

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO
ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS – CEERMIN

DIMENSIONAMENTO DE MINERODUTO

Aluno: Helder Alves Gomes

Professor Orientador: George Eduardo Sales Valadão

Julho – 2012

DEDICATÓRIA

Primeiramente a Deus por me proporcionar mais esta oportunidade.

A minha amada esposa Fabi que sempre está comigo em todos os meus passos.

Ao sobrinho Davi que chegou para encher nossa vida de motivação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo em cada passo para alcançar todos os meus sonhos.

Ao coordenador Paulo Roberto de Magalhães Viana e meu orientador George Eduardo Sales Valadão pelo apoio e oportunidade para elaboração deste trabalho.

A Iara Pimenta, pela força e entusiasmo que me fez acreditar que valia a pena.

A todos os amigos que diretamente ou indiretamente contribuíram para conclusão de mais esta etapa em minha vida.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO E RELEVÂNCIA	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	MINERODUTO	4
3.2	REOLOGIA.....	6
3.3	CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO.....	9
3.3.1	Tipos de fluxo de polpas.....	9
3.3.2	Fluido Bifásico e fórmulas de cálculo.....	11
3.3.3	Regimes de Escoamento.....	13
3.3.4	Velocidade limite de transporte	15
3.3.4.1	Velocidade de deposição	16
3.3.4.2	Velocidade de transição	16
3.4	CRITÉRIOS DE PROJETO HIDRÁULICO DO MINERODUTO.....	18
3.4.1	Balço de Energia.....	18
3.4.2	Determinação das espessuras da tubulação	19
3.4.3	Cálculo do Golpe de Aríete	21
3.4.4	Perda de carga para fluxos de concentrados heterogêneos.....	23
3.4.4.1	Perda de carga por fricção em tubulação	25
3.4.4.2	Perda de carga localizada em tubulação	25
3.4.5	Dimensionamento de bombas	26
3.4.6	Linhas de Gradiente Hidráulico	26
3.4.6.1	Gradiente de Operação Normal	27
3.4.6.2	Gradiente Hidrostático ou Detenção do sistema	28
3.4.6.3	Gradiente de Operação Eventual, ou Estado Transiente.....	29
4	ESTUDO DE CASO	30
4.1	BASES DE PROJETO.....	30

4.1.1	Desenho e produtividade do sistema	30
4.1.2	Testes Reológicos.....	32
4.1.2.1	Gravidade específica dos sólidos.....	32
4.1.2.2	Distribuição do tamanho das partículas	33
4.1.2.3	Características da polpa de concentrado de ferro	34
4.1.2.4	Propriedades da água	34
4.1.2.5	Taxa de Corrosão admissível	34
4.2	CRITÉRIOS DE VELOCIDADE DE OPERAÇÃO.....	35
4.3	CRITÉRIOS HIDRÁULICOS	35
4.4	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO SISTEMA	37
4.4.1	Diâmetro da tubulação da linha de impulsão principal	37
4.4.2	Características da linha de impulsão principal.....	38
4.4.3	Equipamentos de Bombeamento.....	39
4.5	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE	39
4.5.1	Condição de Parada do Sistema	39
4.5.2	Condição de Tonelagem Nominal.....	42
4.5.3	Condição de Tonelagem Máxima	45
4.5.4	Condição de Tonelagem Mínima.....	48
4.5.5	Condição de Operação com Batches de Água.....	51
4.5.6	Faixa de Operação do Mineroduto	53
5	CONCLUSÃO.....	56
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
7	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Fatores de Projeto para Polpa de Minério.....	21
Tabela 4.1 - Localização das estações principais.....	32
Tabela 4.2 - Distribuição Granulométrica de projeto.....	33
Tabela 4.3 - Propriedades Reológicas do concentrado.....	34
Tabela 4.4 - Velocidades mínimas de operação.....	35
Tabela 4.5 - Caracterização material de tubulação para mineroduto.....	38
Tabela 4.6 - Características da Linha de Impulsão Principal.....	38
Tabela 4.7 - Requerimento de bombas de deslocamento positivo.....	39
Tabela 4.8 - Folgas, Condição de parada, Ano 0 e Ano 20.....	41
Tabela 4.9 - Pressões, Condição de parada, Ano 0 e Ano 20.....	41
Tabela 4.10 - Dimensionamento hidráulico, Condição Nominal, Ano 0 e Ano 20.....	42
Tabela 4.11 - Folgas, Condição nominal de operação a 67%, Ano 0 e Ano 20.....	44
Tabela 4.12 - Pressões, Condição nominal a 67%, Ano 0 e Ano 20.....	44
Tabela 4.13 - Dimensionamento hidráulico, Condição Máxima, Ano 0 e Ano 20.....	45
Tabela 4.14 - Folgas, Condição máxima a 70%, Ano 0 e Ano 20.....	47
Tabela 4.15 - Pressões, Condição máxima a 70%, Ano 0 e Ano 20.....	47
Tabela 4.16 - Dimensionamento hidráulico, Condição Mínima, Ano 0 e Ano 20.....	48
Tabela 4.17 - Folgas, Condição mínima a 65%, Ano 0 e Ano 20.....	50
Tabela 4.18 - Pressões, Condição mínima a 65%, Ano 0 e Ano 20.....	50
Tabela 4.19 - Resumo da Faixa operacional do mineroduto.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Componentes típicos de um mineroduto.....	4
Figura 3.2 – Bomba de deslocamento positivo (Weir, 2012).....	5
Figura 3.3 – Estação de válvulas (Collahuasi, 2008).....	5
Figura 3.4 – Tubulação principal (Brass Engineering, 2008).....	5
Figura 3.5 - Modelos reológicos de polpas (Chaves, 2002).....	6
Figura 3.6 - Fluidos Newtonianos e de Bingham (Chaves, 2002).....	7
Figura 3.7 - Reômetro para análise de viscosidades (Fann, 2012).....	8
Figura 3.8 - Medição de reologia (BRASS, 2006).....	8
Figura 3.9 - Tipos de Fluxos (Chaves, 2002).....	10
Figura 3.10 - Regimes de escoamento (BRASS, 2008).....	13
Figura 3.11 - Gráfico Velocidade x Perda de carga tubulação (BRASS, 2008).....	14
Figura 3.12 - Velