se possível comparar o modelo proposto com a perda de carga real. À medida que as curvas geradas por ambas as equações se distanciavam, supôs-se que houvesse deposição de material na linha. Posteriormente, foram realizadas limpezas de forma corretiva com a passagem dos PIGs. A efetividade da limpeza pôde ser evidenciada com o acréscimo da vazão em 11,98 m³/h logo após a passagem do PIG, resultando em um ganho pontual de produção de 13.299 tms. Adicionalmente, foram analisadas as velocidades críticas de bombeamento em relação à variação da concentração da polpa e seu impacto na perda de carga, permitindo, assim, a determinação de parâmetros para o controle preventivo da perda de carga.

Palavras-chave: mineroduto; bombeamento de polpa de minério; perda de carga.

Abstract

The transportation of ore through slurry pipelines has become a viable option for mining companies due to the large distances involved in the stages of the production process. Compared to other modes of transport, like railroads and highways, slurry pipeline transport has significant advantages, such as: low operating costs, continuous supply, safety, and low environmental impact. Brazil stands out as one of the leading users of this type of transportation, withstanding approximately 36.7% of the total length of slurry pipelines in the world and capacity to transport up to 75 million tons of ore annually. Samarco Mineração S.A. is a pioneer in ore transportation via slurry pipelines in Brazil, operating three pipelines, each approximately 400 km long. Due to the high demand for ore transportation from mines in Germano, the company uses pipeline 2 at its maximum capacity, registering a utilization rate of 99.7% in 2022. It is essential to understand all the variables that affect the pumping capacity of the pipeline. Over the course of a slurry pipeline's operation, there is a tendency for material to accumulate at its internal ends, resulting in a reduction in the pipeline's diameter, an increase of energy loss and a decrease of flow efficiency. Therefore, it is crucial to monitor and control energy loss to operate slurry pipelines more efficiently. Nowadays, energy loss prediction models are widely used in slurry pipeline design and construction. However, there are limitations when considering important operational variables. This study proposes the development of an energy loss prediction model using linear regression, based on data from the operation of an existing slurry pipeline. In this study, a model is proposed for monitoring and controlling energy loss. To achieve this, Samarco's Pipeline 2 was selected as a case study, where operational data were collected every 2 hours over a period of 7 months. Through correlation analysis, it was determined that the flow rate is the operational variable that most impacts energy loss. Thus, by establishing a linear regression equation based on the flow rate, it became possible to compare the proposed model with the actual energy loss. As the curves generated by both equations diverged, it was hypothesized that material deposition occurred in the line. Subsequently, corrective cleanings were performed with the passage of PIGs. The effectiveness of the cleaning was evidenced by the increase in flow rate by 11.98 m³/h immediately after the PIG passage, resulting in a punctual production gain of 13,299 tms. Additionally, critical pumping velocities were analyzed in relation to the variation in pulp concentration and its impact on energy loss, thereby allowing the determination of parameters for the preventive control of energy loss.

Keywords: pipeline; ore slurry pumping; energy loss.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Malha de minerodutos no mundo	15
Figura 2 – Rota dos minerodutos da Samarco S. A	17
Figura 3 – Perfil com as elevações dos três minerodutos	18
Figura 4 – Fluxo operacional esquemático do mineroduto 2	19
Figura 5 – Gradiente de velocidade	25
Figura 6 – Modelos reológicos para diferentes fluidos	26
Figura 7 – Fluidos de Bingham	27
Figura 8 – Esquema do reômetro	28
Figura 9 – Curva obtida por meio do reômetro	29
Figura 10 – Esquema de peneiramento de diferentes malhas	30
Figura 11 – Teste da velocidade de sedimentação em provetas	32
Figura 12 – Teste de penetração realizado nas amostras de polpa	34
Figura 13 – Verificação de entupimentos no tubo de acrílico	35
Figura 14 – Esquema do ângulo de repouso	35
Figura 15 – Diagrama de Pourbaix para o ferro	37
Figura 16 – Regimes de escoamento	38
Figura 17 – Tipos de fluxo	39
Figura 18 – Variação do fluxo em função da densidade e tamanho de partículas	41
Figura 19 – Velocidades de transição e deposição do fluido	42
Figura 20 – FL para material uniforme	43
Figura 21 – FL para material não uniforme	43
Figura 22 – Representação do fluxo de transição	45
Figura 23 – Equação de Bernoulli	46
Figura 24 – Relação entre C/C_A na tubulação	48
Figura 25 – Ábaco de Moody	52
Figura 26 – Tipos de superfície: geométrica, real e efetiva	54
Figura 27 – Exemplos de sensores apalpadores na obtenção do perfil de rugosidade	54
Figura 28 – Bomba Geho	56
Figura 29 – Funcionamento do diafragma	56
Figura 30 – Faixa de operação do mineroduto 2	57
Figura 31 – Ilustração de um PIG removendo sedimentos	58
Figura 32 – PIG de Espuma	59
Figura 33 – PIG de mandril	59
Figura 34 – Estrutura PIG de espuma	60
Figura 35 – Estrutura PIG de mandril	61
Figura 36 – PIG Geométrico	62
Figura 37 – Funcionamento dos sensores ultrassônicos	63

Figura 38 – Funcionamento dos sensores magnéticos PIG MFL	63
Figura 39 – PIG MFL	64
Figura 40 – Reparo por encamisamento	66
Figura 41 – Esquema do reparo por encamisamento	66
Figura 42 – Densímetro radioativo	67
Figura 43 – Medidores de pressão instalados na tubulação	69
Figura 44 – Estação de monitoramento de pressão (PMS)	69
Figura 45 – Ro-Tap para peneiramento	73
Figura 46 – Reômetro R\ S Plus Brookfield	74
Figura 47 – pHmetro	75
Figura 48 – Perfil do mineroduto com os trechos	76
Figura 49 – Curva granulométrica da polpa	79
Figura 50 – Análise granulométrica +200#	80
Figura 51 – Análise granulométrica -325#	80
Figura 52 – Variação da massa específica do sólido	81
Figura 53 – Variação da massa específica da polpa	81
Figura 54 – Variação da concentração	82
Figura 55 – Variação da viscosidade	82
Figura 56 – Variação do pH	83
Figura 57 – Perda de Carga EB4 - EB5	84
Figura 58 – Perda de Carga EB4 - PMS5	84
Figura 59 – Perda de carga em função da equação de Darcy-Colebrook EB4 - PMS5	86
Figura 60 – Perda de carga em função da equação de Darcy-Colebrook EB4 - EB5	86
Figura 61 – Variação da rugosidade na seção 1.	87
Figura 62 – Variação do diâmetro interno na seção 1.	87
Figura 63 – Análise de correlação	88
Figura 64 – Perda de carga em função da regressão linear EB4 - EB5	89
Figura 65 – Controle da perda de carga	90
Figura 66 – Incremento da vazão após o PIG	90
Figura 67 – Análise estatística para incremento da vazão após o PIG	91
Figura 68 – Amostra coletada para concentração abaixo de 69% de sólidos	92
Figura 69 – Amostra coletada para concentração acima de 69% de sólidos	93
Figura 70 – Faixa de 65% a 67% de Sólidos	94
Figura 71 – Faixa de 67% a 69% de Sólidos	94
Figura 72 – Faixa de 69% a 71% de Sólidos	95
Figura 73 – Amostra coletada para duas bombas em operação	96
Figura 74 – Análise para duas bombas em operação	96

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais minerodutos do Brasil	16
Tabela 2 – Equipamentos do fluxo operacional	20
Tabela 3 – Abertura de telas normalizadas	31
Tabela 4 – Valores de singularidades K	53
Tabela 5 – Rugosidade dos materiais	55
Tabela 6 – Estrutura do PIG de espuma	60
Tabela 7 – Estrutura do PIG de mandril	61
Tabela 8 – Estrutura do PIG de geométrico	62
Tabela 9 – Estrutura do PIG de MFL	64
Tabela 10 – Tipos de <i>Smart PIG's</i> conforme a necessidade de inspeção.	65
Tabela 11 – Perda de carga média dos trechos da seção1.	85
Tabela 12 – Tabela de correlação.	88

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	Application Programming Interface
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
D	Diâmetro característico
EB	Estação de Bombeamento
EV	Estação de Válvulas
ISO	Organização Internacional para Padronização
MFL	Magnetic Flux Leakage
NRe	Número de Reynolds
PIG	Pipeline Inspection Gauge
PMS	Pipeline Management System
Pa	Pascal
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
TMFL	Transverse Magnetic Flux Leakage
UT	Ultrasonic Testing
Vd	Velocidade de Deposição
Vt	Velocidade de Transição
cP	Pentipoise
kgf	Quilograma-força
mca	Metros de Coluna de Água
mcf	Metros de Coluna de Fluido
mcp	Metros de Coluna de Polpa
m ³	Metros Cúbicos
s	Segundo
tms	Toneladas Métricas Seca

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO E HIPÓTESE	22
2.1	Objetivo principal	22
2.2	Objetivos secundários	22
2.3	Hipótese	22
3	REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1	Característica da Polpa	23
3.1.1	Concentração de sólidos	23
3.1.2	Massa específica	24
3.1.3	Reologia	24
3.1.4	Granulometria	29
3.1.5	Compactação da polpa	31
3.1.5.1	Teste da velocidade de sedimentação	32
3.1.5.2	Teste de penetração	33
3.1.5.3	Teste do Ângulo de repouso	34
3.1.6	Corrosão	35
3.2	Características do Fluxo	37
3.2.1	Regimes de escoamento	37
3.2.2	Tipos de fluxo	39
3.2.3	Velocidade limite de transporte	41
3.2.3.1	Velocidade crítica de deposição	42
3.2.3.2	Velocidade crítica de transição	44
3.3	Perda de Carga	46
3.3.1	Perda de carga por fluxo heterogêneo	47
3.3.2	Perda de carga linear em tubulação	50
3.3.3	Perda de carga localizada	52
3.4	Rugosidade	53
3.5	Bombas de deslocamento positivo	55
3.6	Equipamento de inspeção interna PIG	58
3.7	Sistemas de instrumentação de minerodutos	67
3.7.1	Densímetros	67
3.7.2	Medidores de vazão	68
3.7.3	Medidores de pressão	68
4	MATERIAIS E MÉTODOS	71

4.1	Projeto conceitual	71
4.2	Propriedades da polpa	72
4.2.1	Distribuição granulométrica	72
4.2.2	Avaliação da Viscosidade	73
4.2.3	Avaliação da concentração	74
4.2.4	Aferição do pH	75
4.3	Determinação da perda de carga	75
4.4	Determinação da velocidade crítica	77
5	RESULTADOS	78
5.1	Análise da polpa	78
5.2	Análise da Perda de Carga	83
5.3	Análise da velocidade	92
6	CONCLUSÃO	98
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	99
	Referências	100

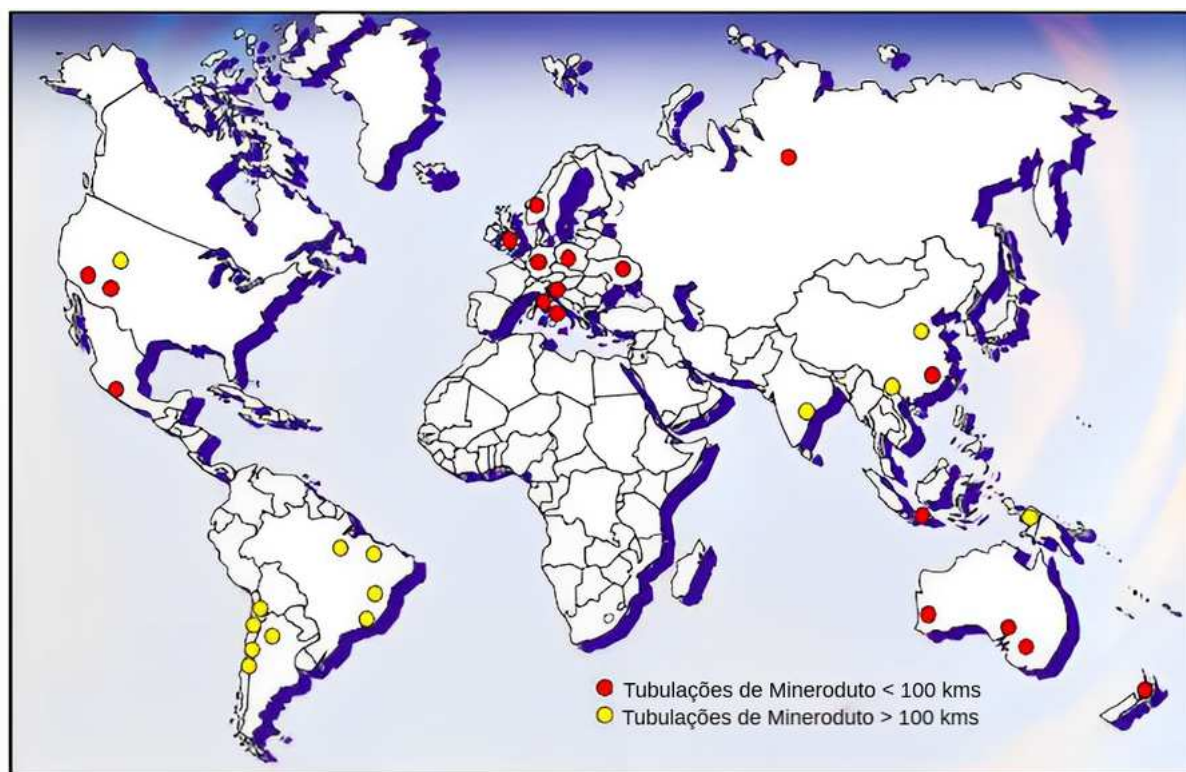
1 INTRODUÇÃO

Atualmente, na mineração, grande parte das áreas de lavra estão situadas em locais distantes das plantas de beneficiamento e dos portos de exportação do minério, resultando em um custo elevado no transporte do produto até esses pontos. Nesse sentido, no esforço de aumentar a competitividade, as empresas buscam realizar essa atividade de forma mais econômica e eficiente por meio da diversificação do modal de transporte.

O transporte de polpa de minério via mineroduto é uma alternativa considerável por apresentar uma série de vantagens quando comparadas aos demais modais para longas distâncias (Fabro *et al.*, 2014). Após a instalação dos dutos, o custo variável é relativamente baixo e a demanda de produção normalmente é constante, promovendo maior confiabilidade operacional e menor interferência por fatores externos (Machado; Campos; Ferreira, 2005). Além disso, deve-se levar em consideração a redução do risco de acidentes e impactos ambientais, uma vez que o material bombeado é considerado como inerte e não perigoso pelos critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (Gomes, 2012).

O uso do modal dutoviário teve início na América do Norte, por volta de 1860, e atualmente, é empregado ao nível mundial. Em sua maioria são destinados ao transporte de polpa de minério, de óleo e de gás (Chaves, 2012b). Como pode ser observado na Figura 1, existem minerodutos espalhados por grande parte dos continentes, correspondendo a uma extensão considerável, de cerca de 6.538 km, com representação de 36,7% apenas no Brasil (Brum, 2017).

Figura 1 – Malha de minerodutos no mundo



Fonte: adaptado de GEHO PUMPS (2011).

De acordo com Brum (2017), o Brasil tem capacidade de transportar cerca de 75 milhões de toneladas de minério por ano através de minerodutos com uma malha de mais de 2.400 km de extensão. Esses sistemas trabalham com os mais diversos tipos de minerais, como: concentrado de minério de ferro, bauxita, fosfato, cobre e carvão (Chaves, 2012b). Na Tabela 1, são apresentados os principais minerodutos do Brasil, o mineral constituinte da polpa, a capacidade de produção anual, bem como a extensão, o diâmetro do duto e o início de sua operação.

Tabela 1 – Principais minerodutos do Brasil

Empresa	Mineral	Capacidade (Milhões tms/ano)	Extensão [km]	Diâmetro nominal [in]	Início da operação
Hydro	Bauxita	13,2	244	24	2006
Anglo Minas-Rio	Ferro	24,5	522	24 e 26	2014
Samarco Linha 1	Ferro	15,5	398	18, 20 e 22	1977
Samarco Linha 2	Ferro	8,5	400	16 e 14	2008
Samarco Linha 3	Ferro	23	400	20 e 22	2014
Vale – Pico - VG	Ferro	7,5	5	12	2009
ValeFert(Fosfertil)	Fosfato	2	120	9	1978
ValeFert(Goiasfertil)	Fosfato	0,9	14	6	1981
Imerys RCC	Caulim	1,2	159	14	2002
Imerys PPSA	Caulim	1,3	180	10	1996

Adaptado de Torres et al. (2015).

Conforme apresentado na tabela acima, a Samarco Mineração S.A possui três linhas de minerodutos para bombeamento de polpa de minério de ferro concentrado. Cada uma com aproximadamente 400 km de extensão, construídas em uma faixa de servidão com 35 metros de largura, percorrendo em torno de 25 cidades desde a sua área de extração, localizada em Mariana (MG), e a usina de pelotização e o porto, localizados em Anchieta (ES), conforme a Figura 2, AUSENCO (2012). Essas linhas representam 49% da extensão total dos minerodutos do Brasil.

Figura 2 – Rota dos minerodutos da Samarco S. A

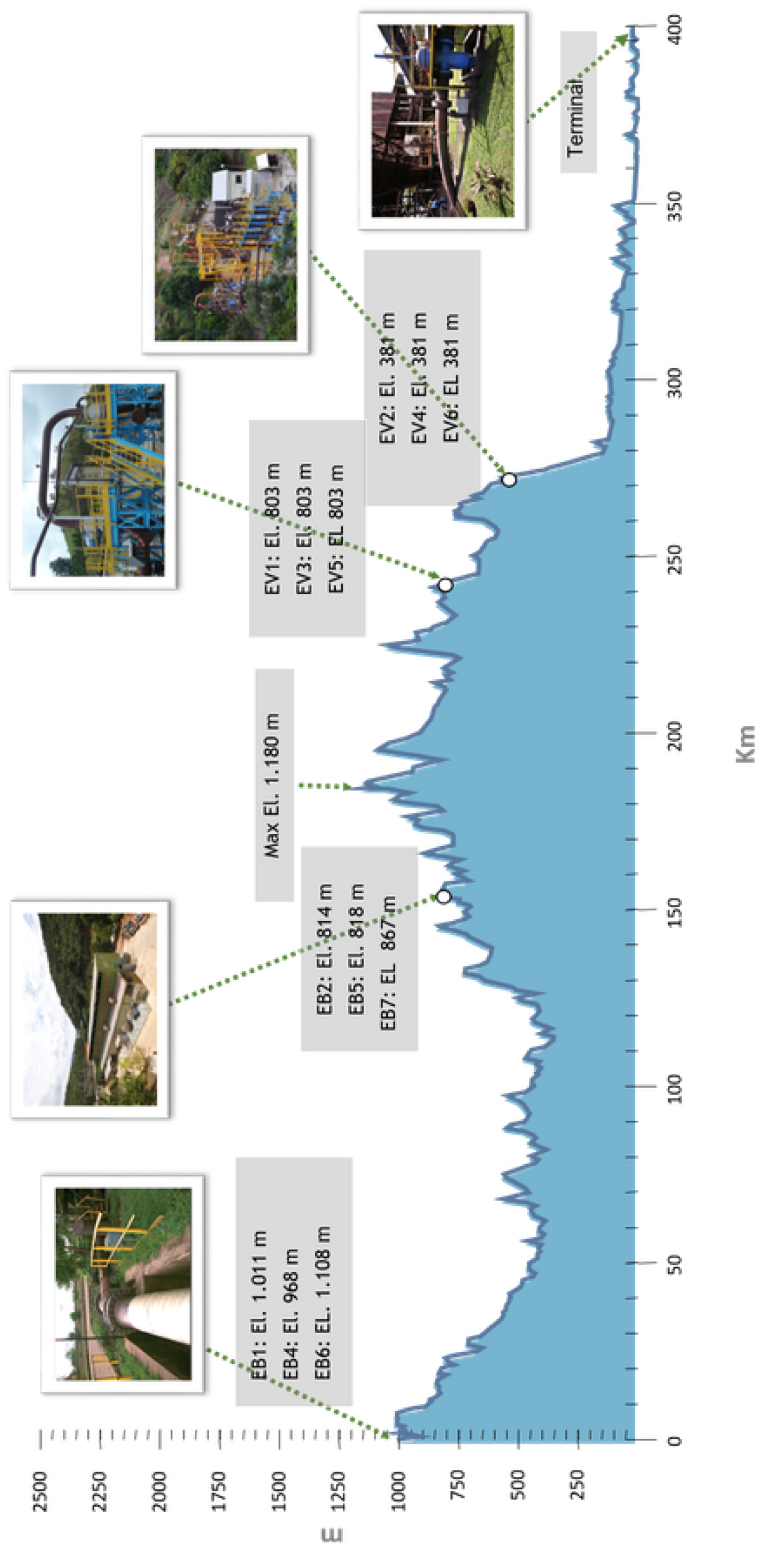


Fonte: SAMARCO MINERAÇÃO (2013).

A fim de promover o deslocamento adequado da polpa de minério, são usadas duas estações de bombeamento (EBs) para cada um dos minerodutos. Essas estações são responsáveis por impulsionar a polpa através do mineroduto, garantindo sua chegada segura e eficiente ao destino final no terminal. A primeira estação está localizada em Germano, entre as cidades de Ouro Preto (MG) e Mariana (MG), onde estão instaladas as plantas de beneficiamento do minério. Já a segunda estação está situada na cidade de Matipó (MG), cuja função é promover a força necessária para que a polpa atinja o ponto máximo da elevação do mineroduto, que é de 1.180 metros.

A empresa opera duas estações de válvulas (EVs) para controlar a pressão estática e dinâmica ao longo da linha de transporte. Tais estações estão localizadas nas localidades de Guaçuí (ES) e Alegre (ES), e são responsáveis por regular a pressão ao longo da linha, a fim de garantir o fluxo constante e seguro da polpa de minério (AUSENCO PSI, 2012). A Figura 3 apresenta uma ilustração detalhada do sistema em questão.

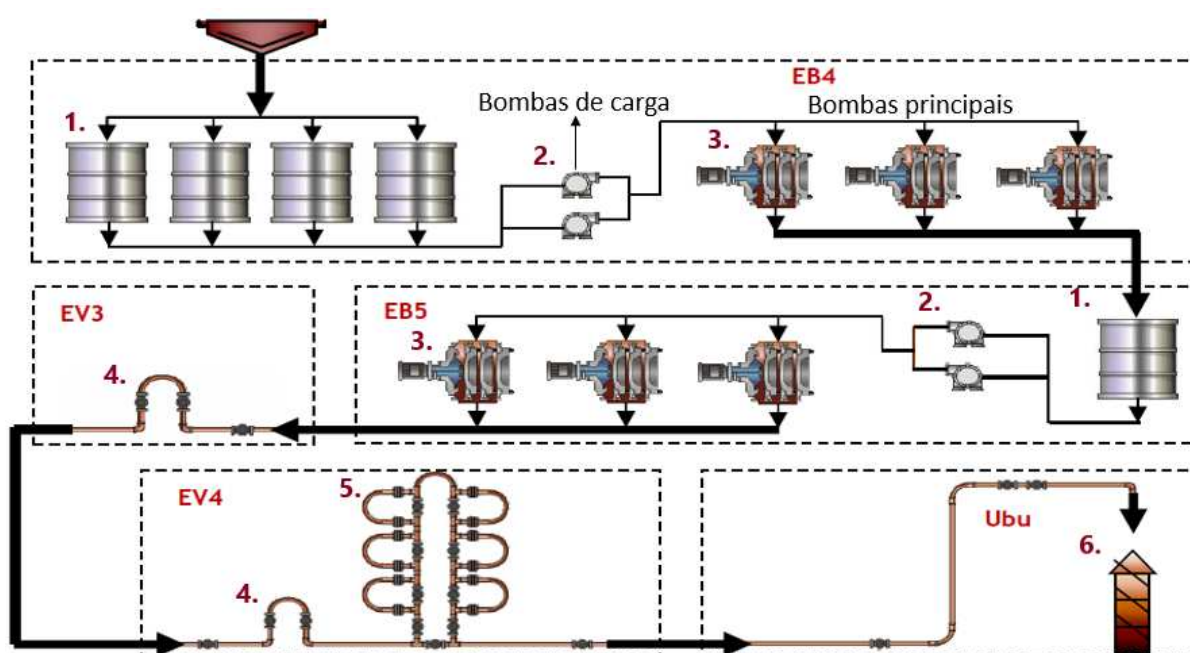
Figura 3 – Perfil com as elevações dos três minerodutos



Fonte: SAMARCO MINERAÇÃO (2013).

Nesta pesquisa será apresentado um estudo de caso do mineroduto 2 da Samarco que teve sua operação iniciada em 2008, com capacidade de bombeamento de 8,5 Mtms/ano. A tubulação deste mineroduto apresenta composição de aço carbono e atende às especificações da norma API 5L X70, seu diâmetro varia de 355,6 mm (14") a 406,4 mm (16") e opera com velocidade média de 1,5 m/s, dependendo do número de bombas em operação (Mattioli, 2016). Na Figura 4, pode-se observar o fluxo operacional esquemático do mineroduto 2, composto por duas estações de bombeamento EB4 e EB5, e duas estações de válvulas EV3 e EV4.

Figura 4 – Fluxo operacional esquemático do mineroduto 2



Fonte: SAMARCO MINERAÇÃO (2013).

A Tabela 2 lista os principais equipamentos contidos no fluxo operacional.

Tabela 2 – Equipamentos do fluxo operacional

Itens	Descrição
1	Tanques de estocagem
2	Bombas centrífugas de carga
3	Bombas de deslocamento positivo
4	Válvulas de controle
5	Loop com redução de diâmetro interno
6	Torre gravimétrica

Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo é iniciado nos tanques de estocagem em EB4, cada um com capacidade de 3.110 m³ e agitadores de 148 kW, onde a polpa é estocada e agitada, impedindo a sedimentação das partículas sólidas no fundo do tanque. Esse sistema possui fonte ininterrupta de energia: em caso de falha no abastecimento na planta, geradores de emergência são acionados imediatamente. Nos casos de manutenção ou falhas nos agitadores, o tanque é drenado completamente.

Após os tanques, a polpa passa por uma das bombas centrífugas que são instaladas a montante das bombas principais; para fornecer a pressão mínima de sucção acima da altura da coluna do fluido disponível nos tanques. Uma das bombas é usada paralelamente para redundância e manobras de processo, cada uma das bombas demanda uma potência de aproximadamente 220 kW. Em seguida, a polpa é bombeada para a tubulação, impulsionadas por três bombas principais da marca Geho (1840 kW), de deslocamento positivo, que são instaladas em série. Cada uma com capacidade de 338 m³/h e uma pressão na descarga da estação de bombas de 155 kgf/cm², (Vidal, 2011).

Na sequência, percorridos 153 km de tubulação, a polpa chega nos tanques da segunda estação de bombeamento, EB5 em Matipó. Esta estação é um espelho da EB4, mas conta com apenas um tanque de armazenamento. Existe a opção de operar com o mineroduto interligado, ou seja, a tubulação que chega em EB5 é ligada diretamente na sucção das bombas principais, não utilizando, portanto, o tanque para estoque de material. No entanto, essa prática normalmente não é utilizada no mineroduto 2 uma vez que o sistema fica dependente do bom funcionamento de ambas as estações, (AUSENCO PSI, 2012; Mattioli, 2016).

Com esse sistema em operação, o mineroduto 2 é o gargalo do processo produtivo da Samarco. Sua capacidade de bombeamento é inferior à alimentação de minério transferida da usina de beneficiamento 3, o que exige a máxima capacidade de utilização, com uma

taxa de 99,7% de utilização. O sistema de bombeamento é sempre contínuo, no momento em que o mineroduto não está bombeando polpa, bombeia água para impulsionar a polpa que está na linha. Isso pode ocorrer em casos de parada de manutenção na usina ou quando opera com vazão inferior à capacidade mínima de bombeamento do mineroduto.

Tendo em vista a alta demanda de produção e taxa de utilização, faz-se necessário conhecer os parâmetros que impactam diretamente na capacidade de transporte do sistema. O estudo e o monitoramento da perda de carga, conforme as condições de escoamento, velocidade de bombeamento e concentração da polpa, podem apresentar comportamentos distintos que interferem nas condições de operação do mineroduto (Martins, 2014). Uma vez que a perda de carga ocorre parcialmente em função do contato das partículas de minério com a parede da tubulação, cuja consequência é a dissipação da energia de bombeamento da polpa. Essa perda resulta na queda de pressão ao longo do escoamento, na redução da capacidade de bombeamento do mineroduto e na perda de produção (Madagascar, 2014).

Este trabalho está dividido em 6 capítulos: o primeiro e o segundo contemplam uma introdução e o objetivo da pesquisa. O terceiro aborda a história dos minerodutos e, suas características como tipos de fluxos, velocidades e características físicas da polpa, além de, formas de determinar a perda de carga, e os equipamentos utilizados em mineroduto. O quarto capítulo trata da metodologia do estudo e testes realizados. Por fim, são apresentadas as análises da propriedade da polpa, da perda de carga e da velocidade de deposição, propondo um novo modelo de predição de perda de carga considerando as variáveis operacionais do mineroduto 2 da Samarco.

2 OBJETIVO E HIPÓTESE

Desenvolver um método para monitoramento e controle da perda de carga no mineroduto 2 da Samarco, considerando as principais variáveis do processo e suas características físicas. Identificar os fatores que levam a um aumento na perda de carga propondo a implementação de medidas preventivas e corretivas para controlá-los.

2.1 Objetivo principal

Apresentar a proposta de método para monitoramento e controle da perda de carga em minerodutos, e propor medidas preventivas e corretivas para controlá-los.

2.2 Objetivos secundários

Identificar por meio de correlação quais características físicas influenciam diretamente na perda de carga do mineroduto.

Desenvolver um modelo utilizando regressão linear para monitoramento da perda de carga.

Implementar medidas corretivas para controlar a perda de carga quando identificada, como ações de limpeza da tubulação com PIG's.

Avaliar a eficácia do método proposto durante 5 meses, considerando diferentes cenários operacionais e condições do mineroduto.

2.3 Hipótese

Acredita-se que a perda de carga em minerodutos possa ser monitorada eficazmente por meio do controle da vazão.

3 REVISÃO DE LITERATURA

O transporte de minério é uma atividade essencial na indústria mineral, e o uso de minerodutos tem sido uma opção cada vez mais utilizada devido a suas vantagens em relação a outros meios de transporte. No entanto, para garantir a eficiência do transporte, é necessário considerar diversos aspectos relacionados às características da polpa de minério e do fluxo, bem como as perdas de carga e o uso de equipamentos adequados.

Nesse contexto, a revisão bibliográfica proposta tem como objetivo apresentar as principais teorias relacionadas aos temas de minerodutos; características da polpa de minério; características do fluxo; perda de carga e equipamentos utilizados em minerodutos. Serão abordados estudos sobre as propriedades físicas da polpa de minério; os efeitos dos fluxos e velocidades de bombeamento no deslocamento da polpa; os diferentes tipos de perdas de carga e como minimizá-las. Por fim, serão apresentados alguns instrumentos utilizados em minerodutos e suas funções.

3.1 Característica da Polpa

A compreensão das características da polpa de minério de ferro é de suma importância para garantir um bom desempenho do mineroduto. Diversos aspectos devem ser levados em consideração, como a concentração da polpa, a massa específica, a granulometria e as propriedades reológicas. Esses fatores podem exercer influência significativa tanto na eficiência do bombeamento quanto na perda de carga do sistema. Também, é de crucial importância exercer um controle adequado do pH a fim de mitigar o aumento da corrosão e da rugosidade, as quais podem impactar tanto na integridade do duto quanto na perda de carga. Além disso, a análise da compactação da polpa e do ângulo de repouso pode ser indicativa da possibilidade de ocorrência de entupimentos no sistema. Tais características desempenham um papel essencial para assegurar o funcionamento adequado e eficiente do mineroduto.

3.1.1 Concentração de sólidos

Segundo Abulnaga (2021), a polpa pode ser definida essencialmente como uma mistura de sólidos e líquidos, ou seja, um fluido, geralmente água, que transporta partículas sólidas granulares em suspensão. Dessa forma, são analisados dois parâmetros para se definir a concentração da polpa: concentração em massa (C_m) e concentração em volume (C_v).

A concentração de sólidos em massa (C_m) da polpa é dada pela seguinte equação:

$$C_m = \frac{\text{Massa Sólida}}{\text{Massa Mistura}} = \frac{\rho_s \text{Vol}_s}{\rho_s \text{Vol}_s + \rho_l \text{Vol}_l} \quad (3.1)$$

No qual:

C_m = concentração de sólidos em peso (%);

Vol_l = volume do líquido (m^3);

Vol_s = volume do sólido (m^3);

ρ_s = massa específica do sólido (kg/m^3);

ρ_l = massa específica do líquido (kg/m^3).

Já a concentração volumétrica:

$$C_v = \frac{\text{Volume de Sólidos}}{\text{Volume da Mistura}} = \frac{\text{Vol}_s}{\text{Vol}_s + \text{Vol}_l} \quad (3.2)$$

No qual:

C_v = concentração de sólidos em volume (%);

Vol_l = volume do líquido (m^3);

Vol_s = volume do sólido (m^3).

3.1.2 Massa específica

Para calcular a massa específica da polpa, considerando a água como fluido, utiliza-se a equação:

$$\rho_u = 1 + (\rho_s - 1) \cdot C_v \quad (3.3)$$

Onde:

ρ_u = massa específica da polpa (kg/m^3);

ρ_s = massa específica do sólido (kg/m^3).

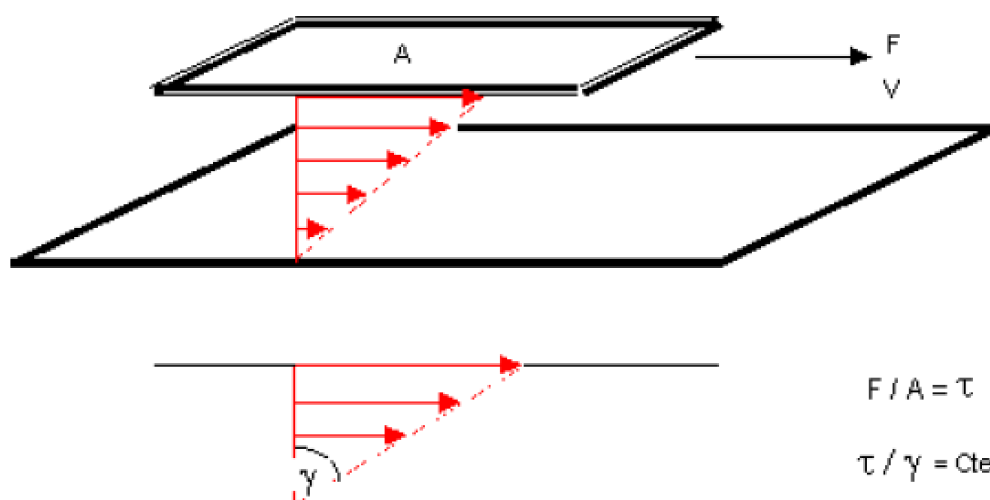
3.1.3 Reologia

A Reologia é o estudo do escoamento e da deformação de materiais submetidos a tensões (Machado, 2002). Por meio de experimentos, ela determina características como velocidade angular, torque, ângulo de deflexão e tempo, que possam ser transformadas em unidades de viscosidade e a tensão de cisalhamento (Castro, 2011; Barnes; Hutton; Water, 1993). Este conceito é abordado pelo modelo de placas de Newton.

Conforme a Figura 5, uma camada de fluxo é posicionada entre duas placas paralelas — uma fixa e a outra em movimento — situada sobre o fluxo sofrendo ação de uma força paralela à placa (Vidal, 2011). A relação entre a força paralela (F) e a área da placa (A) é definida como tensão de cisalhamento (τ), e pode ser expressa pela equação 3.4.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

Figura 5 – Gradiente de velocidade



Fonte: AUSENCOPSI (2007).

À medida que a placa superior é afastada do eixo y , diminui-se a distribuição de cisalhamento da camada de fluido entre as placas, produzindo assim a taxa de cisalhamento, equação 3.5.

$$\gamma = \frac{dV}{dY} \quad (3.5)$$

Aumentando a força, a taxa de cisalhamento também aumenta proporcionalmente, gerando uma relação direta entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento (γ) nominada de viscosidade (μ), equação 3.6.

$$\frac{\tau_1}{\gamma_1} = \frac{\tau_2}{\gamma_2} = \frac{\tau_3}{\gamma_3} = CTE = \nu \quad (3.6)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa ou dinas/cm²);

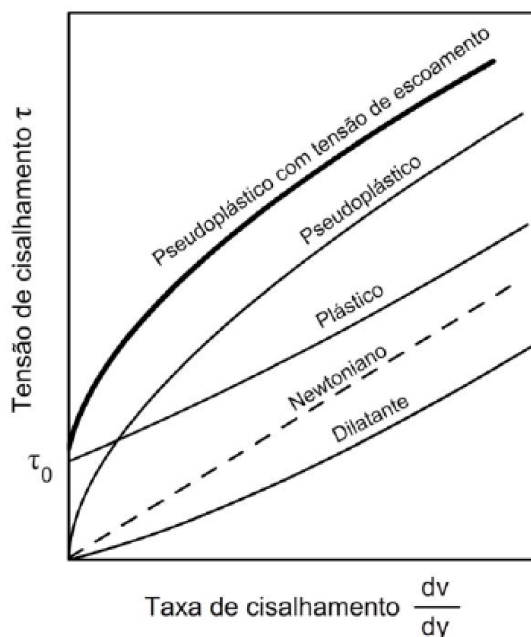
ν = viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s ou cP);

γ = taxa de cisalhamento (1/s).

O modelo de Newton tem como característica a viscosidade de cisalhamento constante, que representa a maioria dos fluidos puros, como a água, denominados de lineares ou “fluidos newtonianos”. Em contrapartida, os demais fluidos não lineares com viscosidade aparente não constante são chamados de “fluidos não Newtonianos” (Barnes; Hutton; Water, 1993).

Segundo Chaves (2012a), as polpas se comportam como fluidos não newtonianos e exigem outros parâmetros para caracterizar seu comportamento, podendo ser assimilada a um modelo conhecido como “Fluido de Bingham” ou fluido viscoplástico. A Figura 6 mostra um diagrama da tensão de cisalhamento em relação à taxa de cisalhamento para vários tipos de fluidos estudados na reologia.

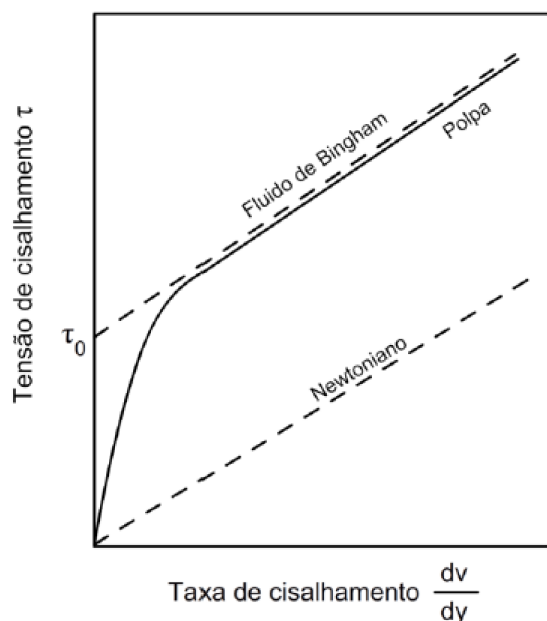
Figura 6 – Modelos reológicos para diferentes fluidos



Fonte: CHAVES (2012).

O fluido de Bingham precisa ser cisalhado até um determinado valor limite para começar a escoar e se comportar como fluido newtoniano. Essa tensão de escoamento representa o esforço mínimo que deve ser exercido para iniciar o deslocamento do fluido. A Figura 7 permite avaliar o valor da tensão de escoamento, sofrendo esforço mínimo para iniciar o deslocamento, e a inclinação da reta que corresponde à viscosidade (Bingham, 1922).

Figura 7 – Fluidos de Bingham



Fonte: CHAVES (2012).

A equação reológica para o comportamento do plástico de (Bingham, 1922) é descrita pela equação 3.7.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \times \dot{\gamma} \quad (3.7)$$

Onde:

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial (Pa);

η_p = viscosidade plástica (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (1/s).

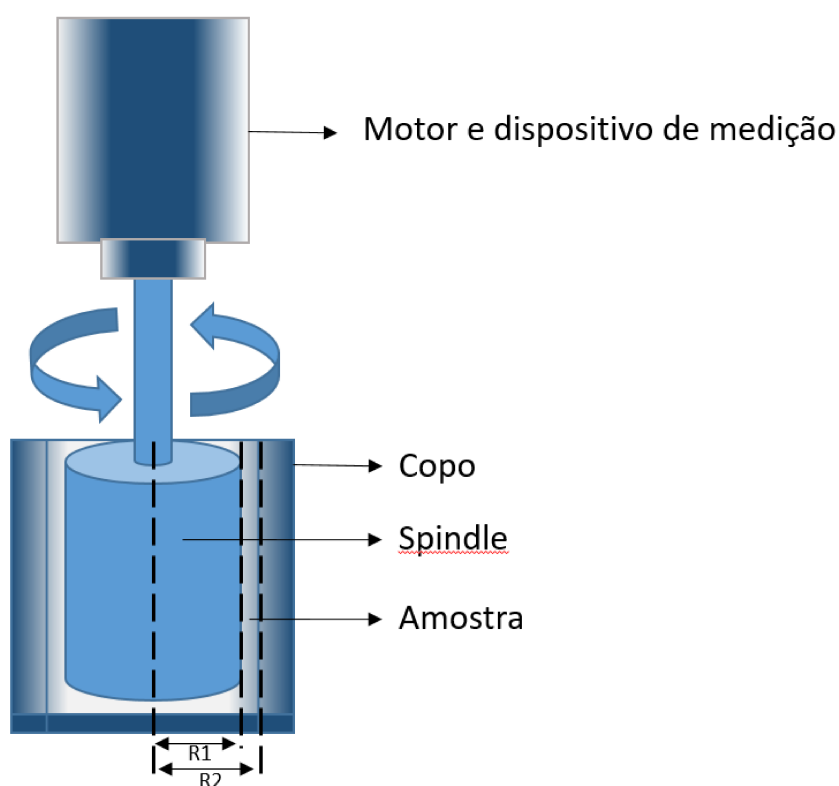
Para determinar os parâmetros reológicas da polpa, tendo em vista as distintas características de cada material e composição, um equipamento chamado reômetro é utilizado, Figura 8. O instrumento possibilita medir a tensão de cisalhamento que deve ser realizada para suportar uma determinada taxa de deformação do fluido (Nascimento, 2008).

O funcionamento do reômetro, para determinação da reologia da polpa de minério dá-se a partir da aplicação de uma força de cisalhamento controlada em uma amostra. A amostra da polpa em uma temperatura constante e controlada é colocada dentro do copo do reômetro até o limite indicado em sua superfície e posteriormente acoplada ao spindle, como pode ser visto na Figura 8 (Palacios, 2014).

Durante o teste, o reômetro mede a tensão de cisalhamento gerada pela rotação do *spindle* em contato com a polpa. Com essas informações, é possível calcular a viscosidade da polpa de minério em diferentes taxas de cisalhamento e entender como ela se comporta em diferentes condições de fluxo (Burdukova *et al.*, 2008).

O conhecimento da reologia da polpa é fundamental para elaboração dos projetos e operação dos minerodutos. Esse parâmetro permite operar de forma mais eficiente minimizando riscos de entupimento e incrustação do material nas paredes da tubulação (Leong, 2021).

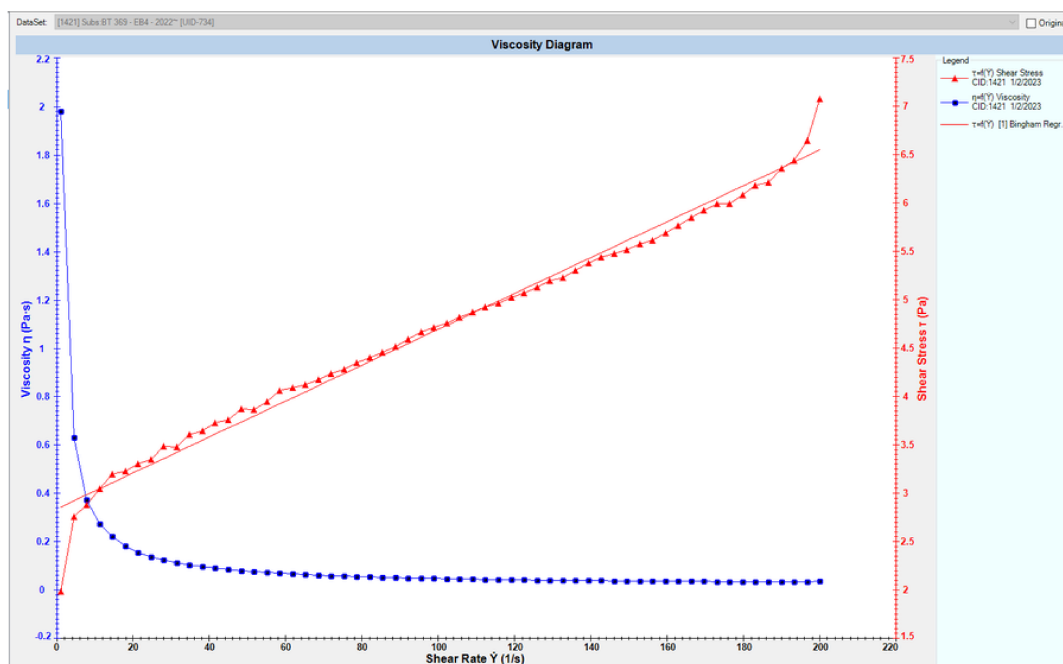
Figura 8 – Esquema do reômetro



Fonte: elaborado pelo autor.

Um exemplo real pode ser observado na Figura 9, em que o reômetro foi utilizado para obter uma curva de uma amostra de polpa de minério de ferro com concentração de 69,9% de sólidos.

Figura 9 – Curva obtida por meio do reômetro



Fonte: SAMARCO MINERAÇÃO (2023).

A curva vermelha da Figura 9 permite avaliar o início do cisalhamento até aproximadamente 12 segundos, em que a polpa começa a escoar e se comportar como fluido newtoniano.

3.1.4 Granulometria

O tamanho das partículas sólidas presentes na polpa é outro fator fundamental para entender o comportamento do material bombeado por meio de minerodutos, podendo ser determinada por meio da granulometria ou análise granulométrica.

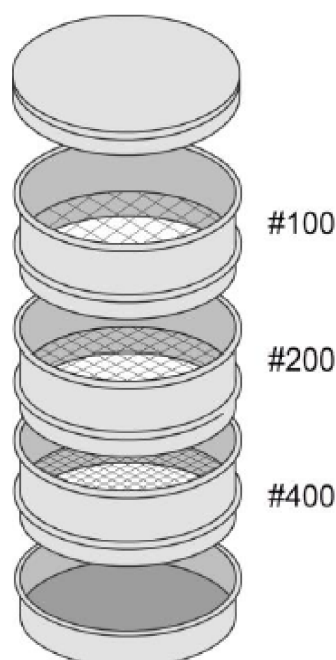
Existem diferentes métodos para realizar a análise granulométrica, como peneiramento, sedimentação e difração à laser (Gomes; Pereira; Peres, 2011). O método mais utilizado é o peneiramento, que consiste em passar a amostra do material por uma série de peneiras (malhas) com faixas granulométricas definidas. As peneiras são montadas em ordem decrescente de forma que a malha com abertura ou *mesh* maior fique no topo do conjunto e a menor na base. Dessa forma, o material relativamente mais grosso fica retido na peneira de acordo com sua abertura.

A norma ABNT NBR ISO 3310-1:2018 define as características técnicas de peneiras de ensaio, como dimensões, aberturas, materiais e tolerâncias utilizadas na análise granulométrica de materiais. A norma também estabelece os procedimentos para calibração e verificação dessas peneiras, garantindo a precisão e a confiabilidade da análise granulométrica de materiais (ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas,

2018).

Na Figura 10, é possível observar um exemplo de esquema de montagem das peneiras, que possuem encaixes para empilhamento, de modo a evitar a fuga de material nas bordas.

Figura 10 – Esquema de peneiramento de diferentes malhas



Fonte: CHAVES (2012).

Na execução do peneiramento, o conjunto de peneiras é fixado a um equipamento vibratório denominado agitador, que vibra em um tempo determinado até que todo o material seja separado e classificado de acordo com cada malha. Essa atividade, pode ser feita de forma úmida ou seca, dependendo do material e do equipamento. No peneiramento à úmido, utiliza-se a água com o intuito de facilitar a passagem dos finos através das malhas, (Luz; Sampaio; França, 2010).

Dado a separação, supõe-se que o tamanho representativo de cada fração é a média geométrica das aberturas de peneiras extremas. Dessa forma, o tamanho determinado será denominado diâmetro nominal da partícula, (Vidal, 2011).

Para padronizar o tamanho da abertura das malhas (mesh) é comumente utilizada a escala de Tyler, (Tabela 3 que relaciona o número de malhas representado ao número de aberturas de uma mesma dimensão contido num comprimento de 25,4 mm). Seguindo a escala ISO (*International Organization for Standardization*) adotou-se como abertura de referência (a_0) 1 mm, que corresponde a 18 malhas, e como razão de escala (r) $2=1,414$, (Luz; Sampaio; França, 2010).

Tabela 3 – Abertura de telas normalizadas

Tyles	Malha (mm)	Tyles	Malha (mm)
3,5	5,66	35	0,42
4	4,76	42	0,35
5	4	48	0,297
6	3,36	60	0,25
7	2,83	65	0,21
8	2,38	80	0,177
9	2	100	0,149
10	1,68	115	0,125
12	1,41	150	0,105
14	1,19	170	0,088
16	1	200	0,074
20	0,84	250	0,062
24	0,71	270	0,053
28	0,59	325	0,044
32	0,5	400	0,037

Fonte: ABNT NBR ISO 3310-1:2018 (2018).

A presença de certa quantidade de partículas finas, em uma polpa com alta concentração de sólidos, é desejável devido à formação de suspensão homogênea estável, que ajuda a manter as partículas mais grossas em suspensão. De modo geral, quando as partículas são muito finas, a polpa costuma ter comportamento homogêneo e, caso apresente maior quantidade de partículas grossas, o fluido tende a ser heterogêneo (Vidal, 2011).

Além disso, diâmetros característicos são usados para representar mensurações da granulometria. Esses são tipicamente D_{50} , D_{85} e D_{90} , o que significa que D_{90} é o diâmetro associado a 90 % do material que trespassa através ou na respectiva malha. (Martins, 2014).

3.1.5 Compactação da polpa

A polpa de minério de ferro consiste essencialmente em duas fases distintas: água e minério. Ao longo do tempo, na ausência de movimentação da referida polpa, observa-

se uma propensão à sedimentação da fração composta pelo minério. No contexto do transporte por mineroduto, a sedimentação do material pode resultar em obstrução da tubulação, caracterizada pelo entupimento da linha, ou seja, formação de “plugs”, devido à compactação da polpa (Cooke; Spearing; Gericke, 1992).

Com o intuito de prevenir a formação de *plugs* durante interrupções do bombeamento, é fundamental controlar a reologia da polpa mediante a adição de reagentes com capacidade de coagulação. Essa intervenção propicia uma sedimentação mais suave, favorecendo a presença de água entre os coágulos ou facilitando a passagem da água e a suspensão do material (Carvalho, 2003).

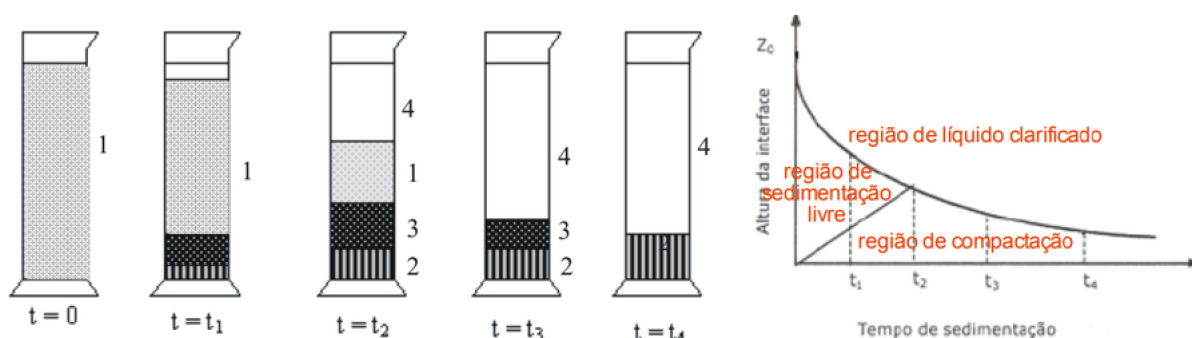
Dentre os reagentes comumente empregados para o controle da reologia em minerodutos, destaca-se a cal. O controle da dosagem desse componente pode ser realizada pelo monitoramento do pH. Adicionalmente, a avaliação da eficácia da coagulação do material pode ser conduzida por meio de procedimentos de rotina, como testes de sedimentação, penetração e ângulo de repouso.

3.1.5.1 Teste da velocidade de sedimentação

O ensaio da velocidade de sedimentação da polpa constitui um método empregado para analisar o comportamento da suspensão do minério, proporcionando a determinação da taxa na qual as partículas sólidas, sujeitas às forças gravitacionais, sedimentam-se na polpa ao longo do tempo.

Para execução desse teste são normalmente utilizadas provetas ou cilindros graduados, nos quais a polpa é transferida e permanece por um período determinado. Durante esse intervalo, as partículas de maior densidade se movimentam em direção ao fundo do recipiente devido à ação da gravidade (Sampaio; França; Braga, 2007).

Figura 11 – Teste da velocidade de sedimentação em provetas



Fonte: Adaptado de SAMPAIO et al., (2007).

Como pode ser observado na Figura 11, a zona 4 é identificada como o líquido já clarificado. A zona 1 corresponde às partículas em sedimentação livre, enquanto a zona 2 representa as partículas que já sedimentaram, encontrando-se em regime de compressão.

Este método fornece uma abordagem sistemática para compreender a dinâmica da sedimentação na polpa, sendo essencial para a avaliação do comportamento reológico e potenciais desafios operacionais, especialmente em aplicações como o transporte mineral em minerodutos (Sampaio; França; Braga, 2007).

O cálculo dessa velocidade pode ser realizada por meio de um ensaio que utiliza a equação 3.8, durante o qual o volume da proveta relacionado ao nível da interface água x polpa é registrado ao longo do tempo até a compactação completa da polpa.

$$V = \frac{h_0 - h_e}{t_e - t_0} \quad (3.8)$$

Onde:

V = velocidade de deposição (mL/min);

h_0 = altura inicial da interface (mL);

h_e = altura no ponto de estabilidade da curva (mL);

t_0 = tempo inicial (min);

t_e = tempo no ponto de estabilidade da curva (min).

Outra forma de se determinar a velocidade de sedimentação é por meio do princípio da lei de Stokes, equação 3.9.

$$V = \frac{(\rho_s - \rho_f)gD}{18\eta} \quad (3.9)$$

Onde:

ρ_s = massa específica do sólido (kg/m³);

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

D = diâmetro (m);

η = viscosidade do fluido (Pa.s).

3.1.5.2 Teste de penetração

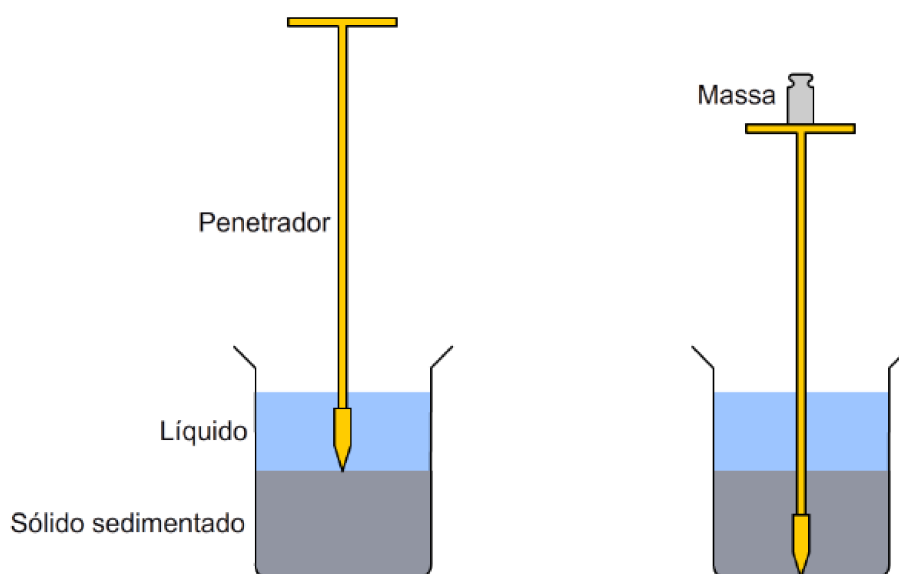
O teste de penetração da polpa de minério é uma importante ferramenta para a análise da viabilidade e da segurança do bombeamento da polpa. Seu objetivo é avaliar a resistência da polpa à compressão em condições similares às que ocorrem durante o bombeamento (Mamede; Galery; Peres, 2016).

O teste pode ser realizado em um equipamento denominado penetrômetro, composto por um sistema de contrapeso. Durante o ensaio a polpa deve ser transferida para um becker, até que ocupe aproximadamente 95% de seu volume, e permanece em repouso no

recipiente por 24 horas. Após esse período, uma interface sólido-líquido é formada devido à decantação do material (Bragança, 2008).

Para realizar o teste, a ponta do penetrômetro deve ser posicionada na interface sólido-líquido, próxima à parede do becker, como mostrado na Figura 12. Uma massa é colocada na ponta dos equipamentos para representar o atrito entre os componentes do dispositivo. Gradualmente, a massa é aumentada até que o peso seja suficiente para que a ponta do penetrômetro atinja o fundo do becker que contém o material a ser testado.

Figura 12 – Teste de penetração realizado nas amostras de polpa



Fonte: MARTINZ (2014).

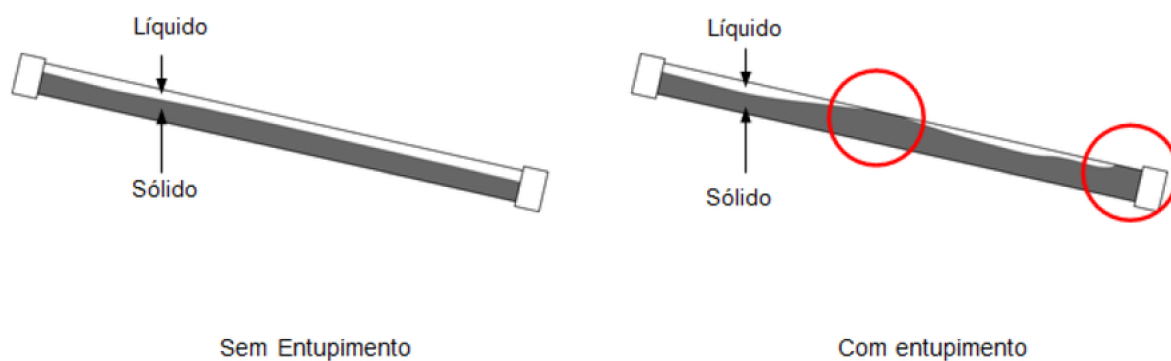
Na sequência, reposiciona-se a ponta do aparelho na interface sólido-líquido, em um ponto oposto ao da primeira medição. Cerca de 50% da massa acumulada na operação anterior é calculado para estimar o peso total necessário para atingir suavemente o fundo do becker em um único movimento. Com a massa calculada, o penetrômetro é solto, observando se ele atinge o fundo do becker. Se a ponta atingir o fundo de forma branda, o valor da massa é registrado. Caso contrário, um novo furo é feito em outra parte do becker, e o peso é ajustado conforme necessário para garantir que a ponta do penetrômetro colida levemente com o fundo do recipiente.

3.1.5.3 Teste do Ângulo de repouso

A análise do ângulo de repouso em minerodutos é uma ferramenta utilizada para analisar o comportamento da polpa dentro do tubo, permitindo avaliar a probabilidade de formação de entupimento (*plug*). O ângulo de repouso deve representar o ângulo máximo projetado para o mineroduto. O teste é realizado a partir de um tubo de acrílico fechado em

inclinação máxima do projeto do mineroduto em um plano horizontal, como demonstrado na Figura 13 (Bragança; Brandão, 2011).

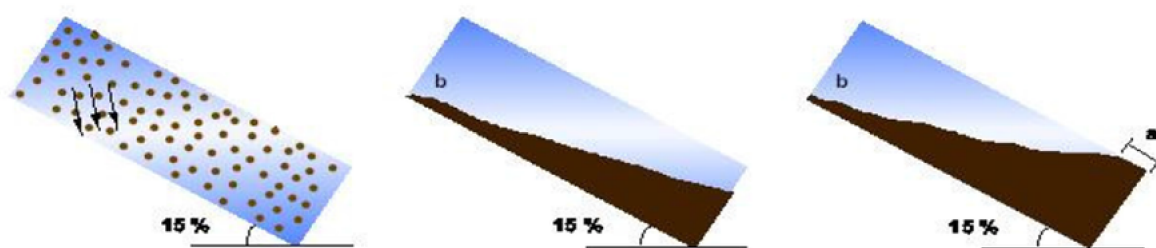
Figura 13 – Verificação de entupimentos no tubo de acrílico



Fonte: MARTINZ (2014).

Inicialmente, o tubo é preenchido e fechado com aproximadamente 90% do seu volume, deixando uma altura livre em relação ao topo de modo a formar uma bolha de ar para realização do teste. O tubo já com o material é agitado e após um tempo de sedimentação, a ocorrência de oclusão é verificada por meio de avaliação visual do acúmulo de polpa no fundo do tubo, conforme cota b da Figura 14. Em seguida, o tubo é levantado e posicionado na horizontal, verificando se a bolha de ar percorre todo o tubo, no sentido da direita para a esquerda. Caso a bolha “pare”, significa formação de *plug* neste ponto (medida da cota “a”). Dessa forma, é possível identificar preventivamente a probabilidade de formação de plug (Kumar; Gopaliya; Kaushal, 2019).

Figura 14 – Esquema do ângulo de repouso



Fonte: SAMARCO MINERAÇÃO (2023).

3.1.6 Corrosão

A corrosão é um processo de degradação de um material por meio de reações químicas ou eletroquímicas com o meio ambiente, podendo estar ou não associada a

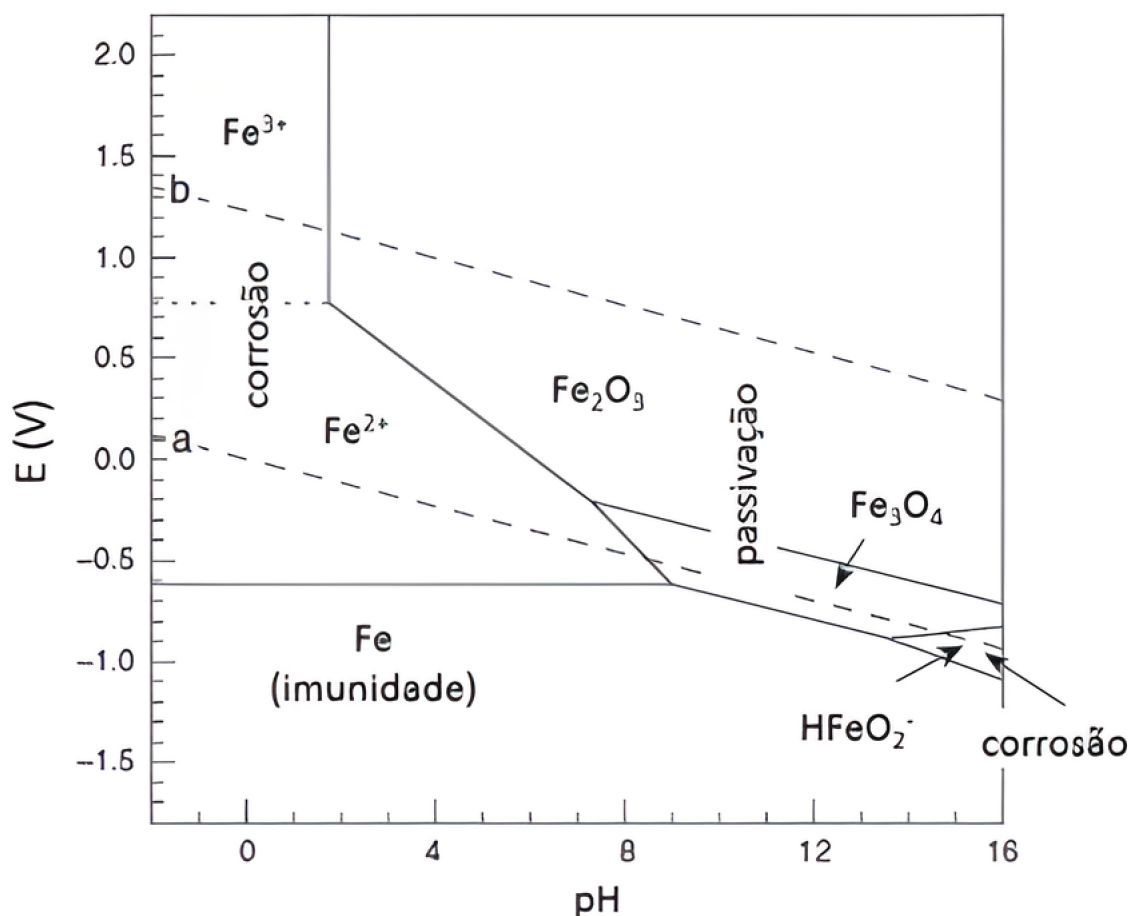
esforços mecânicos (Gentil, 2022). Em minerodutos, a corrosão interna representa riscos à segurança e à eficiência do transporte de minérios. Essa pode enfraquecer a integridade das tubulações, causando vazamentos e falhas na operação (Machado; Gomes, 2018). Além disso, também pode afetar a qualidade operacional devido ao aumento da rugosidade que promove maior atrito do fluido com as paredes do tubo, aumentando a resistência ao fluxo de polpa e à perda de carga no sistema (Magalhães, 2018).

O controle do pH da polpa transportada é uma técnica eficaz para minimizar esse desgaste no minerodutos. O pH indica a acidez ou a basicidade de uma solução, podendo ter impacto direto na corrosão de metais, já que em ambientes ácidos há a dissolução de metal no meio, e em ambientes alcalinos ocorre a formação de uma camada protetora que evita a transferência de elétrons (Uhlig; Revie, 2011).

Um importante instrumento para indicar a faixa de pH ideal para cada metal é o diagrama de Pourbaix (Figura 15). Por meio desse esquema, é possível visualizar as diversas fases e condições termodinâmicas em que um metal pode existir numa solução eletrolítica (Pourbaix, 1974). Essa ferramenta é essencial para prever a estabilidade de um metal em um ambiente específico, possibilitando ajustar o pH para às condições de cada metal.

Para algumas tubulações com composição de aço carbono da norma API 5LX70 a zona de passivação se encontra com o pH entre 11,3 e 11,8 (Mattioli, 2016). O controle efetivo do pH nessa faixa é essencial para manter a polpa na zona de passivação de acordo com o diagrama de Pourbaix. Essa zona resulta em uma camada protetora na superfície do aço, minimizando o risco de corrosão.

Figura 15 – Diagrama de Pourbaix para o ferro



Fonte: MCCAFFERTY (2010).

O controle do pH pode ser feito através da adição de reagentes químicos na polpa transportada, como ácido sulfúrico, cal ou hidróxido de cálcio. É importante ressaltar que a escolha dos reagentes químicos deve ser feita com base no tipo de minério e nas condições de transporte, para garantir a eficiência do controle de pH (Magalhães, 2018).

3.2 Características do Fluxo

3.2.1 Regimes de escoamento

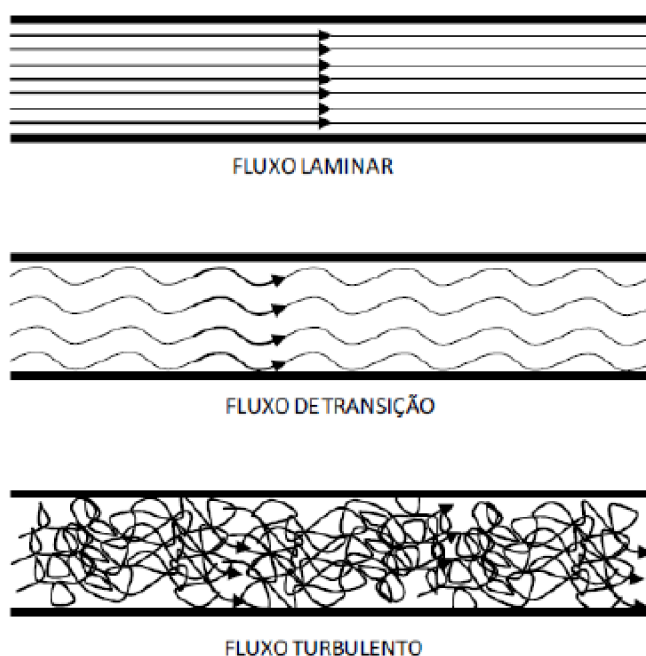
Os fluidos submetidos a diferentes condições de fluxo apresentam padrões de fluxo chamados regimes de escoamento, que podem ser classificados em quatro principais: laminar, transição, turbulento e crítico (Figura 16).

- **Regime Laminar:** Em bombeamentos de baixa velocidade e baixa viscosidade,

as partículas se deslocam paralelamente na mesma direção do fluxo médio, sem turbulência ou mistura entre elas.

- **Regime Transição:** Com o aumento da velocidade, as partículas começam a escoar no sentido do fluxo de forma desordenada. É uma fase de mudança entre o fluxo laminar e o turbulento.
- **Regime Turbulento:** Para altas velocidades de bombeamento, o fluxo apresenta componentes de velocidade em todas as direções do escoamento, o qual é desejado, pois favorece o fluxo homogêneo na linha (Gomes, 2012).

Figura 16 – Regimes de escoamento



Fonte: BRASS ENGINEERING (2008).

Cada regime de escoamento está correlacionado ao número de Reynolds (NRe), que é um número adimensional empregado para caracterizar o fluxo de um fluido (Reynolds, 1883). Esse expressa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas em um fluido em movimento (White, 2016). Os valores de NRe para cada regime de escoamento em um conduto forçado são:

- Regime Laminar: $NRe < 2300$;
- Regime de Transição: $2300 \leq NRe \leq 4000$;
- Regime Turbulento: $NRe > 4000$.

O número de Reynolds pode ser definido como:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_i}{\eta} \quad (3.10)$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

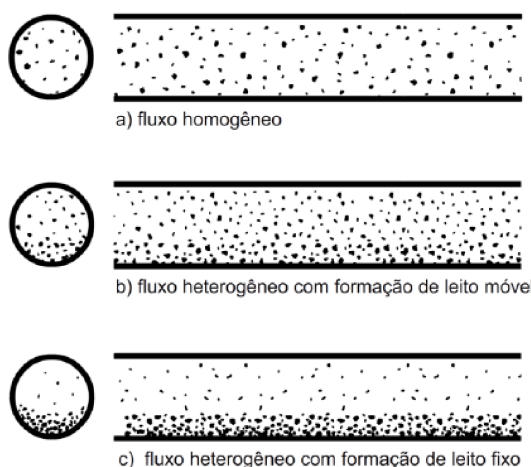
η = viscosidade dinâmica (Pa.s);

ρ = massa específica da polpa (kg/m³).

3.2.2 Tipos de fluxo

Para o transporte de polpa, é necessário que o escoamento tenha certo grau de turbulência, capaz de manter as partículas sólidas em suspensão. Dependendo do bombeamento, a turbulência pode apresentar diversos tipos de fluxos, como pode ser observado na Figura 17:

Figura 17 – Tipos de fluxo



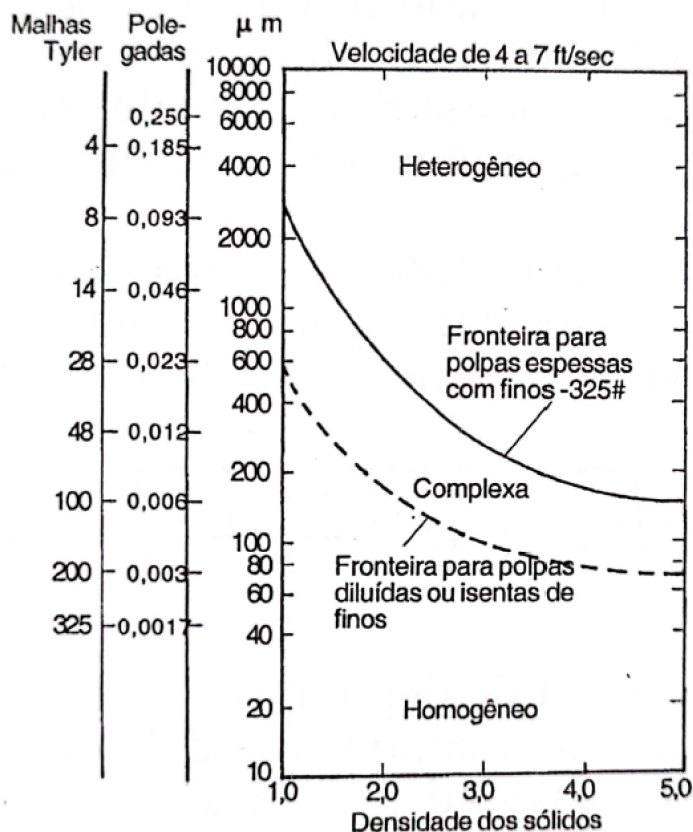
Fonte: Adaptado de CHAVES (2012).

- **Fluxo homogêneo:** As partículas são distribuídas de maneira uniforme por toda a seção da tubulação. Apresenta concentração de sólido constante e partículas com distribuição granulométrica uniforme, normalmente menores que 100# (0,149 mm) ou partículas de baixa densidade. Com esse tipo de fluxo é possível trabalhar com concentração de sólido alta, superior a 50%, e baixa velocidade de bombeamento, inferior a 1,8 m/s, promovendo redução no consumo de energia e desgaste de componentes (Chaves, 2012b).

- **Fluxo heterogêneo:** As partículas apresentam variação ao longo da tubulação, sendo possível observar maior concentração no fundo, decrescendo lentamente em direção ao topo. Apesar de estarem em suspensão, pode ocorrer deposição das partículas mais pesadas, possibilitando rolamento no interior da tubulação. Essa característica normalmente pode ser observada em polpa com sólidos mais grosseiros, até 10# (1,68 mm), ou com sólidos finos de alta densidade, como minério de ferro (Chaves, 2012b).
- **Fluxo de leito móvel:** Os sólidos depositados no fundo da tubulação permanecem em movimento por rolamento ou saltos, criando um leito móvel que acompanha o fluxo (Chaves, 2012b).
- **Fluxo com leito fixo:** Os sólidos depositados no fundo da tubulação deixam de se movimentar. Conforme o acúmulo de material ocorre restrição da seção útil possibilitando entupimentos (Chaves, 2012a).

Na Figura 18, a correlação entre a densidade (eixo x) e o tamanho das partículas presentes na polpa (eixo y) é apresentada analisando os fluxos homogêneos e heterogêneos. Observa-se que, na região de transição, as partículas finas formam uma polpa homogênea, capaz de manter as partículas grossas em suspensão. Nessa região, uma fronteira é estabelecida, permitindo distinguir o fluxo homogêneo do heterogêneo com base na granulometria das partículas.

Figura 18 – Variação do fluxo em função da densidade e tamanho de partículas



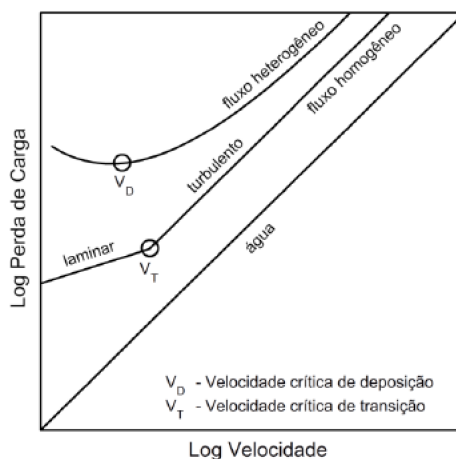
Fonte: CHAVES (2012).

3.2.3 Velocidade limite de transporte

O controle da velocidade de bombeamento da polpa é um fator fundamental para obter maior estabilidade, segurança e melhor desempenho operacional no transporte. A velocidade mínima com que o sistema pode operar, denominada velocidade limite de transporte, é a menor possível para transportar o concentrado, assegurando fluxo homogêneo e turbulento. Para isso, deve-se considerar duas velocidades do fluxo: a velocidade de deposição (V_d) e a velocidade de transição (V_t) (Figura 19).

De acordo com (Chaves, 2012a), a velocidade deve ser suficientemente grande para produzir a turbulência necessária para manter os sólidos em suspensão. Contudo, deve ser a menor possível para reduzir o atrito com as paredes do tubo e conseqüentemente reduzir a perda de carga.

Figura 19 – Velocidades de transição e deposição do fluido



Fonte: Adaptado de WASP et al. (1976).

Dependendo da granulometria das partículas, da reologia da mistura e do tipo de regime de fluxo (Laminar / Turbulento), uma dessas duas velocidades pode ser considerada velocidade crítica, (Vidal, 2011).

3.2.3.1 Velocidade crítica de deposição

A velocidade de deposição (V_D) é determinada pela velocidade mínima com que se inicia a formação de um leito depositado na parte inferior do duto, ou seja, a mínima para não existir risco de obstrução na tubulação.

Essa velocidade depende de diversos fatores como: granulometria das partículas, diâmetro da tubulação e concentração de sólidos (Trinca, 2017). Porém, existem equações que permitem estimar, com razoável aproximação o seu valor, sendo a mais clássica estabelecida por Durant (1952) (Chaves, 2012a).

$$V_D = F_L \sqrt{2gD \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}} \quad (3.11)$$

Onde:

F_L = parâmetro de sustentação dependente da granulometria e concentração.

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

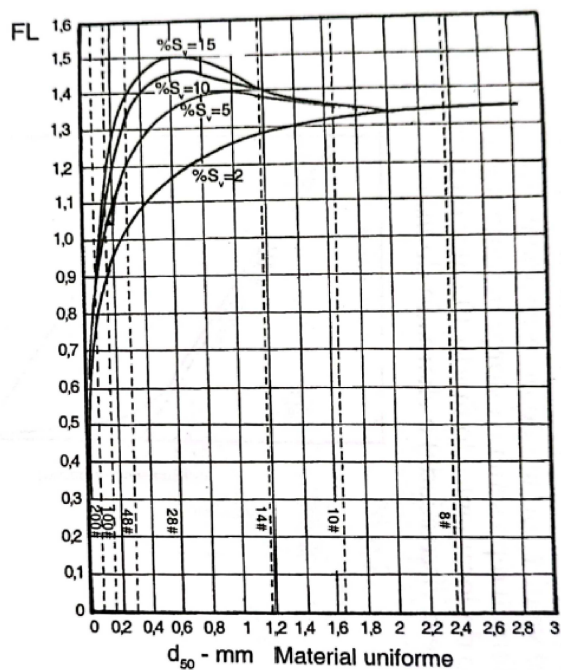
D = diâmetro da tubulação (m);

ρ_s = massa específica do sólido (kg/m^3);

ρ_l = massa específica do líquido (kg/m^3).

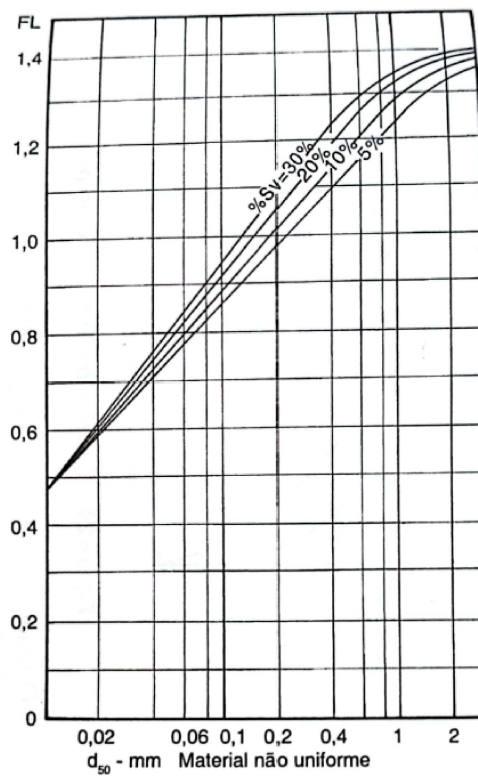
O Fator de fricção F_L definido por Durand baseia-se no tamanho do grão e na concentração volumétrica de sólidos (Abulnaga, 2021), podendo ser apresentado pelos seguintes ábacos, utilizados para materiais uniformes (Figura 20, e para materiais não uniformes (Figura 21):

Figura 20 – FL para material uniforme



Fonte: CHAVES (2012)

Figura 21 – FL para material não uniforme



Fonte: CHAVES (2012)

Utiliza-se o coeficiente de uniformidade (C_u), proposto por (Caputo, 1973), para determinar se a polpa em questão é uniforme ou não:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.12)$$

Onde:

$C_u =$

Para $C_u < 5$ - material muito uniforme;

Para $5 \leq C_u < 15$ - material uniforme;

Para $C_u \geq 15$ - material não uniforme;

d_{60} = 60% das partículas passantes na malha em questão;

d_{10} = 10% das partículas passantes na malha em questão.

Shiller e Herbich (1991) propuseram a seguinte modificação do fator FL, da equação de Durand para cálculo da velocidade limite de depósito (Gomes, 2012):

$$F_L = 1,3 C_v^{0,125} (1 - \exp(-6,9d_{50})) \quad (3.13)$$

Onde:

C_v = concentração em volume do concentrado (kg/m^3);

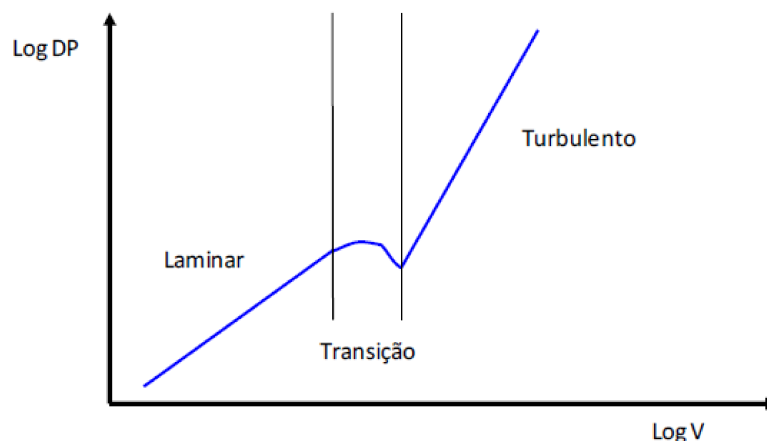
d_{50} = tamanho das partículas em percentual passante de 50% (mm).

Uma forma prática de determinar a velocidade de deposição é através da realização de constatação em plantas-pilotos ou circuito de teste (loop de teste). É construída a curva de perda de carga em relação à velocidade de bombeamento e associada à faixa de concentração (Vidal, 2011).

3.2.3.2 Velocidade crítica de transição

A velocidade de transição está relacionada à passagem do fluxo laminar para o turbulento influenciada pelas características reológicas da polpa e estruturais da tubulação, como mostrado na Figura 22 (Kundu; Cohen; Dowling, 2016).

Figura 22 – Representação do fluxo de transição



Fonte: BRASS ENGINEERING (2008).

Baseando-se no modelo reológico de Bingham, foi determinada por Slatter e Wasp (1976) uma correlação para calcular a velocidade de transição utilizando o número de Reynolds. Contudo, esse número não tem um valor constante capaz de determinar com precisão o tipo de regime. Portanto, para obter uma melhor aproximação, o valor de Reynolds crítico é associado ao número de Hedstrom (He) (Souza, 2018).

$$Re_c = 155 He^{0,35} \quad \text{para } He < 1,5 \times 10^5$$

$$Re_c = 26 He^{0,5} \quad \text{para } He > 1,5 \times 10^5$$

$$Vt = Re_c \frac{\eta}{D \cdot \rho} \quad (3.14)$$

$$He = \frac{\rho \tau_0 D^2}{\eta} \quad (3.15)$$

Onde:

Vt = velocidade de transição (m/s);

Re_c = Reynolds crítico (adimensional);

He = número de Hedstrom (adimensional);

ρ = massa específica da polpa (kg/m³);

τ_0 = tensão de cisalhamento crítica (Pa);

D = diâmetro da tubulação (m);

η = viscosidade do concentrado (pa.s).

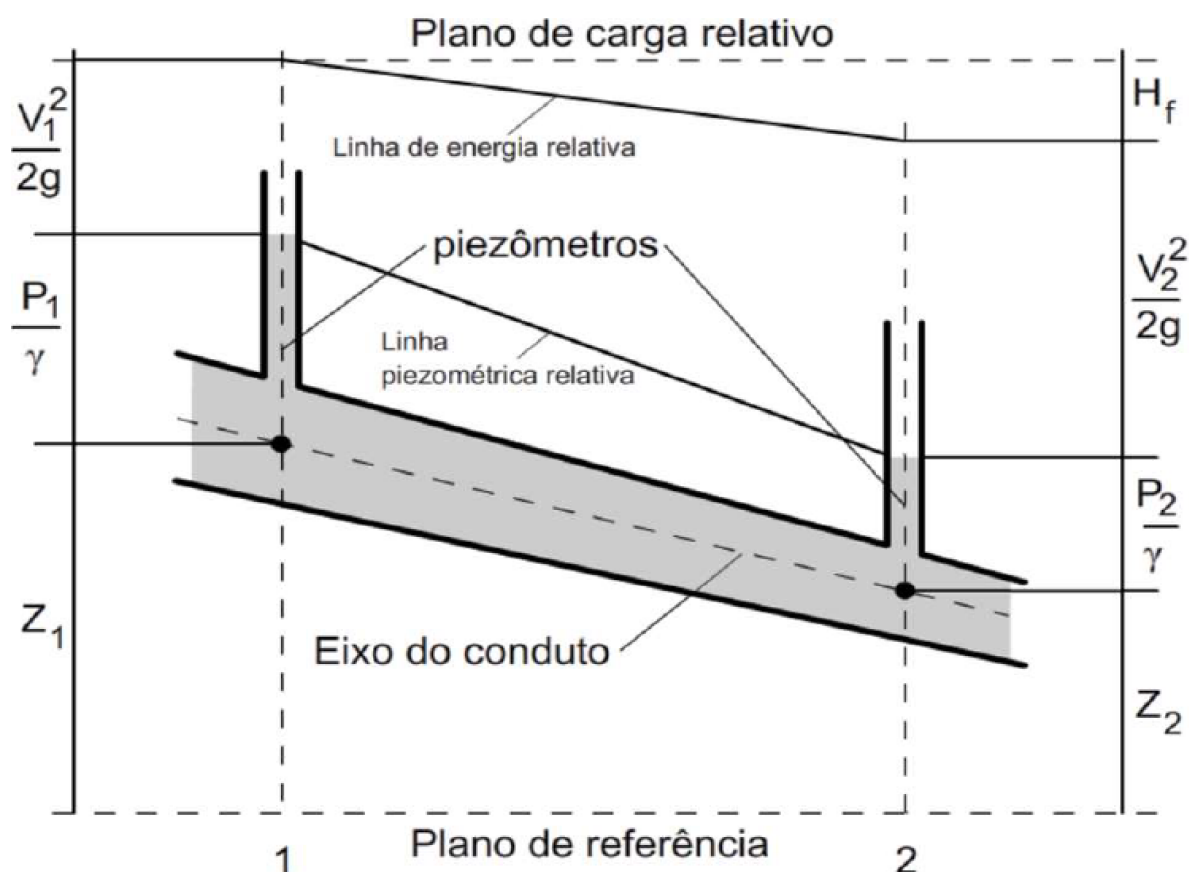
3.3 Perda de Carga

Existem diversos modelos para determinar a perda de carga em transportes hídricos e de sólidos, e os mais comuns incluem a equação de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Manning e Colebrook-White. Ainda assim, devido à singularidade de cada um, é recomendável, sempre que possível, realizar ensaios laboratoriais para obtenção deste parâmetro (Brum, 2017).

No que diz respeito à perda de carga, uma das equações mais conhecidas é a de Bernoulli, que permite modelar o escoamento de um sistema estacionário relacionando energia potencial, energia cinética e a energia associada à altura de pressão.

Em um sistema de transporte em dutos, define-se uma linha corrente, que geralmente coincide com o eixo longitudinal da tubulação. A equação de Bernoulli é aplicada em dois pontos dessa linha (Porto, 2003).

Figura 23 – Equação de Bernoulli



Fonte: ROMA (2006).

A equação é dada por:

$$H = Z + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g} \quad (3.16)$$

Onde:

H = altura total de energia (m);

Z = cota geométrica (m);

V = velocidade de fluxo (m/s);

P = altura de pressão (m);

ρ = massa específica da polpa (kg/m³);

g = aceleração gravitacional (m/s²).

Podendo ser simplificada da seguinte forma considerando um sistema estático:

$$Z_1 + P_1 = Z_2 + P_2 \implies P_2 = Z_1 - Z_2 + P_1$$

Para determinar a perda de carga de sistemas mais complexos, é utilizado o balanço de energia mecânica da seguinte equação considerando o escoamento em dois pontos:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_f = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + l_w \quad (3.17)$$

Onde:

H_f = altura total de energia (m);

l_w = perda de carga linear entre pontos (mca);

Z = cota geométrica (m);

V = velocidade de fluxo (m/s);

P = pressões absolutas (kgf/m²);

ρ = massa específica da polpa (kg/m³);

g = aceleração gravitacional (m/s²).

Em caso de pontos com velocidades iguais e trabalho no eixo nulo, ou seja, $V_1 = V_2 \implies \frac{V^2}{2g} = 0$ e $H = 0$. obtém-se:

$$l_w = \frac{P_1}{\rho} + Z_1 - \frac{P_2}{\rho} + Z_2 \implies l_w = \frac{\Delta P}{\rho} + \Delta Z \quad (3.18)$$

3.3.1 Perda de carga por fluxo heterogêneo

A perda de carga por fluxo heterogêneo corresponde ao escoamento de duas fases, como a água e a polpa. A assimetria dessas fases pode promover velocidades diferentes ao

longo da tubulação, favorecendo um aumento na perda de carga. Além disso, outros fatores como viscosidade do material, o tamanho das partículas transportadas e a rugosidade da tubulação, também proporcionam impactos na perda de carga em duas fases (Lightfoot; Bird; Stewart, 2007).

Em fluxos de concentração heterogênea, para se estabelecer a perda de carga, pode-se utilizar o método de Wasp, que tem como característica principal considerar a separação das fases no interior da tubulação para calcular a perda de carga. (Wasp; Kenny; Gandhi, 1977). A fração homogênea do concentrado atua como veículo de transporte da fração heterogênea, conforme a seguinte expressão:

$$\log \left(\frac{C}{C_A} \right) = -1,8 \left(\frac{w}{\beta \cdot \kappa \cdot u^*} \right) \quad (3.19)$$

$$u^* = v \sqrt{\frac{f_d}{8}} \quad (3.20)$$

Onde:

$\frac{C}{C_A}$ = razão da concentração volumétrica de sólidos a 0,08D desde o topo ao centro da tubulação.

w = velocidade de sedimentação das partículas sólidas (m/s);

β = constante de Ismail para um dado tamanho de partículas;

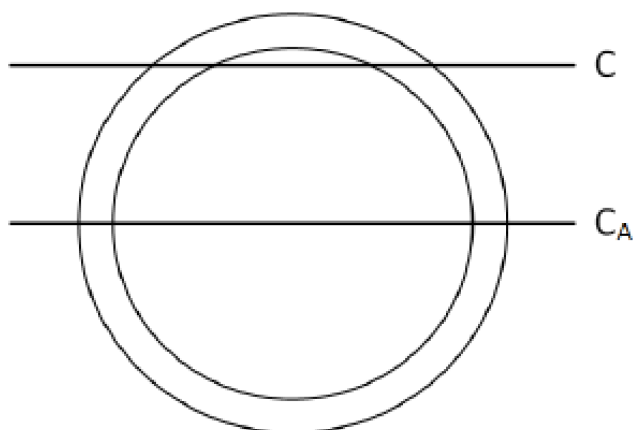
κ = constante de Von Kármán;

u^* = velocidade fricção (m/s);

v = velocidade do concentrado (m/s);

f_d = fator de fricção de Darcy determinado com a equação de Colebrook.

Figura 24 – Relação entre C/C_A na tubulação



Fonte: WASP (1976).

A Figura 24 ilustra a relação entre C e C_A de modo que a parcela C representa a concentração da polpa, ou seja, quantidade de sólidos dispersos na mistura de polpa em relação à concentração da fase aquosa C_A .

A velocidade de sedimentação das partículas sólidas pode ser calculada usando a equação de Stokes, que contempla o tamanho e a massa específica das partículas, a massa específica do líquido e a viscosidade do fluido (Sampaio; França; Braga, 2007). A equação é dada por:

$$V_s = \frac{2}{9} \times \frac{d_p^2 * g(\rho_p - \rho_l)}{\eta} \quad (3.21)$$

Onde:

V_s = velocidade de sedimentação das partículas sólidas (m/s);

ρ_p = massa específica das partículas sólidas (kg/m³);

ρ_l = massa específica do líquido (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

d_p = diâmetro das partículas sólidas (m);

η = viscosidade do fluido (Pa.s).

Já a constante de Ismail é determinada experimentalmente, por meio de testes em laboratórios, que consistem em suspender sólidos em um fluido e medir a queda de pressão ao longo de um trecho conhecido de tubulação (Wasp, 1959). Para isso, utiliza-se a seguinte equação:

$$\beta = \frac{\Delta P}{\rho_f L (U_c)^2} \quad (3.22)$$

Onde:

ΔP = queda de pressão medida (Pa);

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m³);

L = comprimento da tubulação testada (m);

U_c = velocidade do concentrado (m/s).

A constante de Von Kármán é uma constante empírica utilizada em diversas equações da mecânica dos fluidos, com o valor de $\kappa = 0,41$ na maior parte das aplicações em engenharia (Çengel; Cimbala, 2013)

Para determinar a perda de carga da parte homogênea composta pelo fluido não-newtoniano (Bingham), é adotada a seguinte equação:

$$\Delta P_v = \frac{f \cdot V^2}{D \cdot 2 \cdot g} v k \quad (3.23)$$

Onde:

ΔP_v = perda de carga do veículo (mcf);

D = diâmetro interno da tubulação (m);

V = velocidade do concentrado (m/s);

vk = fator de Von Kármán;

g = aceleração gravitacional (m/s²).

Já a perda de carga da parte heterogênea, é expressa por:

$$\Delta P_c = K \Delta P_{gua} C_{v_c} \left(\frac{g \cdot D \cdot (SGS - 1)}{V^2 \sqrt{C_D}} \right)^{1,5} \quad (3.24)$$

Onde:

ΔP_c = perda de Carga dos sólidos (mca);

K = constante de Durand;

ΔP_{gua} = perda de carga da água (mca);

C_{v_c} = concentração volumétrica do leito;

SGS = gravidade específica dos sólidos (kgf/m³);

C_D = coeficiente de resistência.

A constante de Durand pode ser determinada pela seguinte equação:

$$K = \left(\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_p} \right)^{0,5} \quad (3.25)$$

Onde:

ρ_p = massa específica das partículas sólidas (kg/m³);

ρ_l = massa específica do líquido (kg/m³).

Por fim, a perda de carga total é calculada a partir da soma da parte homogênea e da heterogênea.

3.3.2 Perda de carga linear em tubulação

Devido à rugosidade da parede interior da tubulação, em fluidos newtonianos acontece uma dissipação de energia e uma perda de pressão no fluxo (Matthew *et al.*, 1994). Dessa forma, utiliza-se a equação clássica de Darcy-Colebrook (1845):

$$J = \frac{fv^2}{D \cdot 2g} \quad (3.26)$$

Onde:

J = perda de carga linear (m/m);

f = fator de perda de carga de Darcy-Weisbach;

v = velocidade do fluxo (m/s);

D = diâmetro do tubo (m);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

No escoamento laminar, em que o número de Reynolds ≤ 2300 , o fator de atrito (f) é determinado pela equação:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.27)$$

Já o fator de perda de carga para escoamento turbulento rugoso pode ser estabelecido por meio da equação mais amplamente usada de Colebrook (1939):

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f_d}} \right) \quad (3.28)$$

Onde:

f_d = fator de perda de carga Darcy;

D = diâmetro interno da tubulação (m);

g = aceleração gravitacional (m/s²);

ε = rugosidade absoluta (m);

Re = número de Reynolds.

Além de Colebrook, outros pesquisadores desenvolveram suas próprias equações, como Swamee e Jain (Swamee; Jain, 1976).

$$f_d = 0,25 \left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-0,2} \quad (3.29)$$

Onde:

f_d = fator de perda de carga Darcy;

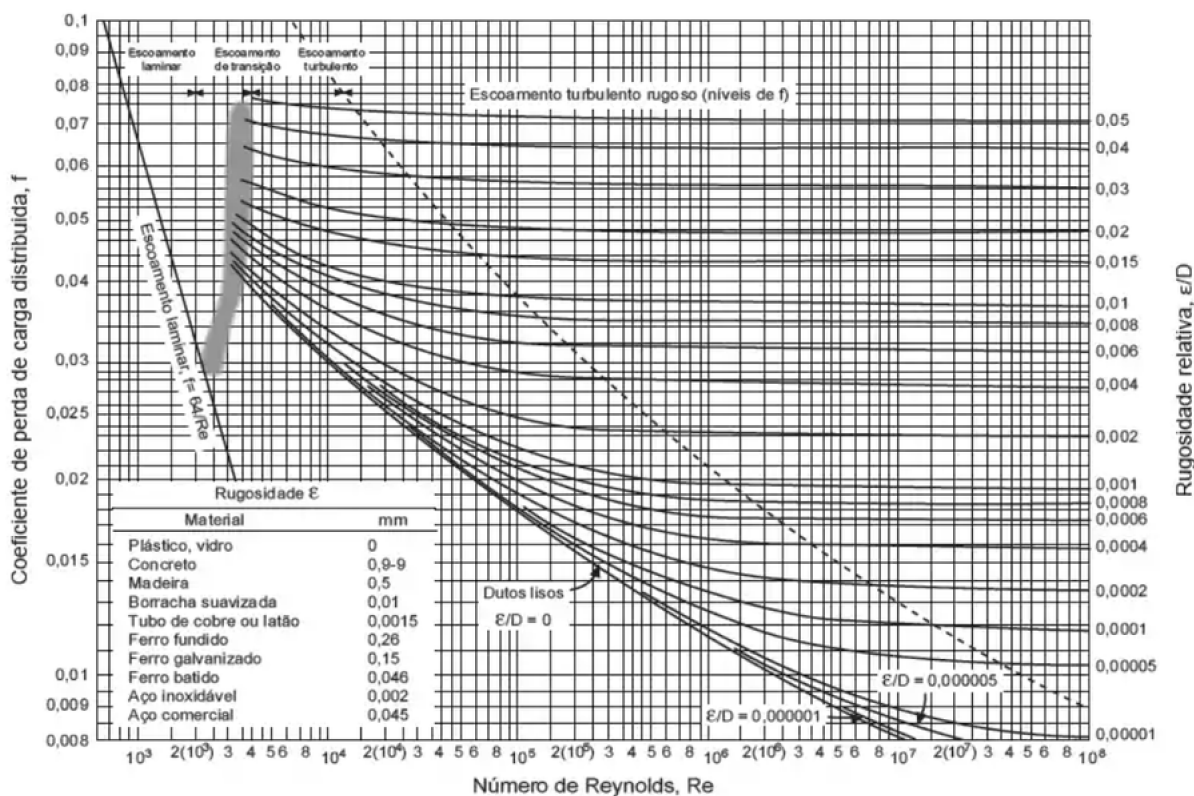
D = diâmetro interno da tubulação (m);

ε = rugosidade absoluta (m);

Re = número de Reynolds .

Uma alternativa para determinar o fator de perda de carga é o uso do diagrama de Moody. O ábaco permite determiná-lo em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Ábaco de Moody



Fonte: MACINTYRE (1987).

Para cálculos habituais e rápidos de perdas de carga em água ou polpas minerais, o coeficiente oscila entre 0,015 e 0,020, (Vidal, 2011).

3.3.3 Perda de carga localizada

A perda de carga localizada ocorre em trechos da tubulação onde há variação brusca da forma ou da direção do duto, ou seja, onde há qualquer alteração de módulo ou direção da velocidade média do escoamento.

Esse tipo de perda pode ser observada em válvulas, curvas, derivações, conexões e outros. Para serem calculadas nas unidades de Bernoulli, é usado o coeficiente adimensional K , próprio para cada singularidade.

$$h_s = K \frac{V^2}{2g} \tag{3.30}$$

Onde:

h_s = perda de carga localizada (m);

K = coeficiente de perda próprio de cada singularidade;

\bar{V} = velocidade média (m/s);

g = aceleração gravitacional (m/s²).

Os valores de K para as singularidades mais frequentes, podem ser observados a seguir:

Tabela 4 – Valores de singularidades K

Singularidade	K
45 Standard	0,35
90 Standard	0,5
90 Raio Longo	0,45
Uniões	0,04
Comporta	0,17
Válvulas Borboleta	0,24
Válvulas Diafragma	2,3
Válvulas Ângulo	3,0
Válvulas Globo	6,4
Válvulas de Retenção (check)	2,0
Válvulas de Retenção (pé)	15,0

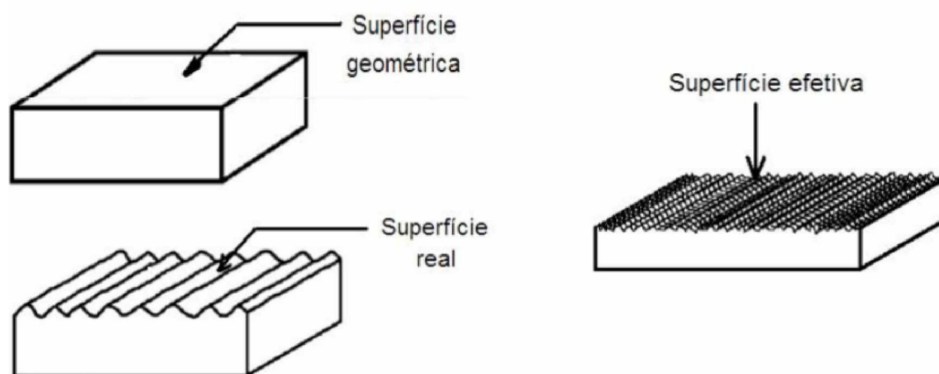
Fonte: Chaves (2012).

3.4 Rugosidade

A equação de Colebrook emprega tanto o número de Reynolds quanto a rugosidade relativa do duto para calcular o fator de perda de carga. Entretanto, os dutos utilizados em experimentos de laboratório possuem uma rugosidade uniforme, o que é diferente dos dutos empregados na indústria. Na prática, a rugosidade pode variar ao longo do tempo devido ao envelhecimento do duto, à corrosão e ao acúmulo de material nas extremidades.

Além disso, é difícil determinar com precisão essa rugosidade, como pode ser observado na Figura 26 (Kanoglu; Cengel; Cimbala, 2019).

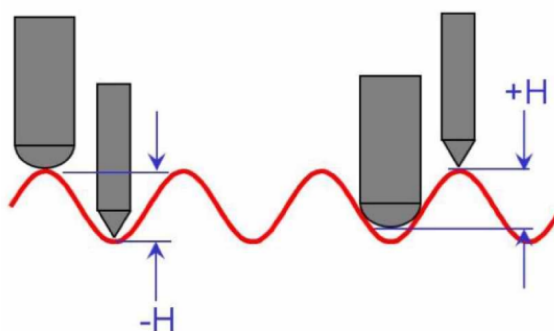
Figura 26 – Tipos de superfície: geométrica, real e efetiva



Fonte: ABNT (2002).

Para medir a rugosidade de uma tubulação, é possível utilizar um instrumento chamado rugosímetro. Esse equipamento realiza a medição através do contato direto com a superfície, utilizando sensores que geram relatórios com base nas leituras obtidas. Existem diferentes tipos de rugosímetros, incluindo os eletromecânicos, óticos e à laser, que utilizam diferentes tipos de sensores, como apalpadores, feixes de luz ou elétrons (Pimenta, 2021). A Figura 27 ilustra o funcionamento de um rugosímetro apalpador, que realiza a varredura na superfície do material e fornece um perfil da rugosidade para análise (Motta Neto, 2017).

Figura 27 – Exemplos de sensores apalpadores na obtenção do perfil de rugosidade



Fonte: TAYLOR HOBSON (2003).

Tabela 5 – Rugosidade dos materiais

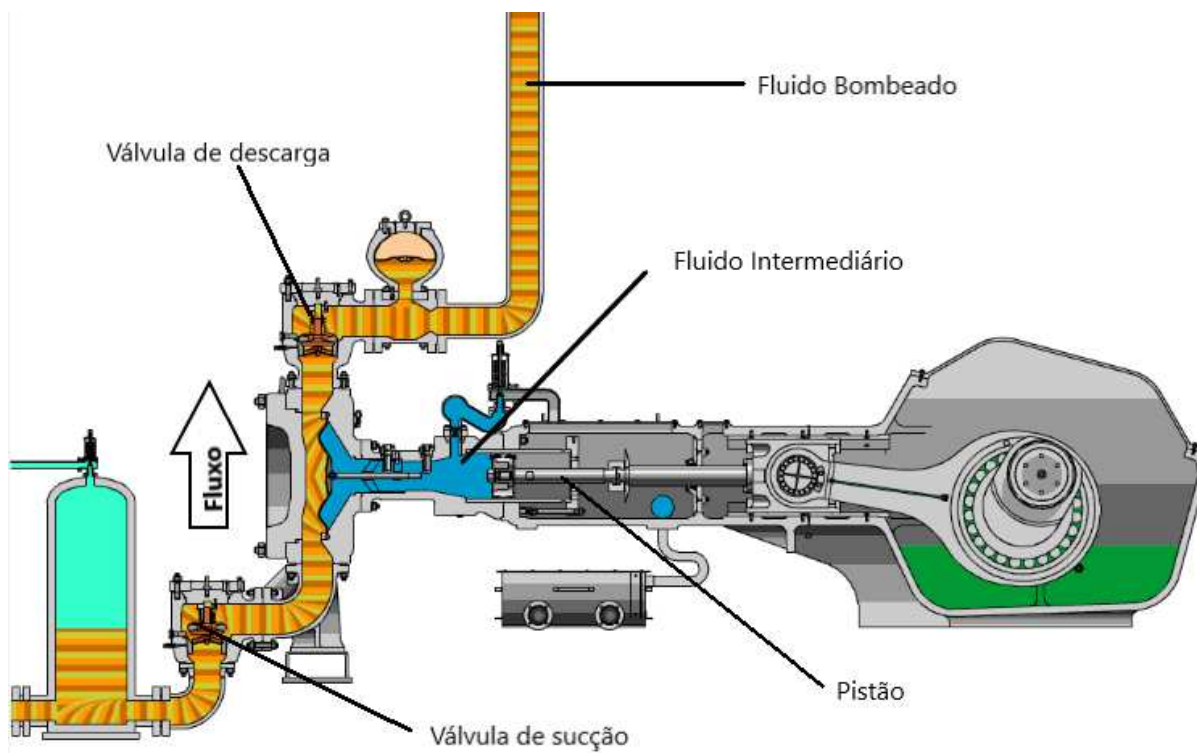
Material	Rugosidade (mm)
Aço polido	0,01 - 0,015
Aço comercial novo	0,046 - 0,15
Aço polido por fluxo de polpas	0,05
Aço com leve oxidação	0,1
Aço galvanizado	0,1 - 0,3
Aço limpo depois de muito uso	0,15
Aço decapado sem incrustações	0,15 - 0,2
Aço meio decapado	0,25
Aço com grandes incrustações	0,4
Tubos de aço lisos	0,04 - 0,10

Fonte: Chaves (2012).

3.5 Bombas de deslocamento positivo

No bombeamento da polpa de minério através do mineroduto, as bombas de deslocamento positivo são amplamente utilizadas. Essas bombas são capazes de transformar energia, diretamente da fonte motora em energia potencial, permitindo o deslocamento da polpa. Essa transferência de energia ocorre do pistão para o fluido propelente, o qual movimenta um componente mecânico chamado diafragma. Esse movimento faz com que o fluxo siga a mesma trajetória executada pela bomba, como ilustrado na Figura 28 (Brum, 2017).

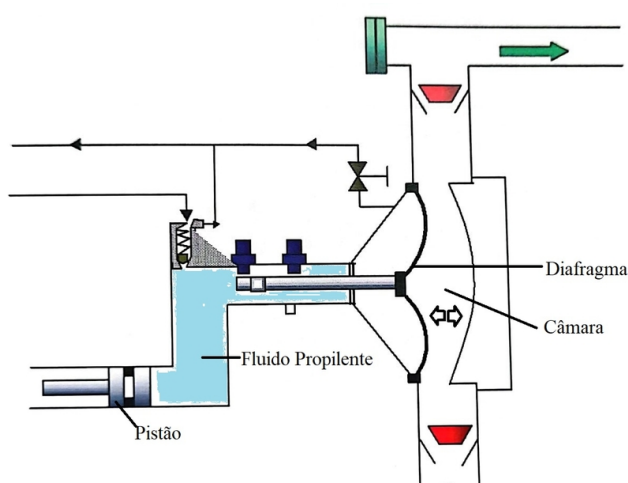
Figura 28 – Bomba Geho



Fonte: Adaptado GEHO (2022).

A movimentação do diafragma flexível faz com que a câmara seja preenchida com o fluxo, empurrando ou puxando o fluido através desse ambiente. Para permitir esse processo, a bomba possui duas válvulas que controlam o sentido do fluxo na aspiração e na descarga, garantindo a vedação e evitando que o fluxo siga em sentido contrário (Figura 29).

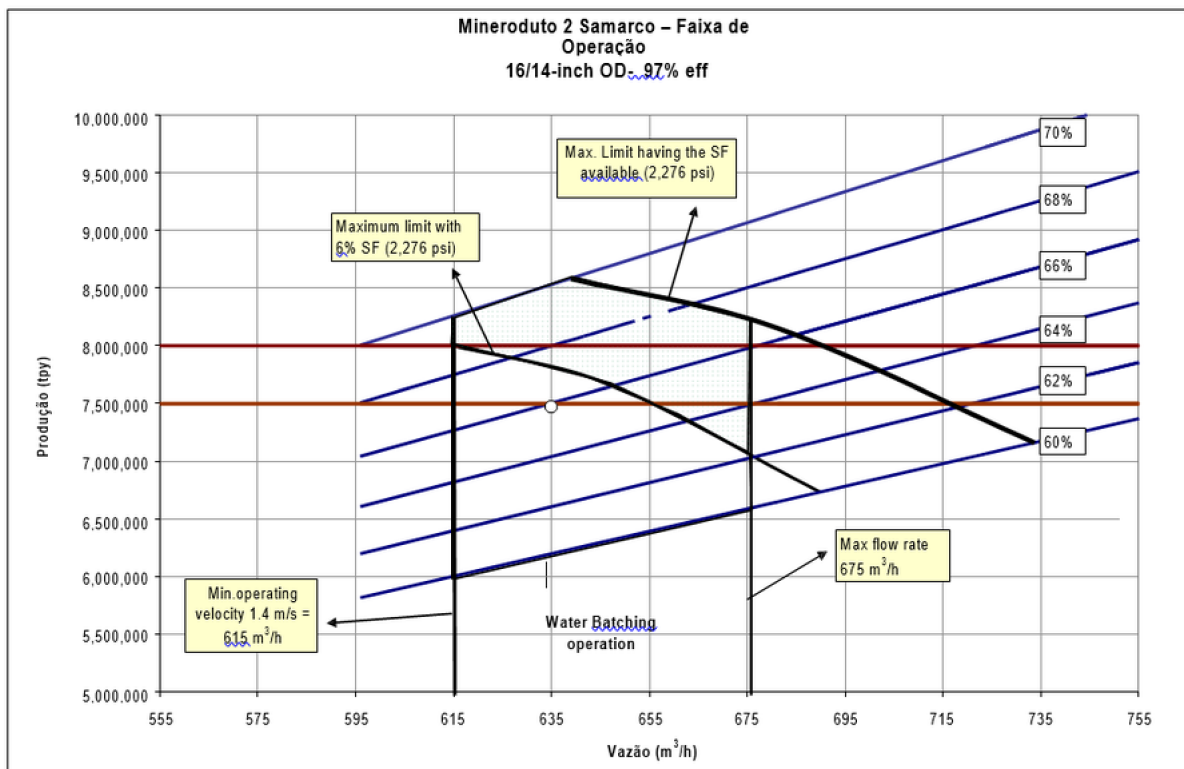
Figura 29 – Funcionamento do diafragma



Fonte: Adaptado, GEHO (2022).

Este tipo de bomba é utilizado para operar em alta pressão, capaz de deslocar a polpa a longas distâncias, fornecendo uma pressão de até 160 kgf/cm² ou 2.276 psi, dependendo da vazão e da concentração do material, conforme pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Faixa de operação do mineroduto 2



Fonte: SAMARCO (2014).

Os dados foram obtidos a partir da seguinte equação:

$$P = Q \times C_m \times \rho \times t \tag{3.31}$$

Onde:

P = produção em tonelada métrica seca por ano (tms/ano);

Q = vazão (m³/h);

C_m = concentração de sólidos (%);

ρ = massa específica do sólido (kg/cm³);

t = tempo (h).

Como exemplo, para uma concentração de 70% de sólidos temos:

$$P = 615 \times 0,7 \times 2,2 \times (24 \times 365) = 8.296.596 \sim 8.300.000 \text{ tms/ano}$$

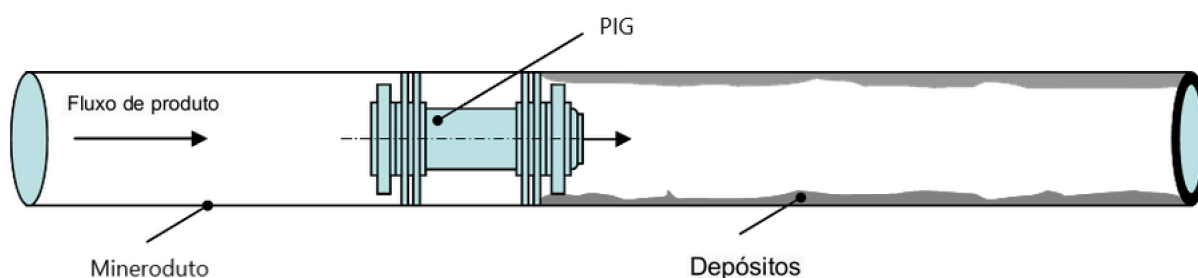
3.6 Equipamento de inspeção interna PIG

Durante a vida útil de um duto, existe uma tendência de acúmulo de material nas suas paredes internas, promovendo uma redução no diâmetro da tubulação, o que aumenta a perda de carga e reduz a eficiência do fluxo. Desse modo, mais energia deve ser gasta no bombeamento para transportar um mesmo volume de material (Silva, 2017). Esse acúmulo pode ser causado por diversos fatores, tais como sedimentação de partículas sólidas da polpa, incrustação de reagentes químicos presentes na polpa, corrosão da superfície interna da tubulação, entre outros (Bishnoi; Das; Ramamurthy, 2015).

O período em que ocorre o acúmulo do material pode variar muito dependendo do tipo de matéria bombeada, das condições de bombeamento do fluxo e da integridade da tubulação. Em alguns casos pode ocorrer em dias e semanas, enquanto em outros pode levar meses ou anos (Lais *et al.*, 2018). É comum encontrar relatos de incrustação severa em indústrias que utilizam altas dosagens de cal na polpa para controle de pH (Gokmen; Koseoglu; Kitis, 2011).

Para realizar a remoção de materiais acumulados no interior dos dutos ou evitar esse acúmulo, é comum o uso do equipamento conhecido como PIG (*pipeline inspection gauge*), o qual é inserido no interior do duto e se desloca por toda a sua extensão, impulsionado geralmente pelo próprio fluido, seja ele polpa ou água (Silva, 2017). Esse equipamento fornece uma maior energia mecânica para remover sedimentos, no interior da tubulação, que normalmente não são removidos pelo fluxo do líquido em condições normais de operação, (Figura 31) (Torres, 2021).

Figura 31 – Ilustração de um PIG removendo sedimentos



Fonte: E. EISSLER (2015).

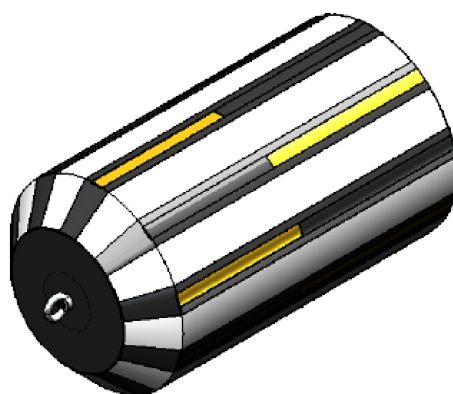
Existem diversos tipos de PIG's, comumente divididos em dois grupos: os *Utility PIG's*, de construção simples e que normalmente não possuem instrumentos para a coleta de dados ou para inspeções, e os *Smart PIG's*, equipamentos instrumentados destinados à inspeção interna dos dutos através de técnicas de ensaios não destrutivos.

Dentro dos grupos, destaca-se o *Utility PIG*:

- PIG de limpezas (espuma) – Remoção de matérias, Figura 32.

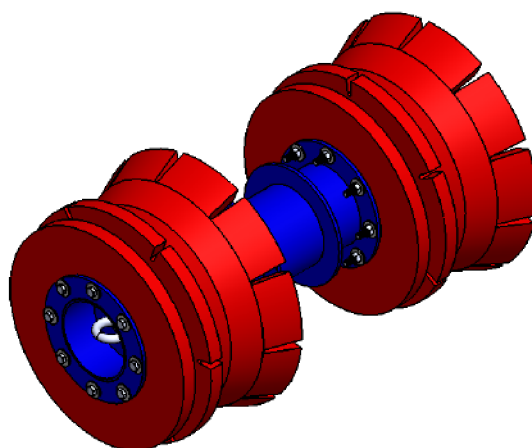
- PIG de limpeza (mandril) – Remoção de matérias, Figura 33.
- PIG de separação – Separação de produtos transportados.

Figura 32 – PIG de Espuma



Fonte: HIDROPIG (2016).

Figura 33 – PIG de mandril



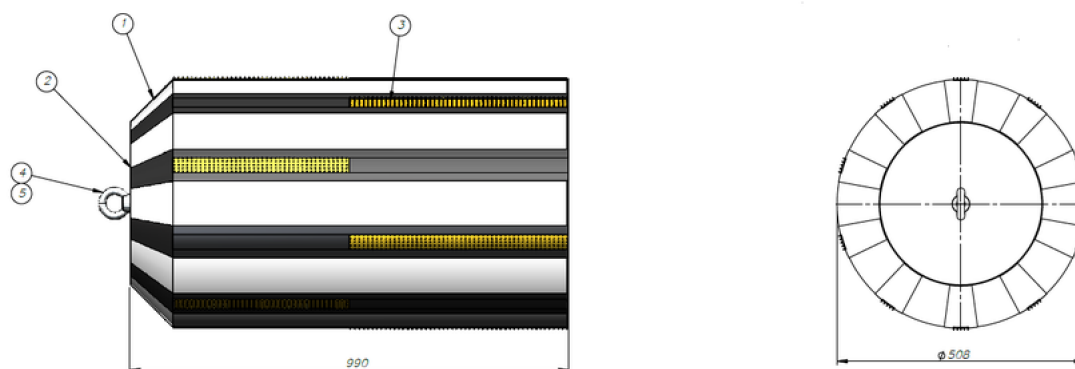
Fonte: HIDROPIG (2016).

Os PIG's de limpeza são usados para reduzir a perda de carga do sistema, que pode variar em função do aumento da rugosidade e da diminuição do diâmetro interno da tubulação. Isso ocorre em função de diversos fatores, como deposição de material, corrosão ou formação de incrustação. Os PIG's de espuma e mandril são ambos de limpeza e se diferem pela estrutura e material utilizado na construção (Liu *et al.*, 2020).

O PIG de espuma é feito de poliuretano expandido revestido com uma camada de poliuretano resistente à abrasão. Na Figura 34 e na Tabela 6 são apresentados os

componentes da estrutura desse PIG (Santos, 2020). Ao inserir o PIG no duto, a espuma se expande e adere à parede interna, promovendo a limpeza ao ser bombeado na linha (Costa Júnior *et al.*, 2019).

Figura 34 – Estrutura PIG de espuma



Fonte: HIDROPIG (2016).

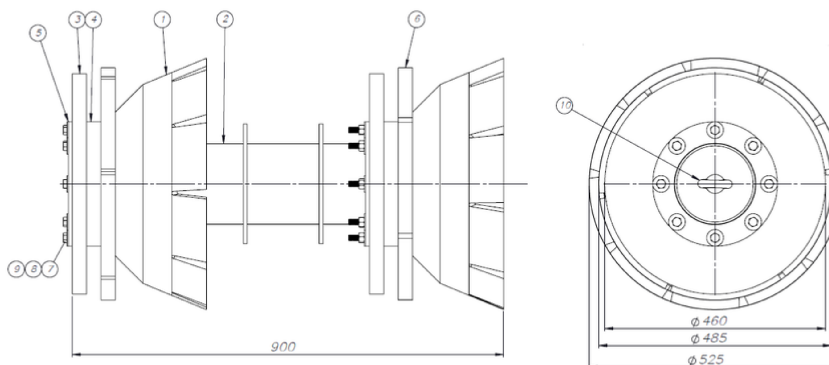
Tabela 6 – Estrutura do PIG de espuma

Item	Descrição
1	Placa Interna, Mod. Hlrs
2	Disco de Aço
3	Tiras de Escova de Aço
4	Barra Roscada
5	Olhal

Fonte: HIDROPIG (2016).

Já o PIG de mandril é composto por uma série de discos de mandris que se encaixam no interior do duto. Esses também podem ser revestido com materiais abrasivos, para remover depósitos mais resistentes. Na Figura 35 e na Tabela 7 são apresentados os componentes da estrutura desse PIG, mais apropriado para remover depósitos pesados e para limpezas mais agressivas (Lima, 2017).

Figura 35 – Estrutura PIG de mandril



Fonte: HIDROPIG (2016).

Tabela 7 – Estrutura do PIG de mandril

Item	Descrição
1	Copo Cônico 2
2	Corpo de Aço 1
3	Disco Guia Menor 2
4	Espaçador 2
5	Flange 2
6	Disco Guia Maior 2
7	Parafuso Sextavado
8	Porca Sextavada
9	Arruela
10	Olhal

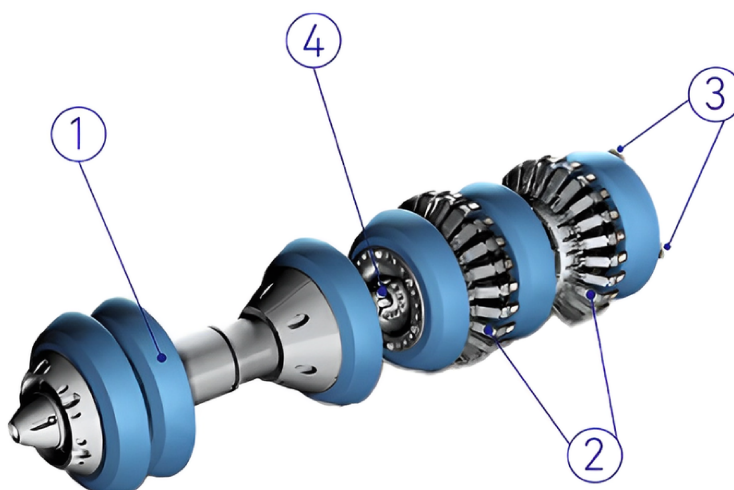
Fonte: HIDROPIG (2016).

Dentre os *Smart PIG's* destacam-se:

- PIG's Geométricos – Inspeção da geometria da tubulação;
- PIG *Ultrasonic Testing* (UT) – Detecção de defeitos e variações da espessura do duto por ultrassom;
- PIG *Magnetic Flux Leakage Method* (MFL) – Detecção de defeitos e variações da espessura do duto por magnetismo.

O PIG geométrico (Figura 36 e Tabela 8) é dotado de sensores capazes de adaptar sua dimensão interna segundo a tubulação e suas deformações. À medida que os sensores percorrem a tubulação, geram leituras de qualquer variação geométrica, possibilitando a detecção de amassamento (Daud, 2019).

Figura 36 – PIG Geométrico



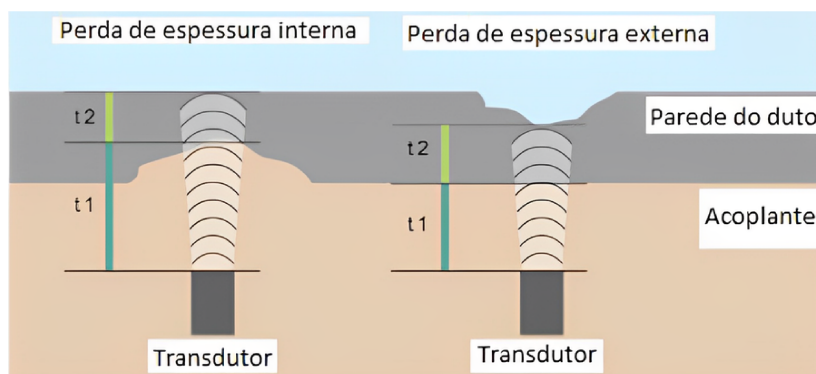
Fonte: ROSEN (2023).

Tabela 8 – Estrutura do PIG de geométrico

Item	Descrição
1	Copos
2	Sensores
3	Odômetro
4	Bateria

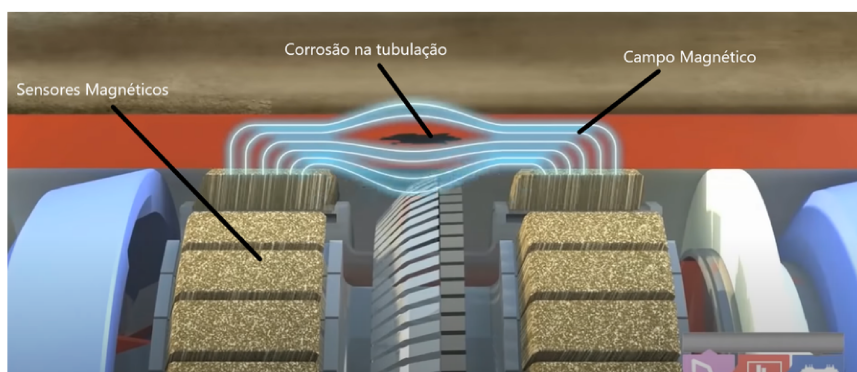
Fonte: ROSEN (2023).

Já o PIG ultrassônico (Figura 37) é um tipo utilizado para inspeção de dutos por meio da emissão e recepção de ondas sonoras de alta frequência. Seus sensores ultrassônicos emitem ondas capazes de detectar discontinuidades, tais como corrosão, rachaduras, trincas e espessura interna da tubulação (Adeyemo *et al.*, 2018).

Figura 37 – Funcionamento dos sensores ultrassônicos

Fonte: WALKER (2010).

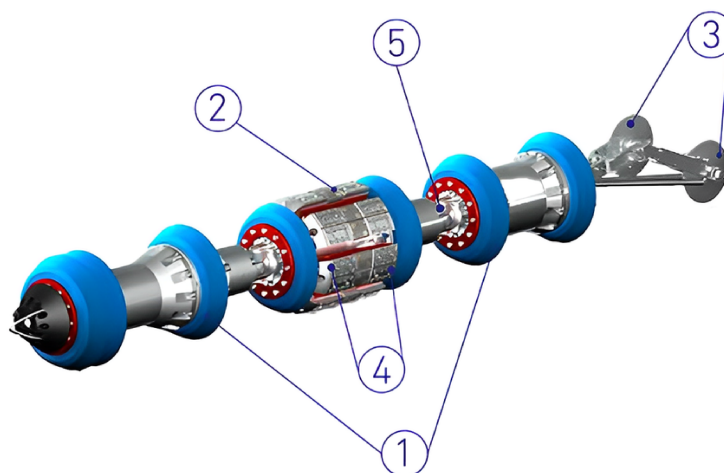
O PIG *Magnetic Flux Leakage Method* (MFL) é composto de ímãs que geram um campo magnético no interior do duto e sensores que medem a variação desse campo magnético, detectando espessura, pontos de corrosão, pites, trincas e corrosão em áreas de solda (Figura 38) (Costa Júnior, 2021).

Figura 38 – Funcionamento dos sensores magnéticos PIG MFL

Fonte: Adaptado ROSEN (2016).

Na Figura 39 pode-se observar um exemplo de MFL, e na Tabela 9, a sua estrutura:

Figura 39 – PIG MFL



Fonte: ROSEN (2023).

Tabela 9 – Estrutura do PIG de MFL

Item	Descrição
1	Copos
2	Sensores
3	Odômetro
4	Unidade magnética
5	Bateria

Fonte: ROSEN (2023).

Os PIG's podem deter mais de um sensor, em um único equipamento, conforme a necessidade da inspeção (Wright *et al.*, 2019). Eles são fabricados sob medida, de acordo com as características de cada tubulação. Na Tabela 10 são apresentados exemplos de *Smart PIG's* com diferentes combinações.

Tabela 10 – Tipos de *Smart PIG*'s conforme a necessidade de inspeção.

Inspeção	Ameaças Mapeadas
<i>Smart PIG</i> para corrosão (MFL e/ou UT e/ou TMFL)	<ul style="list-style-type: none">• Corrosão interna ou externa;• Erosão;• Defeitos de laminação;• Defeitos de fabricação.
<i>Smart PIG</i> para trinca (UT Crack <i>Detection</i> e/ou TMFL)	<ul style="list-style-type: none">• Trincas.
<i>Smart PIG</i> para defeitos geométricos (<i>Geometric Defarmation Tool</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Defeitos geométricos (quantitativamente).
<i>Smart PIG</i> para desvios de traçado (<i>Inertial Mapping Tool</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Movimentação de solo.
Inspeção com PIG de Limpeza com placa calibradora (<i>Caliper Tool</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Defeitos geométricos (qualitativamente).

Inspeção	Ameaças Mapeadas
----------	------------------

Fonte: TORRES (2021).

Com base nos dados gerados pelas corridas do PIG, são programadas as atividades de manutenção que garantem a integridade dos dutos. Essas atividades podem incluir a substituição de trechos danificados ou o reforço externo por meio de encamisamento, conforme figura abaixo:

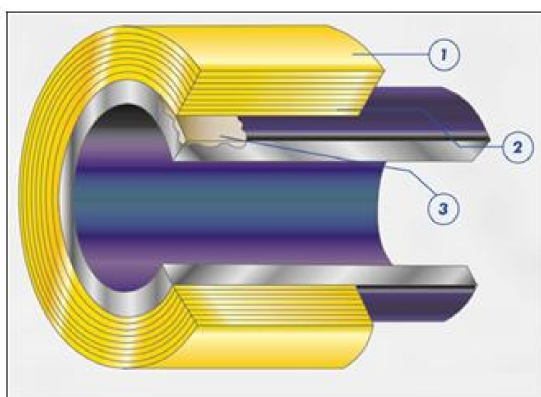
Figura 40 – Reparo por encamisamento



Fonte: SAMARCO MINERAÇÃO (2020).

A Figura 41 representa um reparo com encamisamento em que o número 1 representa a camisa colocada para o reforço externo, o número 2 a tubulação danificada e o número 3 o dano da tubulação.

Figura 41 – Esquema do reparo por encamisamento



Fonte: SHAMSUDDOHA et. al, (2013).

3.7 Sistemas de instrumentação de minerodutos

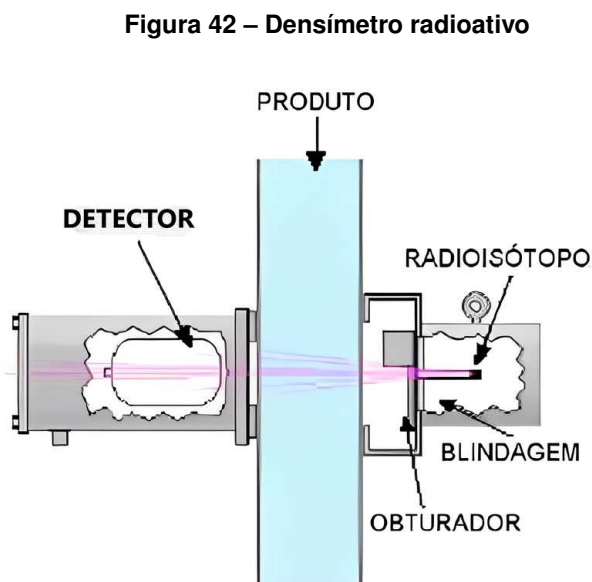
3.7.1 Densímetros

A densidade do material é um importante fator quando se trata do bombeamento de partículas por meio de minerodutos. Existem várias formas de medir a densidade por instrumentos em minerodutos, sendo as mais comuns: os densímetros por pressão diferencial, os densímetros nucleares e os densímetros de raio-X (Feng; Bi; Liao, 2022).

Os densímetros por pressão diferencial baseiam-se no princípio da diferença de pressão entre dois pontos em um fluido, que é diretamente proporcional à densidade do fluido. Já o densímetro de raio-X consiste em determinar a densidade conforme a absorção do raio-X dos componentes do material analisado.

Quando se trata de polpa de minério, os densímetros nuclear ou radioativo são considerados os mais precisos para medição de densidade, especialmente em condições de altas pressões (Gupta; Sinha, 2010). Esse equipamento baseia-se na emissão de radiação gama ou beta em direção ao material dentro do mineroduto (Figura 42).

À medida que a radiação atravessa o material bombeado, sua intensidade é reduzida devido à interação com os núcleos atômicos do material. O detector localizado no lado oposto da parede do mineroduto registra a atenuação da radiação, permitindo o cálculo em tempo real da densidade do material com base na taxa de atenuação (Taylor; Kansara, 1967).



Fonte: RITA (2016).

Existem dois tipos de densímetros nucleares: de fonte única e de fonte dupla. Nos densímetros de fonte única, a radiação é emitida por apenas uma fonte e a atenuação é

medida por um único detector. Já nos densímetros de fonte dupla, são utilizadas duas fontes de radiação e dois detectores para a medição (Carlson; David, 2012).

Apesar da sua utilidade, é importante ressaltar que os densímetros nucleares apresentam riscos devido à radiação emitida, que pode ser prejudicial tanto para a saúde quanto para o meio ambiente. Por essa razão, é fundamental que o manuseio seja feito por profissionais treinados e de acordo com todas as normas de segurança estabelecidas.

3.7.2 Medidores de vazão

A vazão é uma das principais variáveis operacionais analisadas em sistemas de bombeamento. Para medir a quantidade de material que flui através de um sistema, são utilizados equipamentos de medição de vazão. Existem diversos tipos de medidores de vazão na indústria, incluindo o medidor magnético, o de ultrassom, o de pressão diferencial, o de turbina, o de deslocamento positivo, entre outros (AMSE, 1971).

Contudo, quando se trata de bombeamentos líquidos viscosos e abrasivos como a polpa de minério bombeada em minerodutos, o modelo mais utilizado, e considerado o mais preciso, é o medidor de vazão por deslocamento positivo das bombas tipo diafragma.

Nesse tipo de medidor, a vazão é calculada pela contagem do número de ciclos de bombeamento, ou seja, a medição é feita pela contagem do número de vezes que o diafragma é acionado em um intervalo de tempo específico (Miller, 2014). O número acumulativo da contagem desse acionamento é chamado de KQT. Para fazer essa contagem, é utilizado um sensor que detecta a movimentação do diafragma durante o processo de bombeamento.

Portanto, a vazão pode ser determinada pela equação 3.32.

$$Q = KQT \times V \times Ef \times t \quad (3.32)$$

Onde:

KQT = número acumulativo do acionamento do diafragma;

V = volume da câmara da bomba (m³);

Ef = eficiência volumétrica fornecida pelo fabricante (%);

t = tempo de operação (h).

3.7.3 Medidores de pressão

Segundo Silva (2018), os medidores de pressão são equipamentos utilizados para medir a pressão interna da tubulação durante o bombeamento de polpa de minério. Esses

medidores são instalados em pontos estratégicos na extensão do mineroduto, para monitorar a pressão do fluxo e garantir a segurança e a eficiência do processo produtivo (Figura 43).

Figura 43 – Medidores de pressão instalados na tubulação



Fonte: SAMARCO (2023).

Alguns exemplos de pontos estratégicos, chamados de estações de monitoramento de pressão ou *pressure monitoring stations* (PMS) incluem: a descarga das estações de bombeamento, permitindo monitorar a pressão na entrada do sistema; próximo às estações de válvulas, permitindo o monitorar a pressão no lado a montante e a jusante; em pontos de elevação ou onde a pressão atinge valores extremos como pontos máxima e mínima pressão ao longo da tubulação (Figura 44).

Figura 44 – Estação de monitoramento de pressão (PMS)



Fonte: SAMARCO (2023).

Para armazenar e transmitir as informações geradas pelos PMS's, é instalado paralelamente aos dutos, um sistema de fibras óticas que permitem a comunicação com o

Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA). Caso haja rompimento da fibra ótica, há também uma redundância de transmissão via rádio.

O sistema SCADA utiliza controladores lógicos programáveis (CLP's) para fazer a interface com os dispositivos de medição de campo e das estações de bomba e válvulas, permitindo a integração de dados de todos os equipamentos utilizados no mineroduto.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Projeto conceitual

Conforme mencionado no tópico 3.3, existem diversos modelos para predição da perda de carga em minerodutos. No entanto, esses apresentam limitações quando aplicados na prática, devido às diversas variáveis que podem compor o ambiente operacional, como dutos de longas distâncias com variação de rugosidade, espessura interna e altitude. Dessa forma, neste trabalho, propõe-se desenvolver um método para monitoramento e controle da perda de carga do mineroduto 2 da Samarco, baseando-se no histórico de operação desse mineroduto.

Para isso, foram coletados dados operacionais em momentos de estabilidade a cada duas horas em um período de 7 meses do ano de 2022. Os principais dados foram:

Dados da propriedade da polpa analisados em laboratório:

- Granulometria;
- Viscosidade;
- Concentração;
- Densidade do sólido;
- Densidade da polpa;
- pH.

Dados analisados por meio de instrumentação:

- Pressão ;
- Vazão;
- Velocidade das bombas.

Dados da integridade da tubulação por projeto e inspeção interna de *Smart* PIG's:

- Extensão;
- Altura relativa;
- Rugosidade;
- Espessura interna.

Com base nos dados gerados, foi calculada a perda de carga usando a equação 3.18 e, em seguida, correlacionada com outras variáveis operacionais do processo, como velocidade, vazão e concentração da polpa. Por fim, foi aplicado um modelo de regressão linear para definir uma equação de predição da perda de carga comparando-a com a equação 3.26. O modelo foi aplicado e analisado durante 12 meses, indicando a necessidade da passagem de PIG's de limpeza, conforme o aumento da perda de carga.

4.2 Propriedades da polpa

Para a amostragem da polpa de minério, o início do bombeamento de polpa (batch) foi aguardado e, em seguida, para retirada das amostras no ponto de amostragem EB4, o fluxo foi regulado por meio da válvula de orifício do amostrador, com um tempo de escoamento contínuo de aproximadamente 15 segundos. As amostras foram coletadas a cada 30 minutos e depositadas no frasco de formação do composto bi-horário. Logo em seguida, identificadas com rótulos próprios e mantidas em recipientes específicos, fechados com tampa, até serem utilizadas para análise, garantindo a padronização dos dados obtidos. Os testes foram realizados seguindo os procedimentos internos da Samarco que foram baseados nas respectivas normas de cada teste.

4.2.1 Distribuição granulométrica

A análise granulométrica é um procedimento importante para determinar a distribuição dos tamanhos das partículas presentes em uma amostra. Neste estudo, foram utilizados os seguintes procedimentos para a preparação da amostra, baseando-se na norma NBR 8957 e NBR ISO 3310-1:2018: inicialmente, a amostra coletada foi homogeneizada. Em seguida, foram transferidos aproximadamente 400 ml para um recipiente limpo, filtrados através de um sistema de ar comprimido. Após a filtragem, a amostra foi colocada em uma bandeja e deixada na estufa até secar completamente.

Depois desse processo, a amostra seca foi desagregada na peneira de 28#, homogeneizada e quarteada até obter uma alíquota de 95 a 100 g, registrando-se o peso inicial. Posteriormente, o material foi deslamado na peneira de 325 # e transferido para um prato de alumínio, deixando-o na estufa até secar completamente. Após o processo de secagem, o prato foi deixado para esfriar.

As peneiras foram organizadas na seguinte sequência: 65#, 100#, 150#, 200#, 270# e 325#. O material do prato foi transferido para a primeira peneira (65 #) no RO-TAP, e uma peneira sem malha foi montada para ajustar a altura do sistema. A tampa de impacto foi montada sobre a peneira sem malha, e o programador do RO-TAP (Figura 45), ajustado para o tempo de vibração de 20 minutos. Esse procedimento permitiu a realização da análise granulométrica da amostra, fornecendo informações importantes sobre a distribuição de

tamanhos das partículas presentes.

Figura 45 – Ro-Tap para peneiramento



Fonte: SAMARCO MINERAÇÃO (2023).

4.2.2 Avaliação da Viscosidade

Os ensaios de reologia estabelecem às diretrizes para o reconhecimento das propriedades reológicas da polpa, através da obtenção de valores da taxa de cisalhamento e da tensão de cisalhamento no Reômetro R\S Plus Brookfield, prevendo assim, o comportamento da polpa no mineroduto,.

O teste foi iniciado utilizando os parâmetros de inserção de variáveis no reômetro, como temperatura, velocidade de cisalhamento e tempo de análise. Em seguida, as amostras de polpa foram homogeneizadas e transferidas para o copo do reômetro até a marca interna e, posteriormente, analisadas usando o software Rheo 3000 do reômetro (Figura 46). Após a análise, foram obtidos dados referentes à reologia e à viscosidade da amostra.

Figura 46 – Reômetro R/S Plus Brookfield



Fonte: SAMARCO MINERAÇÃO (2023).

4.2.3 Avaliação da concentração

As concentrações das amostras foram analisadas baseando-se na norma NBR ISO 16742:2021: inicialmente, a polpa foi coletada e misturada manualmente dentro de um recipiente de amostra. Em seguida, a amostra foi transferida para um becker de pesagem, com seu volume ajustado para 300 ml. Posteriormente, a bandeja com o papel de filtro foi pesada e a polpa transferida para o filtro, com o sistema de ar comprimido sendo ativado para auxiliar na filtração.

Após a filtragem, a amostra foi removida do filtro e transferida para a bandeja pesada anteriormente. A bandeja com a amostra foi deixada na estufa/chapa até que ela secasse completamente, sendo retirada e deixada sobre a bancada até esfriar. Por fim, a bandeja com amostra foi pesada, e com os pesos foram calculadas a concentração utilizando-se a equação:

$$\text{Concent.} = 100 \times \frac{\text{Peso da bandeja com amostra} - \text{Peso da bandeja}}{\text{Peso do backer com polpa} - \text{Peso do backer}} \quad (4.1)$$

4.2.4 Aferição do pH

Para a realização da análise do pH das amostras, foram seguidos os seguintes passos: primeiramente, para a calibração, o phmetro foi desligado e o eletrodo foi lavado com água destilada e enxugado com papel higiênico. A seguir, o phmetro foi ligado, e 30 ml da solução tampão pH 7 foram colocados em um recipiente. Com o eletrodo nessa solução, a calibração foi realizada, aguardando a estabilização.

Após esse processo, o eletrodo foi, novamente, lavado com água destilada e enxugado, e 30 ml da solução tampão pH 10 foram colocados em outro recipiente. O eletrodo foi mergulhado na solução pH 10 e a calibração para essa solução foi novamente realizada, aguardando a estabilização e emitindo o valor de eficiência do eletrodo.

Em seguida, o eletrodo foi lavado novamente e deixado mergulhado em um recipiente com solução de KCL 3M. Para a coleta da amostra, o eletrodo foi lavado com água destilada e enxugado antes de ser mergulhado na amostra, homogeneizando-a continuamente. A tecla de medição do phmetro foi pressionada e a leitura foi aguardada, repetindo-se o processo até que dois valores iguais consecutivos fossem obtidos. Por fim, o valor medido foi registrado (Figura 47).

Figura 47 – pHmetro



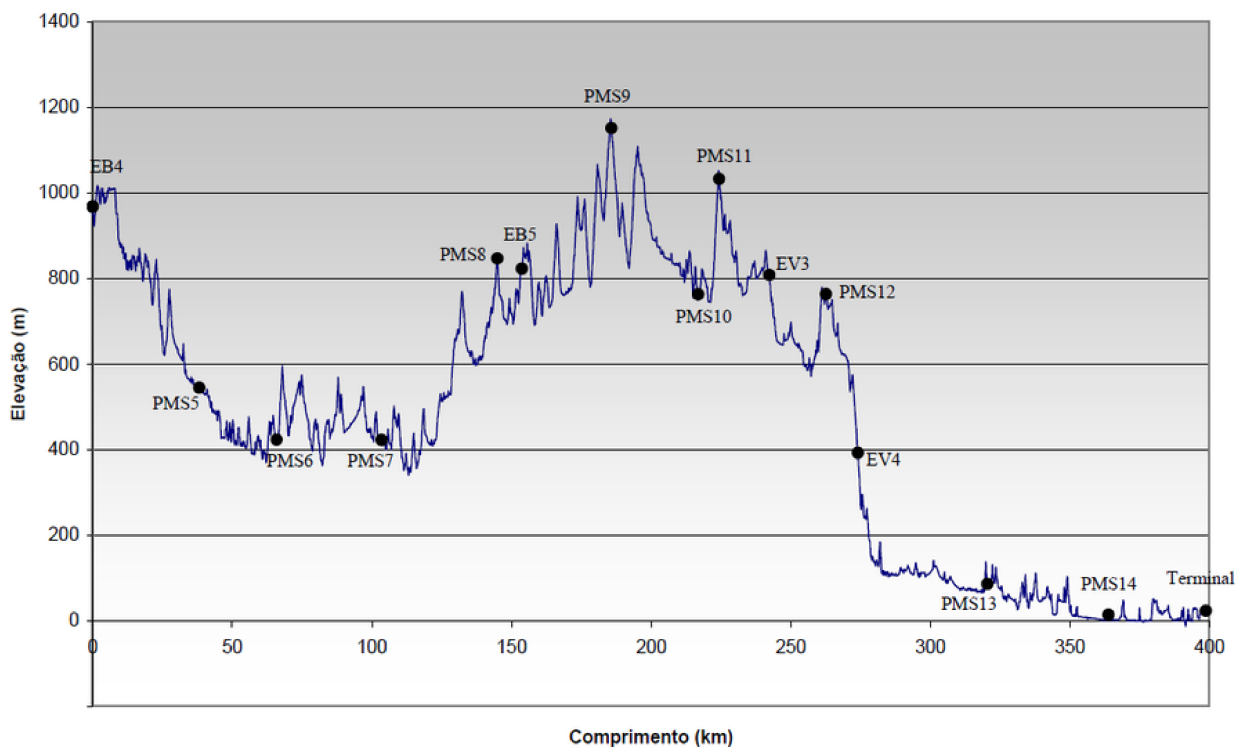
Fonte: SAMARCO (2023).

4.3 Determinação da perda de carga

O mineroduto é segmentado em 18 partes. As seções correspondem ao percurso do mineroduto a partir de cada estação de bombeamento, ou seja, o mineroduto 2 possui duas seções: seção 1, entre EB4 e EB5; e seção 2, entre EB5 e o terminal em Ubu.

Já os trechos são representados entre as estações, incluindo as de válvulas e PMS's. Dessa forma, podemos considerar 4 trechos entre estações: EB4-EB5, EB5-EV3, EV3-EV4 e EV4-Ubu, e 14 trechos fracionados por PMS's, conforme a Figura 48.

Figura 48 – Perfil do mineroduto com os trechos



Fonte: AUSENCO (2014).

O estudo teve início com o cálculo das perdas de carga na seção 1 (EB4 a EB5), devido à menor interferência operacional, em virtude da proximidade com a primeira estação de bombeamento e ausência de válvulas intermediárias.

Os dados históricos de vazão e pressão, gerados pela instrumentação do sistema SCADA, bem como dados de extensão, altura relativa e espessura interna, provenientes de projeto e inspeção interna de Smart PIG's, foram utilizados para calcular a perda de carga no período de janeiro a julho de 2022, utilizando a equação 3.18e, posteriormente, comparadas com a equação 3.26.

Para a proposição do modelo, dados de todas as variáveis citadas no projeto conceitual foram levantados em momentos de estabilidade, ou seja, em períodos sem limitações por pressão máxima, sem deposição de material na linha (após a passagem de PIG de limpeza ou sem tendência de aumento da perda de carga), e em períodos em que a operação estava estável e as variáveis de processo, como vazão, pressão e concentração, estavam controladas.

Esses dados foram levantados via análise de laboratório e sistema SCADA a cada duas horas em um período de 7 meses, no ano de 2022. Foi realizada uma análise de correlação dessas variáveis utilizando o software Minitab e, posteriormente, gerada uma equação de regressão linear em função da perda de carga.

Posteriormente, os dados foram analisados e aplicados até dezembro de 2022, observando a aderência do modelo proposto com a perda de carga medida no sistema. A partir disso, foi possível identificar a tendência de aumento da perda de carga e a necessidade de limpeza da linha com PIG's de limpeza. Por fim, utilizando o teste estatístico T do software Minitab, foi determinado o incremento da vazão após a limpeza do duto e quantificados os ganhos de produção.

4.4 Determinação da velocidade crítica

Para determinar a velocidade crítica foram plotados gráficos de perda de carga em função da velocidade de rotação das bombas. Os dados da perda de carga foram determinados pela equação 3.18, e a velocidade das bombas foi analisada com base no histórico de operação dos CLP's das bombas.

As análises foram feitas com faixas de variação da concentração, uma vez que a baixa variação granulometria não demonstrou influência direta no regime de operação.

5 RESULTADOS

5.1 Análise da polpa

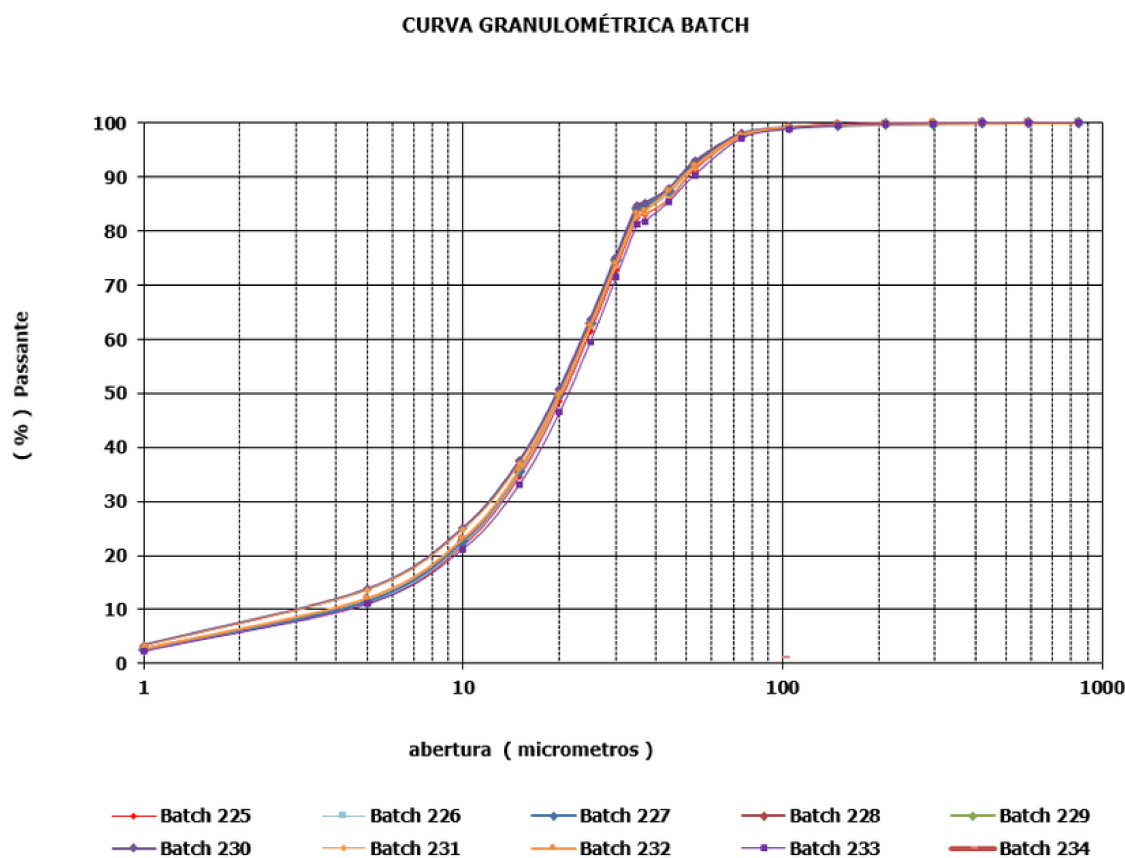
Foram analisadas diariamente as características da polpa do período de janeiro a julho de 2022, a fim de acompanhar os impactos dessas variáveis no processo e na perda de carga.

Os limites máximo e mínimo das variáveis desse capítulo foram estabelecidos com base nas análises definidas pelo processo da empresa. Essa abordagem determina os limites de maneira que o processo seja capaz de atender às especificações do produto final. Dessa forma, os limites foram estabelecidos visando garantir que o produto final seja produzido dentro dos padrões de qualidade exigidos.

Na Figura 49, foram comparadas as curvas granulométricas de diferentes *batches*, ou seja, bateladas de materiais bombeados. Todas as curvas apresentaram um comportamento semelhante, demonstrando baixa variação granulométrica. Isso indica que os diferentes *batches* resultaram em polpas de minério de ferro com características granulométricas consistentes.

Essa uniformidade é altamente desejável no processo de bombeamento, pois garante uma operação mais estável. A baixa variação granulométrica observada também sugere que as etapas de preparação e processamento do minério foram realizadas com precisão e controle adequados, resultando em um produto final com características uniformes ao longo do tempo.

Figura 49 – Curva granulométrica da polpa



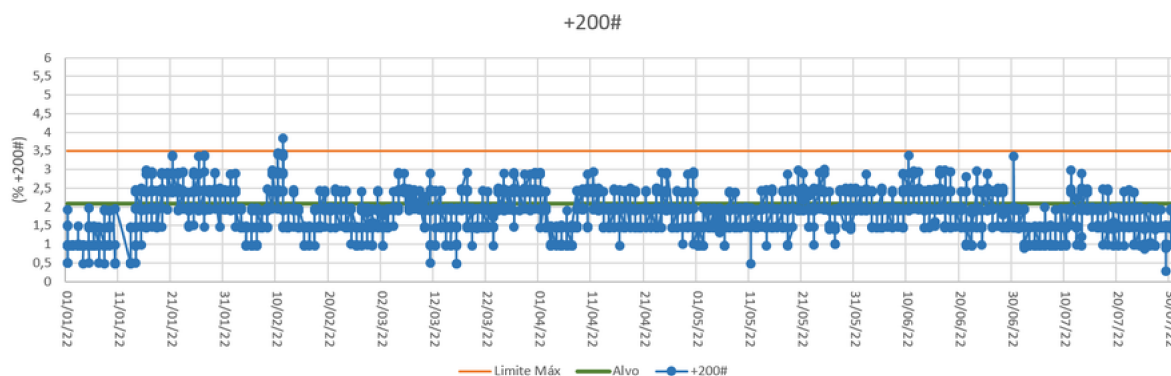
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na análise granulométrica realizada no gráfico da Figura 50, observa-se que a concentração de partículas com tamanho superior a 200# na polpa de minério de ferro apresenta resultados dentro dos limites estabelecidos pelo processo. O limite máximo do processo é de 3,5%, enquanto o alvo é de 2,1%. Os dados coletados variaram de 0,5% a 3,5%, sendo que a maior parte dos valores se concentrou em torno do valor alvo de 2,1%.

Em relação à análise granulométrica das partículas com tamanho inferior a 325# (Figura 51), os resultados também se mantiveram dentro dos limites definidos. O limite mínimo é de 87,4%, enquanto o alvo é de 90,7%. Os dados coletados variaram de 97% a 87,4%, indicando que a maioria dos valores está acima do valor alvo de 90,7%.

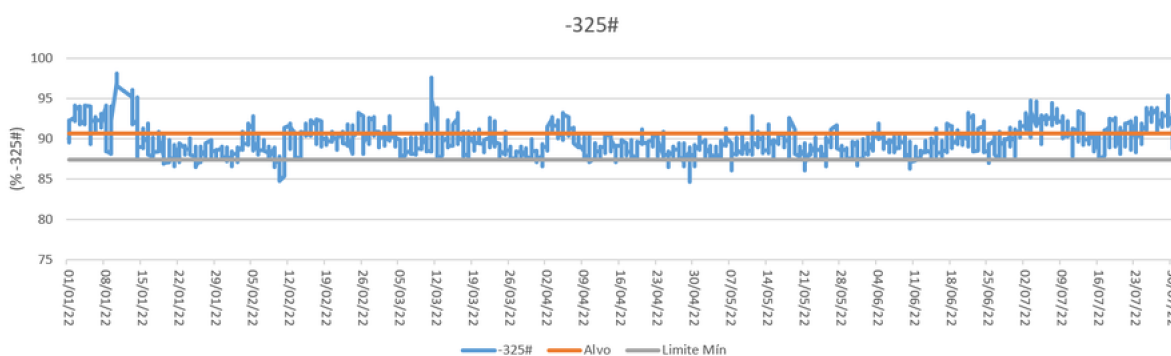
Conforme os resultados apresentados de granulometria, a polpa de minério de ferro analisada apresenta característica de fluxo homogêneo devido aos tamanhos das partículas serem finos. A concentração de partículas de tamanho superior a 200# e inferior a 325# encontra-se dentro dos limites estabelecidos e apresentam baixa variação, indicando uma distribuição adequada das partículas na polpa.

Figura 50 – Análise granulométrica +200#



Fonte: Elaborado pelo autor.

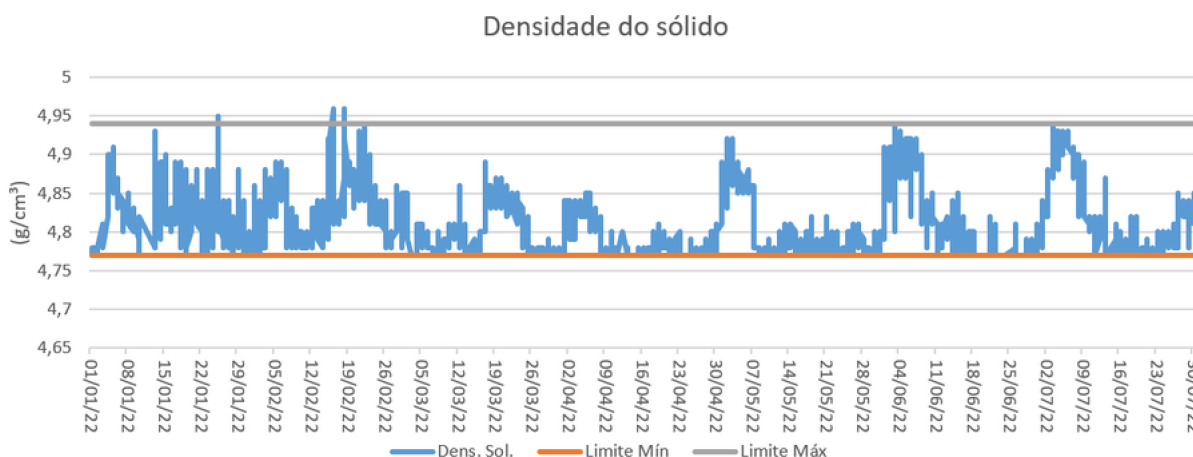
Figura 51 – Análise granulométrica -325#



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a variação da massa específica do sólido (Figura 52), observou-se que os dados coletados apresentaram uma faixa de variação de 4,77 g/cm³ a 4,85 g/cm³, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos de 4,77 g/cm³ a 4,94 g/cm³. Essa baixa variação indica uma consistência significativa na densidade do sólido ao longo do transporte no mineroduto, o que é fundamental para garantir um fluxo uniforme e evitar problemas de obstrução ou perda de eficiência.

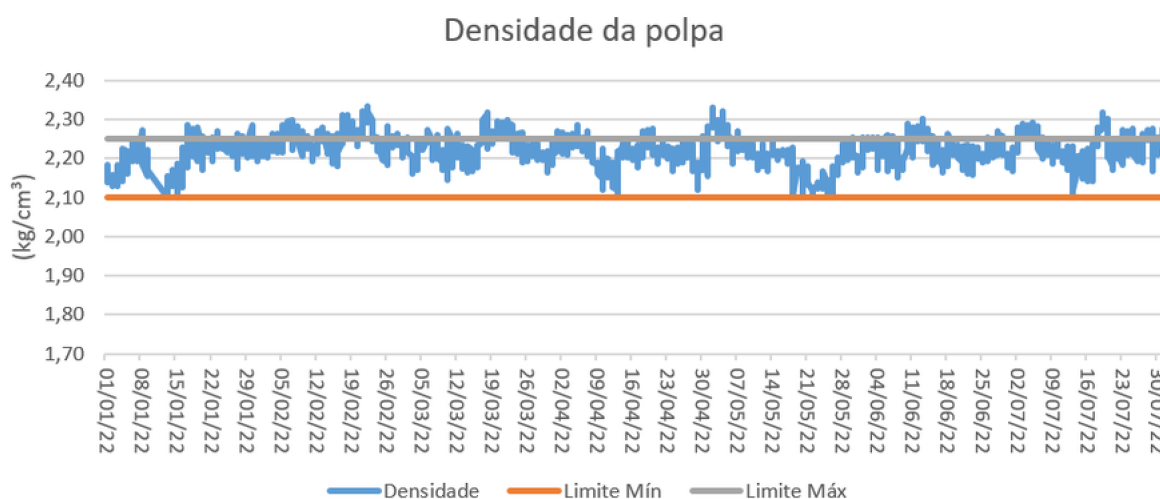
Figura 52 – Variação da massa específica do sólido



Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma, a variação da massa específica da polpa foi analisada e constatou-se que os resultados variaram de 2,10 kg/cm³ à 2,30 kg/cm³, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos de 2,10 kg/cm³ à 2,25 kg/cm³ (Figura 53). Essa estreita faixa de variação indica que a densidade da polpa se manteve adequada durante o transporte, contribuindo para a manutenção das partículas em suspensão e evitando problemas de sedimentação ou diluição indesejada.

Figura 53 – Variação da massa específica da polpa

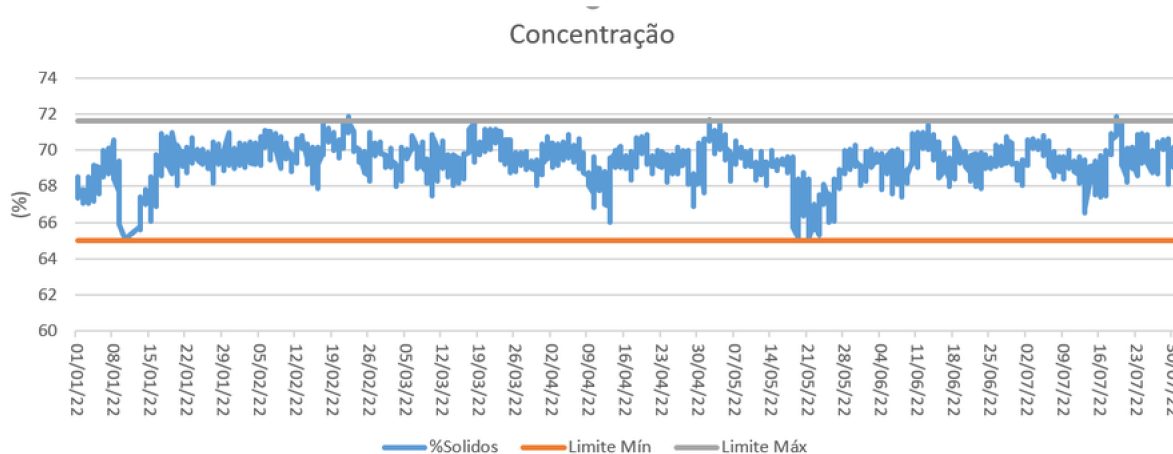


Fonte: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito à concentração de sólidos em massa (Figura 54), observou-se uma variação entre 67% e 72%, dentro dos limites de processo estabelecidos de 64% a 72%. Embora essa variação seja considerada relativamente alta, ainda está dentro dos

limites aceitáveis, garantindo que a concentração de sólidos tenha sido mantida em níveis adequados para o transporte eficiente no mineroduto.

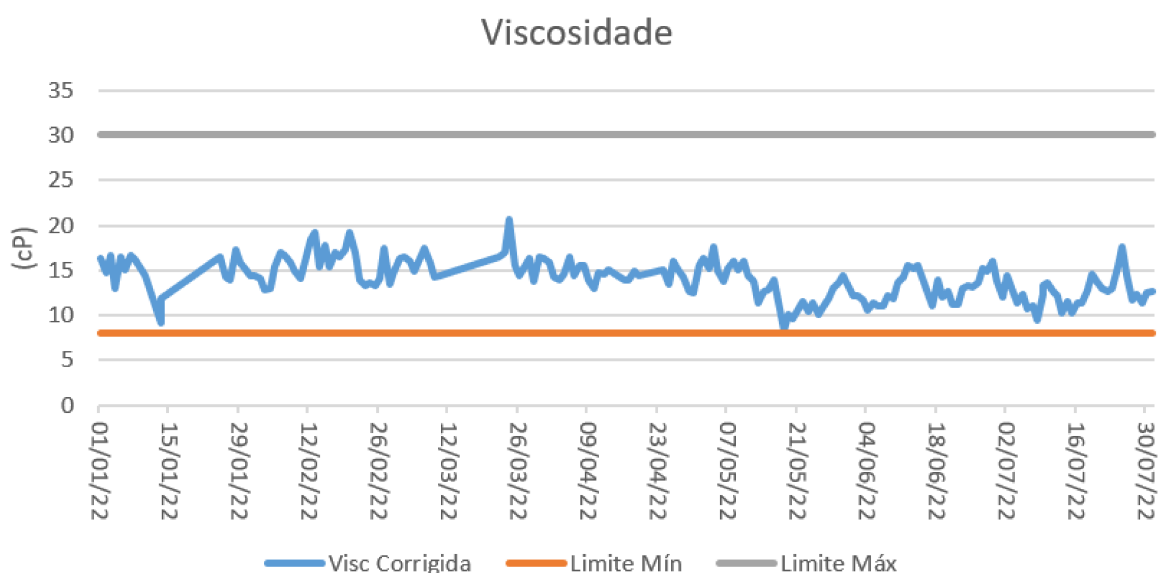
Figura 54 – Variação da concentração



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da viscosidade revelou que os resultados variaram de 8 cP a 20 cP, permanecendo dentro dos limites estabelecidos de 8 cP e 30 cP (Figura 55). Essa faixa de variação indica que a viscosidade da polpa se manteve em níveis adequados.

Figura 55 – Variação da viscosidade

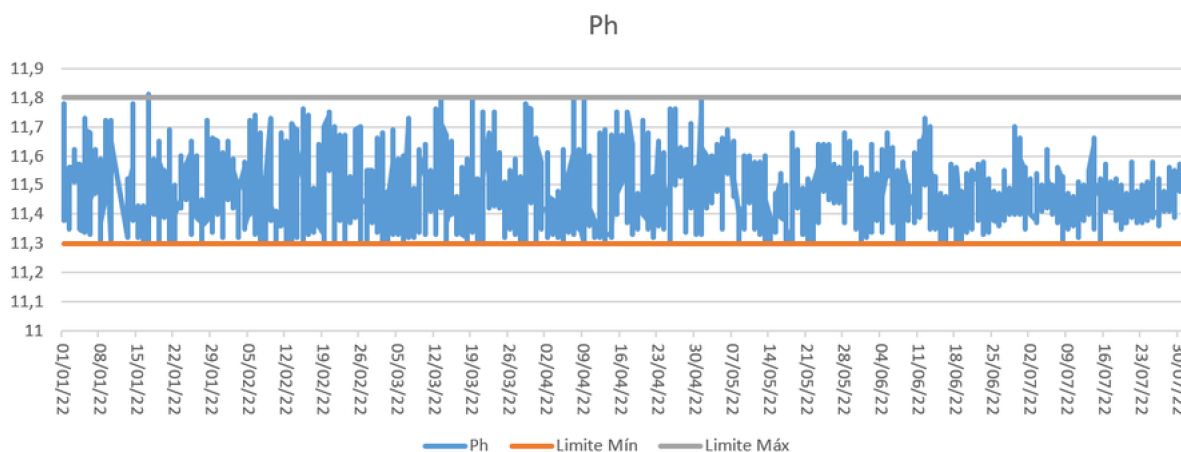


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar-se o nível do pH na polpa de bombeada, as variações predominantemente estavam entre 11,6 e 11,3, mantendo-se dentro dos limites

estabelecidos de 11,3 a 11,8, com um alvo de 11,5, ou seja, dentro da zona de passivação do aço e dentro dos limites de controle da dosagem de cal. (Figura 56).

Figura 56 – Variação do pH



Fonte: Elaborado pelo autor.

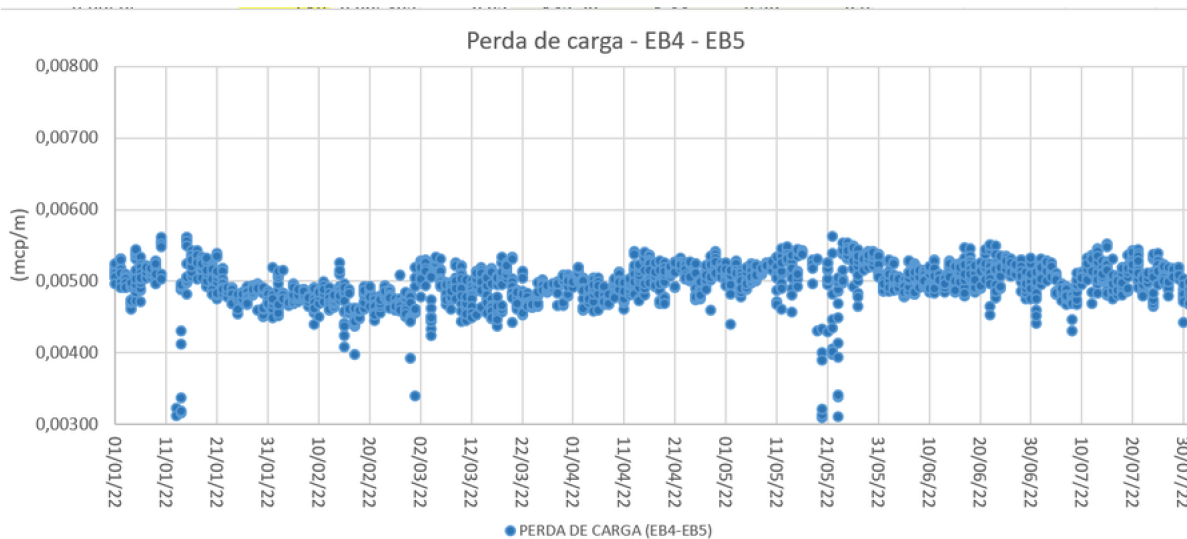
De modo geral, a granulometria, o pH e a viscosidade não apresentam grandes variações no processo. Já as densidades e concentração oscilam conforme o desempenho da usina de beneficiamento, mas permaneceram dentro dos limites estabelecidos operacionalmente.

5.2 Análise da Perda de Carga

Após a geração do histórico de dados da perda de carga, foi possível observar que os pontos dos trechos 1 (EB4-PMS5), 2 (PMS5-PMS6), 3 (PMS6-PMS7), 4 (PMS7-PMS8) e 5 (PMS8-EB5) compõem a perda de carga da seção 1. Dessa forma, quando aplicada a equação 3.18, elas apresentaram comportamentos similares, mas valores distintos devido à variação da cota geométrica, como pode ser visto nas Figura 57 e Figura 58.

A equação 3.18 aplicada a sistemas de bombeamento de polpa, consiste em determinar a perda de carga em dois pontos. Coletaram-se as medidas de pressão e cota geométrica no ponto inicial EB4 e, em seguida, determinou-se a diferença com as medidas correspondentes no ponto final, ou seja, EB5 para a figura 57 e PMS5 para a figura 58. Posteriormente, essa diferença de pressões foi dividida pela massa específica da polpa, resultando nos metros de coluna de polpa (mcp) obtidos.

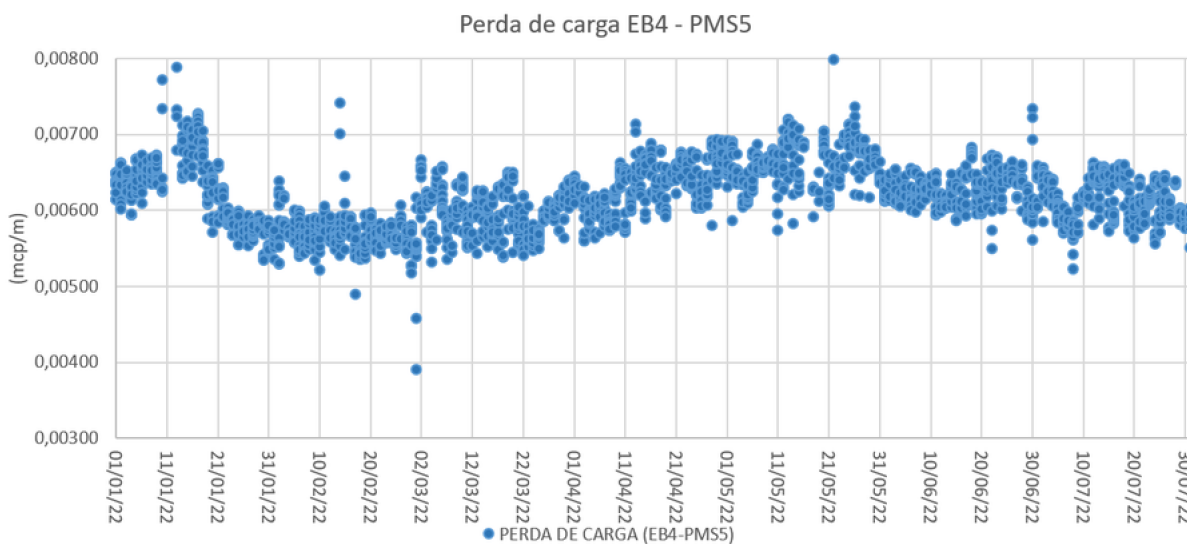
Figura 57 – Perda de Carga EB4 - EB5



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pontos de queda da perda de carga nos dias 11/01/22, 02/03/22 e 21/03/22 na Figura 57, foram ocasionados por erro de leitura do sistema SCADA.

Figura 58 – Perda de Carga EB4 - PMS5



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 11 é possível observar a média da perda de carga dos trechos da seção 1, aplicada no mesmo período mostrado anteriormente, em metros de coluna de polpa (mcp):

Tabela 11 – Perda de carga média dos trechos da seção1.

Trecho	EB4	PMS5	PMS6	PMS7	PMS8	EB4
	PMS5	PMS6	PMS7	PMS8	EB5	EB5
Perda de carga (mcp/m)	0,006204	0,004852	0,004562	0,004318	0,005252	0,004974

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o aumento da perda, supõe-se haver deposição de material na linha e, conseqüentemente, isso indica a necessidade de limpeza com os PIG's. Contudo, quando analisada individualmente, a tendência dos gráficos pode evidenciar uma necessidade de limpeza nos quais não ocorre deposição de material.

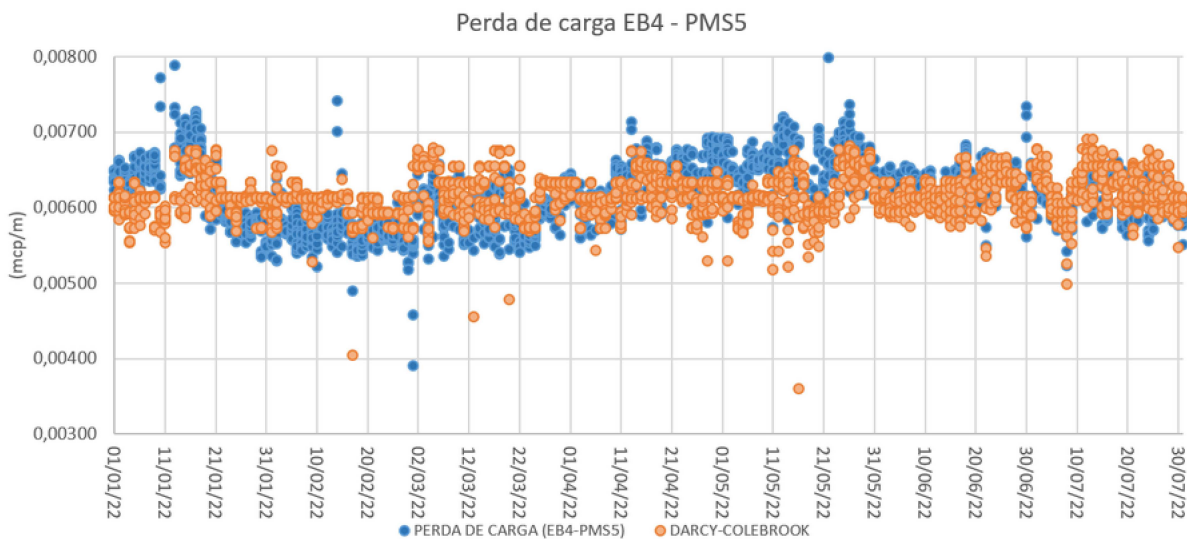
A perda de carga está relacionada diretamente com a velocidade e a vazão da polpa na linha, assim, caso haja um aumento do fluxo bombeado, a perda de carga acompanha essa tendência, mas não necessariamente ocorre deposição de material na linha, e, sim, maior interação, das partículas com a parede da tubulação causando atrito.

Sendo assim, faz-se necessário acompanhar a evolução da perda de carga em função da vazão. Para isso, inicialmente foi utilizada a equação 3.26, para determinar qual a perda de carga esperada para o duto de acordo com suas características e conforme a variação da velocidade de escoamento.

Quando analisada trecho a trecho com até 40 km de extensão, a equação apresentou uma relação coerente com a perda de carga real do sistema. Na Figura 59, são apresentados os valores da perda de carga real (cor azul) e a perda de carga calculada (cor laranja): pode-se observar que ambas estão sobrepostas demonstrando que a curva da perda de carga real está dentro dos limites esperados para determinada velocidade de bombeamento.

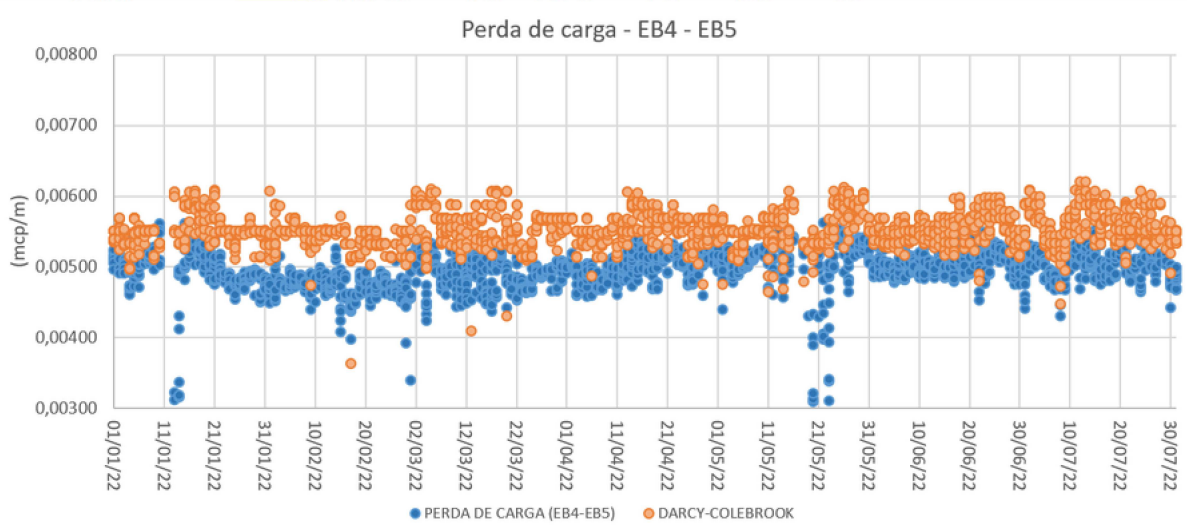
Contudo, quando aplicada para a seção 1 na totalidade (Figura 60), apresentou certa discrepância devido ao aumento da extensão da tubulação e à grande variação da rugosidade e do diâmetro interno, variáveis da equação 3.26. Para esse cálculo foram utilizadas as médias dessas variáveis (Figura 61 e Figura 62).

Figura 59 – Perda de carga em função da equação de Darcy-Colebrook EB4 - PMS5



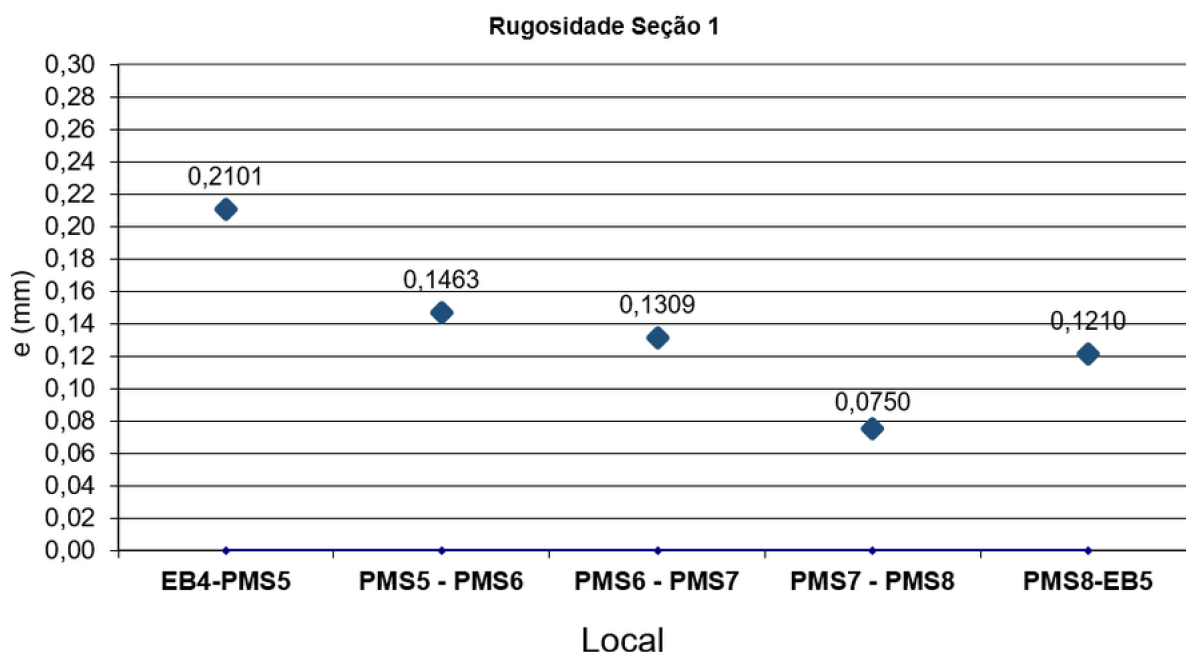
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 60 – Perda de carga em função da equação de Darcy-Colebrook EB4 - EB5



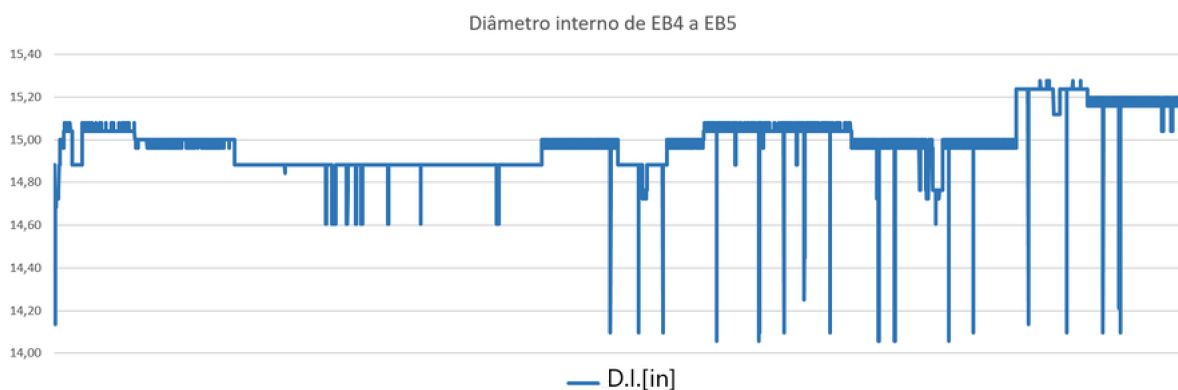
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61 – Variação da rugosidade na seção 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 – Variação do diâmetro interno na seção 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Figura 60, é possível interpretar que a perda de carga está controlada uma vez que os pontos da perda medida real (cor azul) estão abaixo dos pontos da equação 3.26 de Darcy-Colebrook (cor laranja). Essa divergência ocorre devido à utilização da média das variáveis para grande extensão de duto, proporcionando assim, uma análise equivocada que pode evidenciar o aumento da perda de carga ou até mesmo provocar redução do diâmetro da tubulação por excesso de incrustação e falta de limpeza.

Dessa forma, foi proposto um modelo de regressão linear, considerando as variáveis reais do processo. Foram coletados dados operacionais em momentos de estabilidade, ou

seja, em períodos sem limitações por pressão máxima, e em períodos sem deposição de material na linha (após a passagem de PIG de limpeza ou sem tendência de aumento da perda de carga), e períodos que a operação estava estável e as variáveis de processo como vazão, pressão e concentração estavam controladas. Esses dados, foram coletados a cada duas horas, em um período de 7 meses, no ano de 2022.

Para determinar a regressão, foi inicialmente usado o software Minitab para calcular o grau de correlação das variáveis levantadas com a perda de carga. A vazão foi a única variável que apresentou correlação direta estatisticamente, com uma taxa de 0,735 (Figura 63), isto é, uma correlação forte de acordo com a Tabela 12 de correlação estatística. Essa análise foi realizada com o intuito de determinar se a amostra de 4.238 dados utilizada estava dentro das características desejadas, desconsiderando erros instrumentais.

Figura 63 – Análise de correlação

Método

Tipo de correlação	Pearson
Número de linhas usadas	4238 para 4358

Correlação

	Perda de carga EB4 -EB5	Concentração
Concentração	-0,011	
Vazão	0,735	0,715

Fonte: Elaborado pelo autor com emprego do software Minitab.

Tabela 12 – Tabela de correlação.

Valor da correlação (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Uma correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Uma correlação fraca
0,40 a 0,69	Uma correlação moderada
0,70 a 0,89	Uma correlação forte

Valor da correlação (+ ou -)	Interpretação
0,90 a 1,00	Uma correlação muito forte

Fonte: Adaptado de Montgomery et al. (2021).

A partir disso, foi possível chegar na seguinte equação, usando a regressão linear para perda de carga versus vazão:

$$J = 0,000638 + 0,000007.Q \tag{5.1}$$

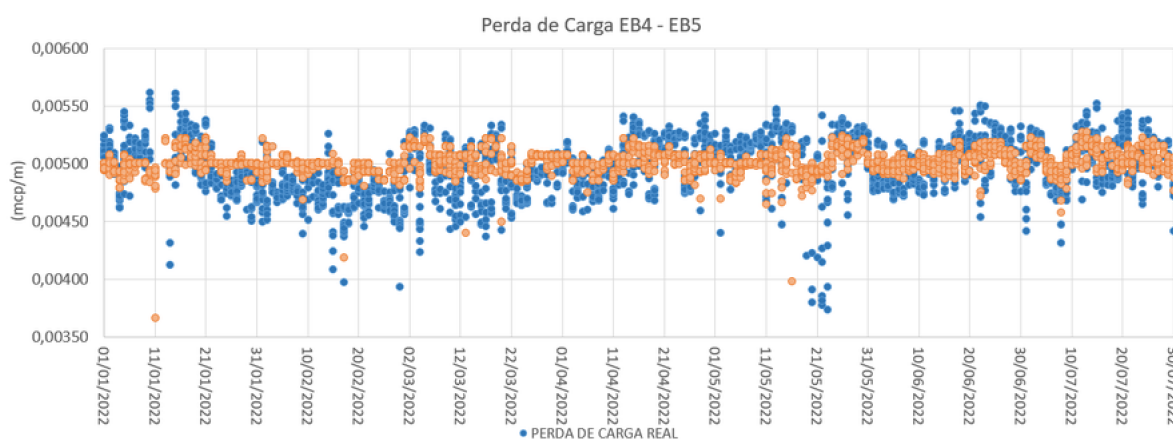
Onde:

J = Perda de carga linear (mcp/m);

Q = Vazão (m³/h).

Aplicando a equação calculada no gráfico da perda de carga real Figura 64, pode-se observar uma relação aderente à realidade.

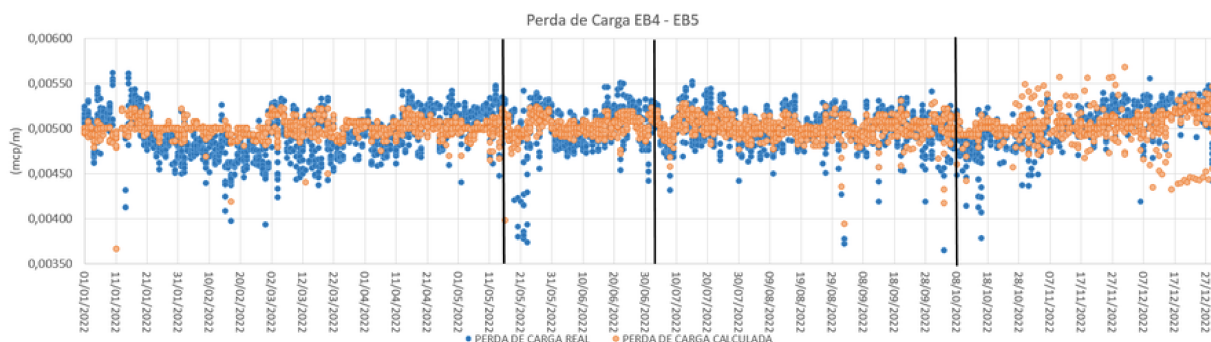
Figura 64 – Perda de carga em função da regressão linear EB4 - EB5



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a determinação da equação, utilizada ao longo do ano de 2022, a mesma demonstrou um bom desempenho ao indicar a tendência de aumento da perda de carga linear e se adequar à perda real. Na Figura 65, observa-se as barras que sinalizam a passagem de PIG's de limpeza para o controle da perda de carga em momentos de tendências de aumento, bem como a efetividade da limpeza devido à queda da perda após as campanhas dos PIG's.

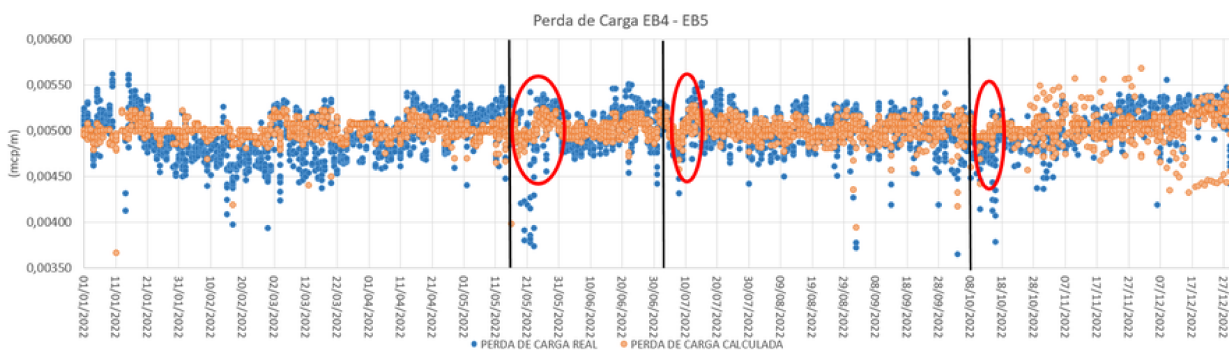
Figura 65 – Controle da perda de carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo após a redução da perda de carga linear ocasionada pela passagem sequencial dos PIGs de limpeza, é observada uma elevação no gráfico da Figura 66. Esse aumento está associado ao incremento na vazão decorrente da diminuição da obstrução na linha, resultando, consequentemente, em uma perda de carga por atrito. No presente contexto, essa perda de carga por atrito não é considerada prejudicial ao sistema, uma vez que está acompanhada por ganhos de produção.

Figura 66 – Incremento da vazão após o PIG



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao realizar uma comparação estatística entre a vazão antes e depois da passagem do PIG de limpeza, representada pela Figura 67, obtém-se os seguintes resultados:

Figura 67 – Análise estatística para incremento da vazão após o PIG

WORKSHEET 1

Teste T para Duas Amostras e IC: Vazão EB5 MES; Diferenciação**Método** μ_1 : média de população de Vazão EB5 MES quando Diferenciação = Antes dos pigs μ_2 : média de população de Vazão EB5 MES quando Diferenciação = Após pigsDiferença: $\mu_1 - \mu_2$ *Não assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.***Estatísticas Descritivas: Vazão EB5 MES**

Diferenciação	N	Média	DesvPad	EP	Média
Antes dos pigs	255	628,32	4,65		0,29
Após pigs	316	640,31	6,65		0,37

Estimativa da diferença

IC de 95% para a	
Diferença	Diferença
-11,981	(-12,912; -11,049)

TesteHipótese nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ Hipótese alternativa $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor-T	GL	Valor-p
-25,27	558	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor com emprego do software Minitab.

Dessa forma, pode-se notar um incremento pontual de 11,98 m³/h na vazão após a passagem do PIG de limpeza, que corresponde a diferença entre a média da vazão antes do PIG 628,32 m³/h e a média da vazão após o PIG 640,31 m³/h, com intervalo de confiança entre 12,9 m³/h a 11,0 m³/h. Levando em consideração a massa específica de 2.220 kg/m³ e a concentração de sólidos na polpa de 69,45%, os ganhos de produção correspondem a 13.299 toneladas métricas secas no mês. Calculados a partir da equação 3.31 abaixo:

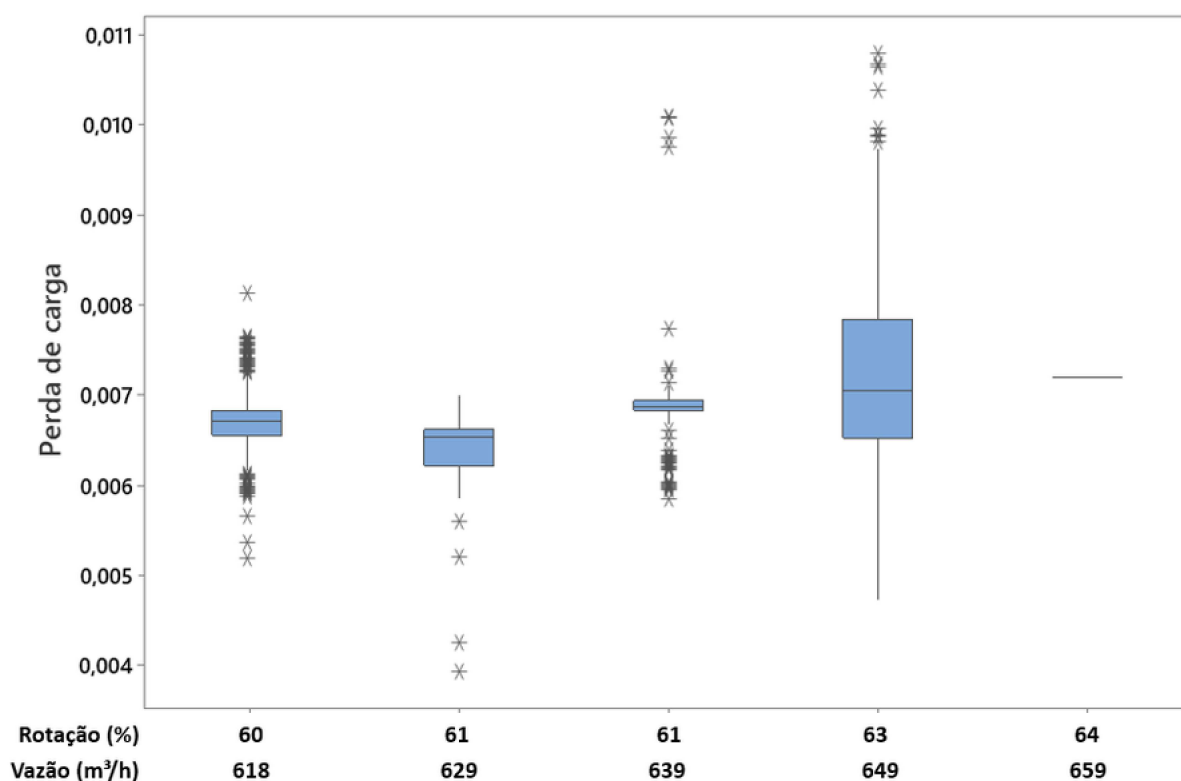
$$\text{Ganho} = 11,98 \times 2; 22 \times 0,6945 \times (24 \times 30) = 13,299 \text{ tms/mês}$$

5.3 Análise da velocidade

Para melhor compreender as causas do aumento da perda de carga em certos momentos, foram analisados o comportamento da variação da velocidade das bombas em função da perda de carga. Para isso, foram traçados gráficos utilizados na determinação da velocidade crítica, modelo mais empregado para analisar essa velocidade com diferentes faixas de granulometria. Contudo, devido à baixa variação granulométrica da polpa apresentada anteriormente (Figura 50 e Figura 51), foi considerada para o estudo uma análise em função da concentração da polpa.

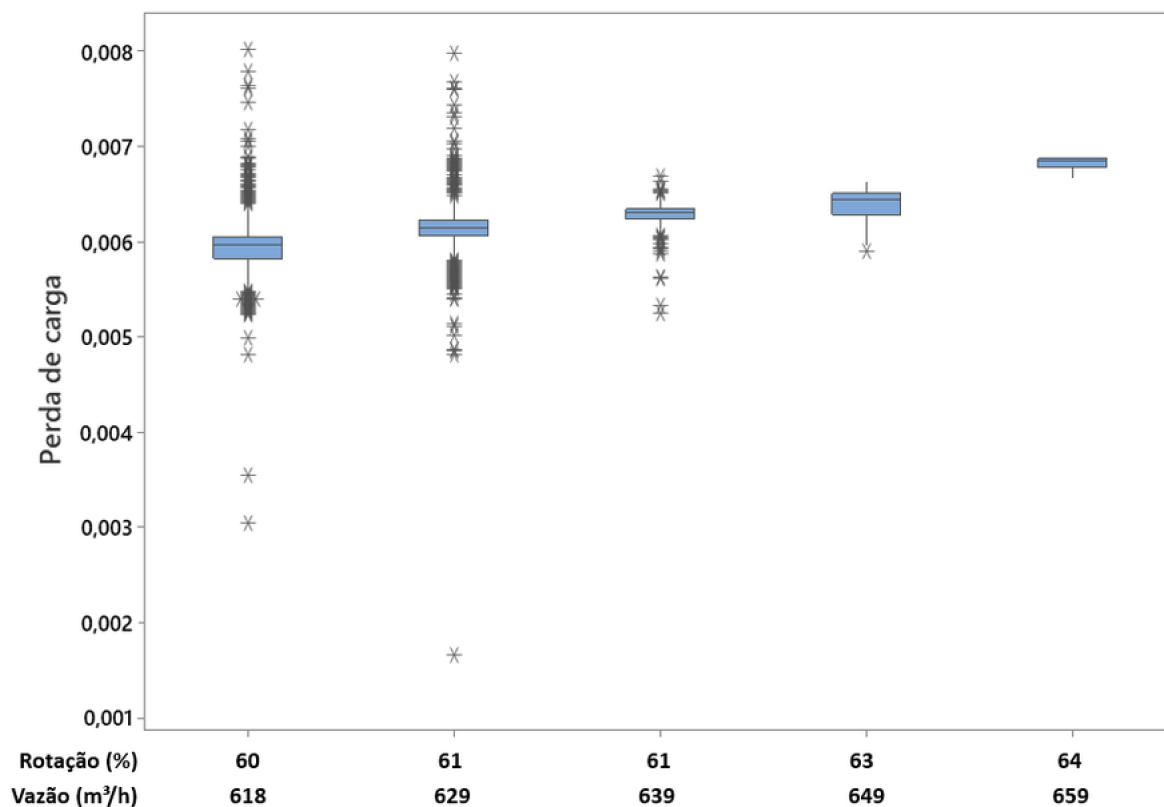
Em condições normais, o mineroduto opera com três bombas principais, com velocidades que variam de 59% a 64%. Quando uma delas entra em manutenção, a velocidade das outras duas é aumentada para compensar a vazão, operando em uma faixa de 86% a 90%. Tomando como base o valor da concentração média de 69,5% de sólidos na polpa, a velocidade crítica de deposição é encontrada com as bombas na velocidade abaixo de 59%. Contudo, ao segmentar a concentração em faixas de percentual de sólidos, essa velocidade apresentou comportamentos diferentes (Figura 68 e Figura 69).

Figura 68 – Amostra coletada para concentração abaixo de 69% de sólidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

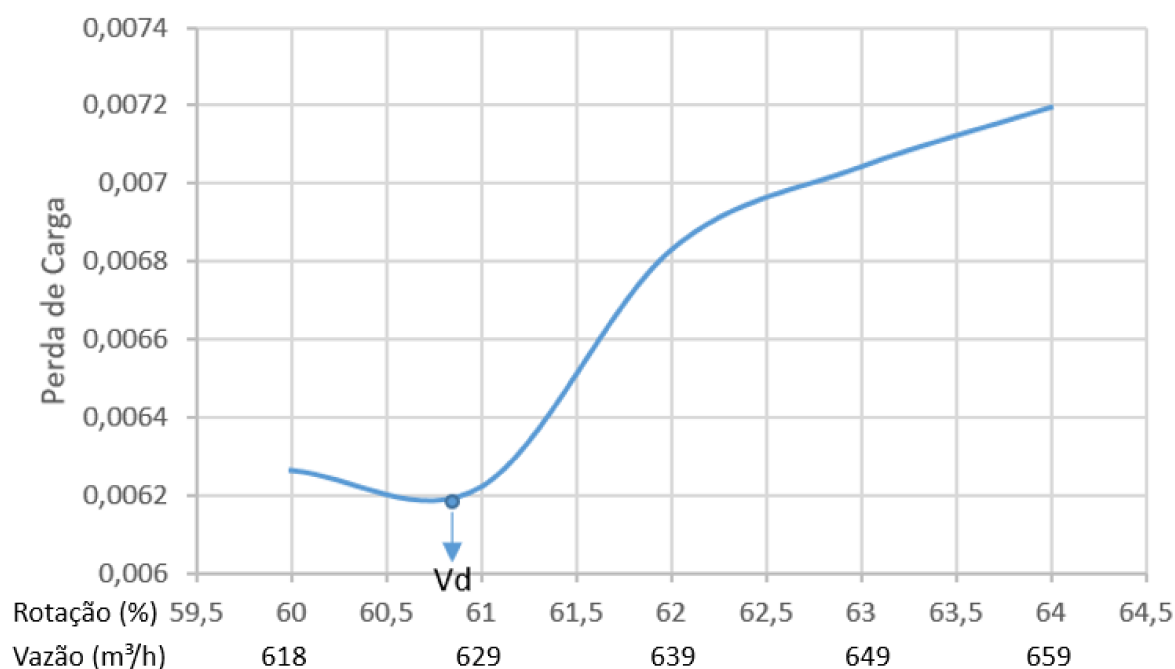
Figura 69 – Amostra coletada para concentração acima de 69% de sólidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

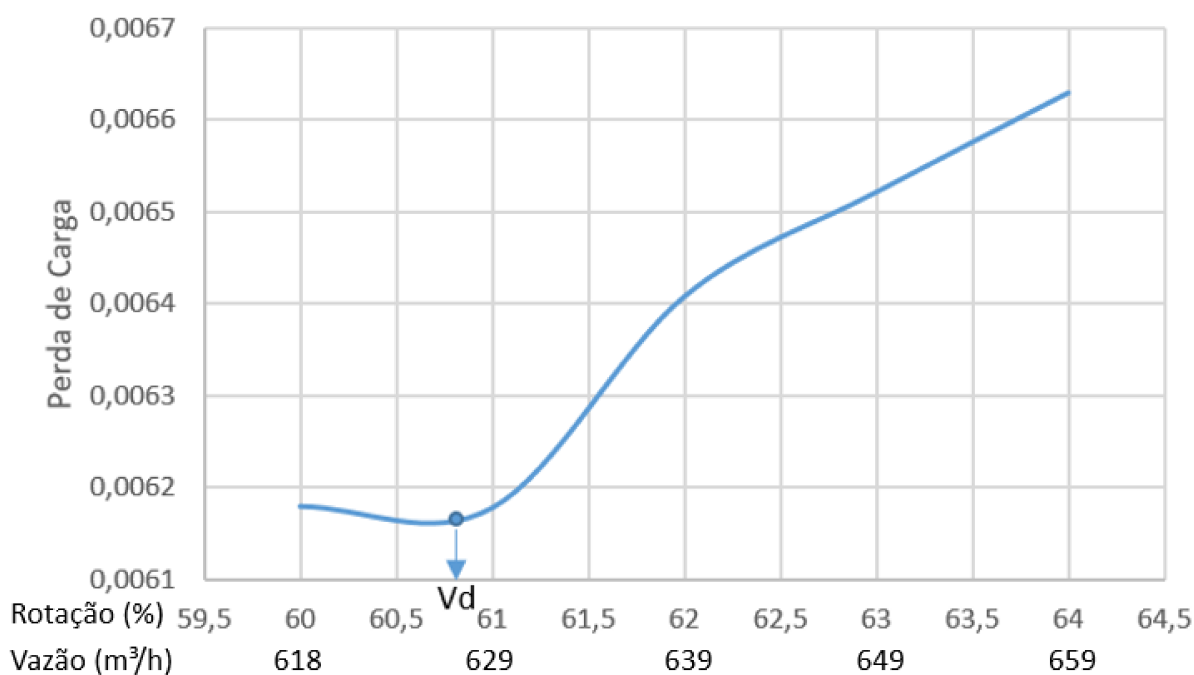
Para uma faixa de concentração de 65% a 67% e 67% a 69% de sólidos, a velocidade crítica de deposição é encontrada com as bombas na velocidade abaixo de 61% (Figura 70 e Figura 71).

Figura 70 – Faixa de 65% a 67% de Sólidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 71 – Faixa de 67% a 69% de Sólidos

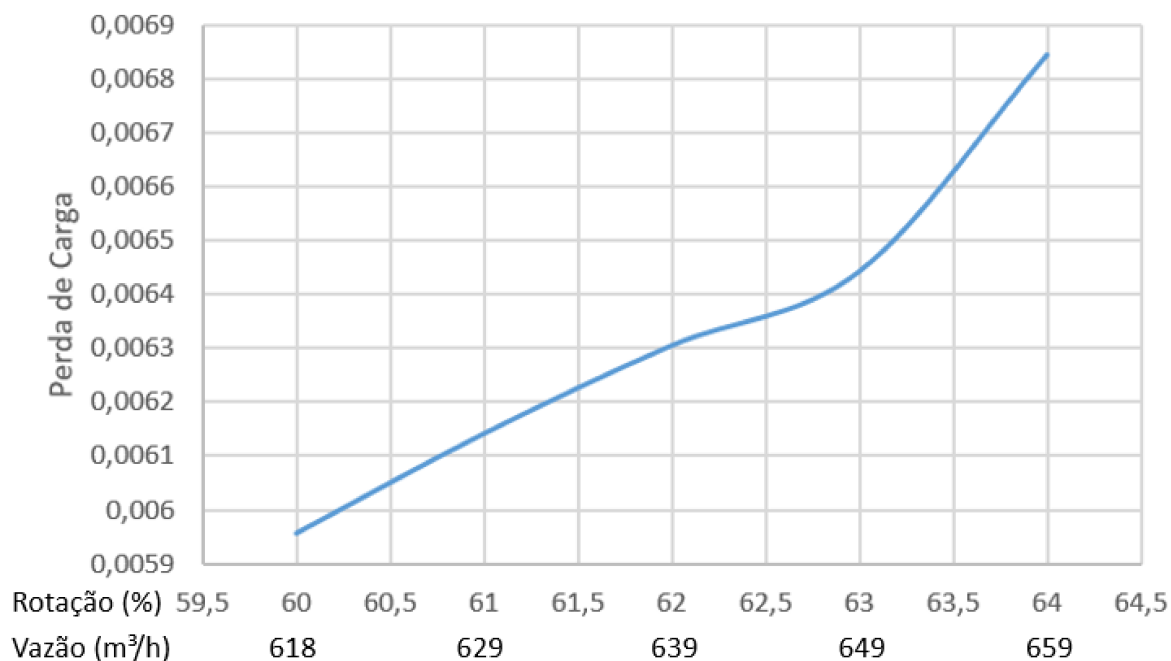


Fonte: Elaborado pelo autor.

Aumentando a concentração para uma faixa de 69% a 71% de sólidos, a velocidade crítica de deposição é encontrada abaixo dos limites de velocidade das bombas utilizadas

atualmente. No projeto, essa velocidade correspondia a 59% da velocidade das bombas (Figura 72).

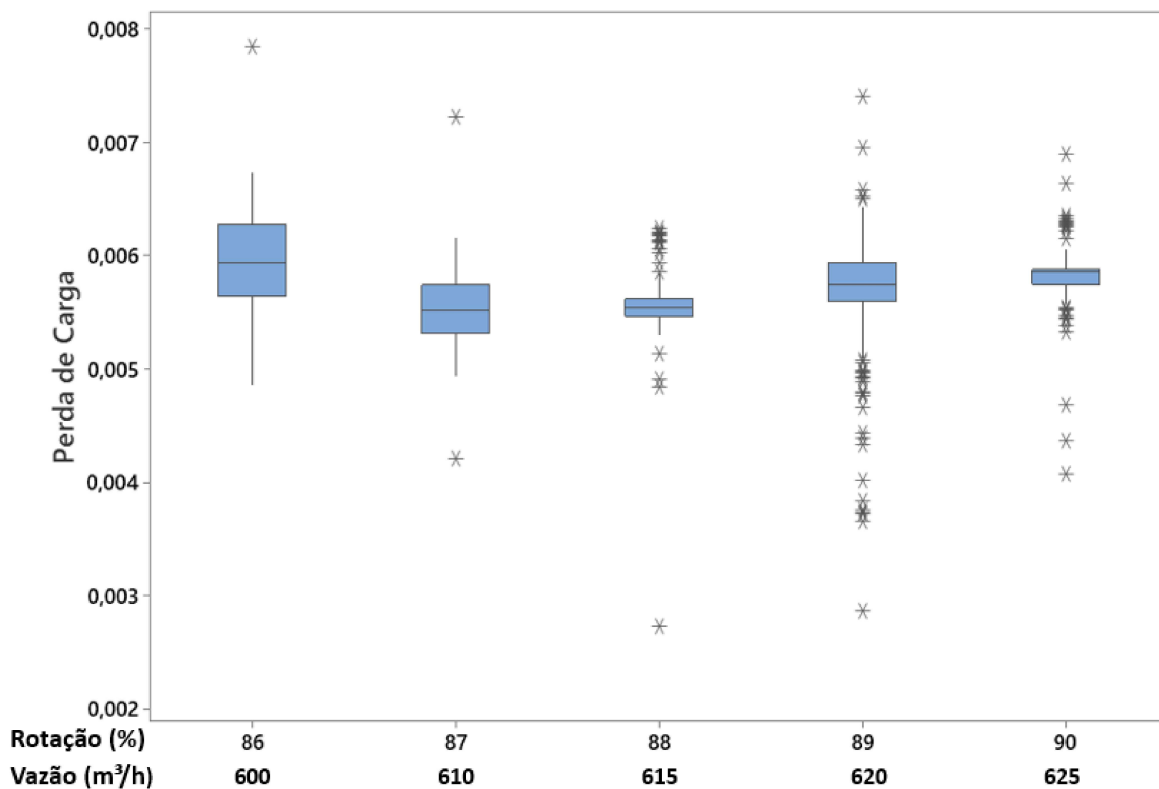
Figura 72 – Faixa de 69% a 71% de Sólidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

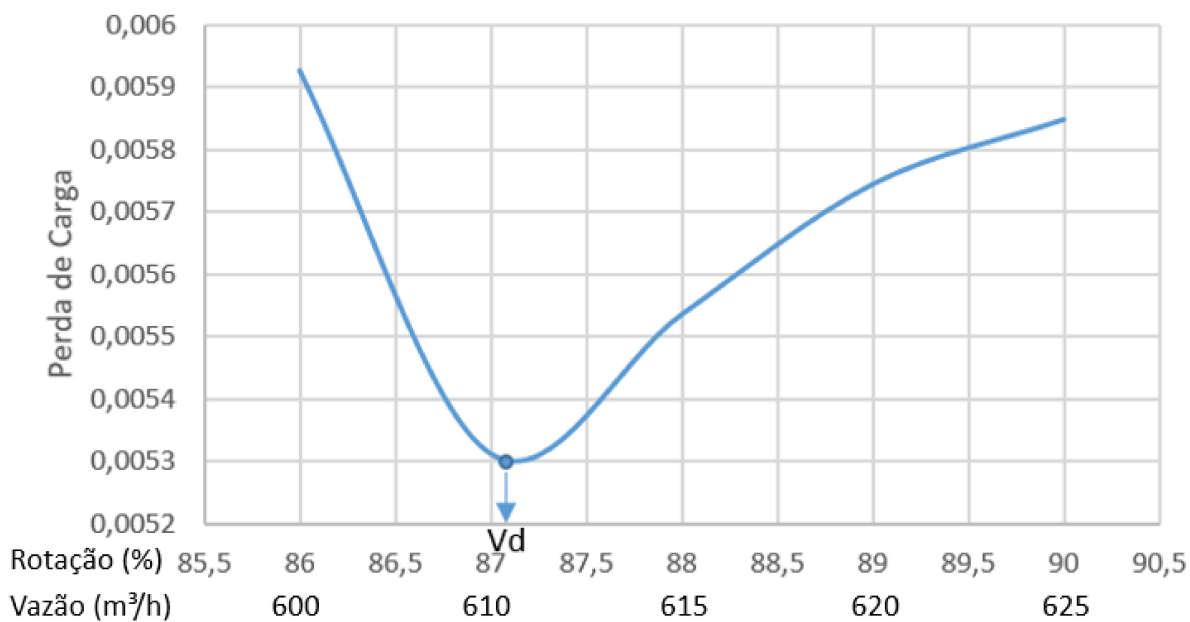
Já em momentos de parada para manutenção de uma das bombas, ou seja, na operação com duas bombas, podemos observar uma velocidade crítica de deposição abaixo de 87% (Figura 73 e Figura 74).

Figura 73 – Amostra coletada para duas bombas em operação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 74 – Análise para duas bombas em operação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar, portanto, que, à esquerda do ponto de velocidade crítica de deposição (V_d), a perda de carga aumenta em função da deposição do material na tubulação, e, à direita, em função do atrito das partículas no duto devido ao aumento da vazão. A segunda é aceitável, tendo em vista os ganhos com aumento da produção que compensam a perda de carga, já a primeira implica em baixa produção e aumento da perda de carga.

De forma resumida, para evitar deposição de material na linha por baixa velocidade:

- Para concentração de 65% a 69% de sólidos - deve-se operar com às três bombas com velocidade acima de 61%;
- Quando somente duas bombas estiverem em operação - deve-se operar com as bombas com velocidade acima de 87%.

Desse modo, ao aplicar essa análise como premissa, a perda de carga tende a ficar mais controlada e seguir a tendência da equação apresentada anteriormente.

6 CONCLUSÃO

A análise do comportamento das partículas em dutos é um processo complexo e altamente variável, especialmente em operações envolvendo polpa de minério de ferro. As múltiplas características da polpa, assim como as variáveis operacionais do bombeamento, tornam difícil prever com precisão a perda de carga.

Os modelos atualmente utilizados para determinar a perda de carga são normalmente aplicados em projetos de minerodutos, mas não levam em consideração variáveis importantes durante a operação, o que limita sua eficácia. Cada modelo possui suas particularidades, e cabe ao engenheiro determinar qual deles se adéqua melhor às condições do processo em questão.

Além disso, no caso de dutos de longa distância, calcular a média das variáveis do processo nas equações nem sempre reflete a condição real do duto, podendo levar a resultados inconsistentes ou até mesmo a situações que não correspondem à realidade. O modelo de Darcy-Colebrook tem mostrado bom desempenho em dutos com extensões de até 40 km e baixa variação na rugosidade, mas essa é uma condição restrita que não se aplica à maioria dos minerodutos.

O modelo proposto é baseado nas condições desejadas para a operação, levando em consideração o histórico do mineroduto. As variáveis do processo são aplicadas de forma indireta, pois representam as condições operacionais reais. A vantagem desse modelo é sua praticidade nos cálculos, porém é necessário ter pelo menos um ano de histórico de operação do mineroduto.

A partir da análise de correlação, foi possível determinar que a vazão é a variável do processo que tem impacto direto na perda de carga. Assim, ao estabelecer uma equação de regressão linear a partir da vazão, foi possível comparar o modelo proposto com a perda de carga real. À medida que as curvas geradas por ambas as equações se distanciavam, supôs-se que houvesse deposição de material na linha. Em seguida, foram realizadas limpezas com a passagem dos PIGs de forma corretiva. A efetividade da limpeza pôde ser evidenciada, com o acréscimo da vazão em 11,98 m³/h logo após a passagem do PIG, resultando em um ganho pontual de produção de 13.299 tms no mês.

Outro fator importante foi determinar as velocidades críticas de operação com base em diferentes faixas de concentração de sólidos. Com base nesse estudo, foi possível identificar que, para concentrações de sólidos abaixo de 69%, a velocidade das bombas deve ser acelerada, ficando com a rotação acima de 61% para operação com 3 bombas e acima de 87% para operação com 2 bombas. Dessa forma, foram estabelecidos parâmetros para controlar a perda de carga por deposição de material de forma preventiva, a partir do controle da velocidade do bombeamento.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar a influência da característica química do minério de ferro no comportamento da perda de carga e nas condições de bombeamento da polpa, verificando se o aumento ou a redução de componentes como sílica (SiO_2) podem favorecer a suspensão ou deposição das partículas no interior do duto.

Referências

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 3310-1:2018: Peneiras de ensaio: Parte 1: **Especificação Técnica e Verificação**, Rio de Janeiro, 2018.
- ABULNAGA, B. (ed.). **Slurry Systems Handbook**. 2. ed. New York: MC Graw Hill, 2021. 913 p.
- ADEYEMO, S. A. *et al.* Ultrasonic Pigging Technology for Pipeline Inspection: A Review. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 165, p. 1029–1042, 2018.
- AMSE. **Fluid Meters: Their Theory and Application**. 6. ed. [S.l.]: ASME, RCFM, 1971. 273 p.
- AUSENCO PSI. **Filosofia Operacional e de Controle do Mineroduto 2**: Samarco. Belo Horizonte: [s.n.], 2012.
- BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WATER, S. R. F. K. (ed.). **An Introduction to Rheology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 1993. 201 p.
- BINGHAM, E. C. An Antithixotropic Viscosity. **Journal of General Physiology**, v. 4, n. 4, p. 437–440, 1922.
- BISHNOI, S.; DAS, S. K.; RAMAMURTHY, K. Mineral slurry pipeline transportation. **Minerals Engineering**, v. 75, p. 53–73, 2015.
- BRAGANÇA, A. C. C. R. **Avaliação de Reagentes Alternativos para Substituição da Cal em Sistema de Bombeamento de Longa Distância de Polpa de Minério de Ferro**. 2008. 116 p. Dissertação (Programa Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) — Universidade Federal de Minas Gerais.
- BRAGANÇA, A. C. C. R.; BRANDÃO, P. R. G. Avaliação de reagentes alternativos para a cal no transporte de polpa de minério de ferro via mineroduto. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, ABM, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 1–5, 2011.
- BRUM, S. M. **Influência Da Granulometria, Concentração De Sólidos E Composição Mineralógica Nas Propriedades Reológicas E Variáveis De Transporte De Polpa De Bauxita Por Mineroduto**. 2017. 192 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) — Universidade Federal do Pará.
- BURDUKOVA, E. *et al.* Relationship between slurry rheology and its mineralogical content. **Proceedings of the 24th International Mineral Processing Congress, Beijing, China**, p. 24–28, 2008.
- CAPUTO, H. P. A Unified Approach to the Determination of Particle Size and Specific Surface as Complementary Parameters for Particle Characterization. **Powder Technology**, v. 7, n. 3, p. 155–166, 1973.
- CARLSON; DAVID, R. Level and density measurement using non-contact nuclear. **Instrumentation: A Reader: a Reader**, p. 82–90, 2012.
- CARVALHO, M. R. **Interferência de cátions Ca²⁺ nas etapas de deslamagem e flotação de minério de ferro**. 2003. 57 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia de Minas) — Universidade Federal de Ouro Preto.
- CASTRO, C. **Caracterização Reológica de Uma Mistura de Água e Sedimento**. 2011. 59 p. Dissertação (Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2013.

CHAVES, A. P. **Bombeamento de Polpa e Classificação**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012a. 302 p.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 5. ed. São Paulo: Signus Editora, 2012b. 271 p.

COOKE, R.; SPEARING, A. J. S.; GERICKE, D. The influence of binder addition on the hydraulic transport of classified-tailings backfill. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 92, n. 11, p. 325 – 329, 1992.

COSTA JÚNIOR, H. A. **Uso do Método Box-Behnken para Diminuição de Incerteza de Medição da Técnica de Inspeção por PIG MFL**. 2021. 81 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COSTA JÚNIOR, M. A. *et al.* Modelagem e Protótipo de PIG de Limpeza Utilizado em Tubulações da Indústria Petrolífera. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 5, n. 3, p. 103–108, 2019.

DAUD, W. R. W. Pigging operation for pipeline maintenance and its techniques: A review. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 70, 2019.

FABRO, J. A. *et al.* A MILP (Mixed Integer Linear Programming) decomposition solution to the scheduling of heavy oil derivatives in a real-world pipeline. **Computers and Chemical Engineering**, Elsevier Ltd, p. 124–138, Janeiro 2014.

FENG, S.; BI, Q.; LIAO, W. Liquid density measurement of n-decane with a random temperature signal cross-correlation densimeter at high temperatures and pressures. **Thermochimica Acta**, v. 709, n. 1, p. ?–179162, 2022.

GENTIL, V. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. 408 p.

GOKMEN, E.; KOSEOGLU, H.; KITIS, M. Scaling potential of lime softening processes. **Desalination**, v. 283, p. 57–64, 2011.

GOMES, H. A. **Dimensionamento de Mineroduto**. 2012. 67 p. Dissertação (Departamento de Engenharia de Minas Curso de Especialização Engenharia De Recursos Minerais – Ceermin) — Universidade Federal de Minas Gerais.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 64, p. 233–236, 2011.

GUPTA, S. K.; SINHA, A. K. Nuclear Densitometers: Principle, Uses and Limitations. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 63, n. 5, p. 529–540, 2010.

KANOGLU, M.; CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fundamentals and Applications of Renewable Energy**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2019. 416 p.

KUMAR, N.; GOPALIYA, M. K.; KAUSHAL, D. Experimental investigations and CFD modeling for flow of highly concentrated iron ore slurry through horizontal pipeline. **Particulate Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 232–250, 2019.

- KUNDU, P. K.; COHEN, I. M.; DOWLING, D. R. **Fluid Mechanics**. 6. ed. [S.l.]: Elsevier, 2016.
- LAIS, H. *et al.* Characterization of the use of low frequency ultrasonic guided waves to detect fouling deposition in pipelines. **Sensors**, v. 18, n. 7, p. ?–2122, 2018.
- LEONG, Y. Controlling the rheology of iron ore slurries and tailings with surface chemistry for enhanced beneficiation performance and output, reduced pumping cost and safer tailings storage in dam. **Minerals Engineering**, CETEM, v. 166, p. ?–106874, 2021.
- LIGHTFOOT, E. N.; BIRD, R. B.; STEWART, W. E. **Transport Phenomena**. Revised 2nd. Nova Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- LIMA, R. A. Evaluation of cleaning efficiency of pigging systems in pipelines of the oil and gas industry. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 154, p. 166–176, 2017.
- LIU, C. *et al.* Traveling ability of pipeline inspection gauge (PIG) in elbow under different friction coefficients by 3D FEM. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 75, p. ?–103134, 2020.
- LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minério**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 963 p.
- MACHADO, A. O.; CAMPOS, R. de; FERREIRA, A. da S. Características De Modais De Transporte E Influências Nos Custos E Nível De Serviços Logísticos. In: COBENGE (ed.). **XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**. Campina Grande, 2005. p. 1–13.
- MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento de Fluidos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 258 p.
- MACHADO, W. S.; GOMES, J. F. P. Estudo de caso: análise de falha em tubulação de transporte de polpa de minério de ferro. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 50–63, 2018.
- MADAGASCAR, A. **Operações com Terminais e Navios na Indústria do Petróleo**. São Paulo: Biblioteca24horas, 2014. 138 p.
- MAGALHÃES, L. R. **Contribuição ao Estudo da Erosão-Corrosão de um Aço de Baixo Carbono na Presença de Água contendo 3,5% de Sal, Areia e Inibidor de Corrosão**. 2018. 154 p. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia.
- MAMEDE, C. R. S.; GALERY, R.; PERES, A. E. C. Flotação catiônica reversa de minério de ferro na presença de cátions Ca²⁺. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 13, n. 2, p. 181–87, 2016.
- MARTINS, S. A. **Comparativo entre Sistemas de Bombeamento de Polpa de Minério de Ferro com Diferentes Granulometrias**. 2014. 77 p. Monografia (Programa de Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais.
- MATTHEW, G. *et al.* Turbulent Flow in Pipes: A Historic Speculation. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy**, v. 106, n. 4, p. 311–316, 1994.

- MATTIOLI, G. G. **Avaliação da Corrosão Interna em Minerodutos Brasileiros para Transporte de Minério de Ferro**. 2016. 192 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) — Universidade Federal de Minas Gerais.
- MILLER, R. W. **Flow Measurement Engineering Handbook**. Nova York: McGraw-Hill Education, 2014. 1680 p.
- MOTTA NETO, W. D. S. **Comparação do Efeito do Método de Medição com Contato e sem Contato na Rugosidade**. 2017. 178 p. Dissertação (Faculdade de Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia.
- NASCIMENTO, C. R. **Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Minerais: Série Rochas E Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 54 p.
- PALACIOS, A. J. C. et al. Rheological behavior of copper concentrate slurries with different solids concentrations. **Minerals Engineering**, v. 56, p. 67–73, 2014.
- PIMENTA, B. D. **Rugosidade Absoluta em Tubulações Utilizadas para Distribuição de Água**. 2021. 140 p. Tese (Programa Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) — Universidade Federal de Santa Maria.
- PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 2. ed. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- POURBAIX, M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. Houston, Texas: National Association of Corrosion Engineers, 1974.
- REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channel. **Phil. Trans. of the Royal Soc**, v. 174, p. 935–982, 1883.
- SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. CETEM/MCT, 2007.
- SANTOS, F. T. Limpeza de tubulações por metodologia polly pigs para recuperação do fator Cde hazen-williams. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 49322–49344, 2020.
- SILVA, C. C. E. **Métodos de Inspeção de Tubulações de Transporte De Minério: o Caso da Integridade de Dutos**. 2017. 70 p. Monografia (Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Ouro Preto.
- SOUZA, F. N. de. **Efeito do Diâmetro do Duto em Parâmetro de Escoamento de Polpas de Minerais**. 2018. 73 p. Dissertação (Engenharia de Minas) — Universidade de São Paulo.
- SWAMEE, P.; JAIN, A. K. Explicit equations for pipe-flow problems. **Journal of the Hydraulics Division (ASCE)**, v. 102, n. 5, p. 657–664, 1976.
- TAYLOR, D.; KANSARA, M. A theory of the nuclear densimeter. **Soil Science**, v. 104, n. 1, p. 25–34, 1967.
- TORRES, A. S. G. **Inertização de Minerodutos para Mitigação de sua Corrosão Interna**. 2021. 81 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal de Minas Gerais.
- TRINCA, G. H. C. e S. **Projeto, Montagem e Posta-em-Marcha de um Loop de Bombeamento de Polpas Minerais**. 2017. 99 p. Dissertação (Engenharia Mineral) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

UHLIG, H. H.; REVIE, R. W. **Corrosion and Corrosion Control**: An introduction to corrosion science and engineering. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

VIDAL, A. M. **Estudo de Bombeamento de Partículas Grossas**. 2011. 78 p. Dissertação (Departamento de Engenharia de Minas Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais – Ceermin) — Universidade Federal de Minas Gerais.

WASP, E. J. Calculation of non-uniform flows. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, Transactions of the American Society of Civil Engineers, v. 119, n. 1, p. 1257–1303, 1959.

WASP, E. J.; KENNY, J. P.; GANDHI, R. L. **Slurry Pipeline Transportation**. 1. ed. San Francisco: Trans Tech Publications, 1977. v. 1. 224 p.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**: 4. 8th. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2016. 792 p.

WRIGHT, R. F. *et al.* Corrosion sensors for structural health monitoring of oil and natural gas infrastructure: a review. **Sensors**, v. 19, n. 18, p. 3957–3964, 2019.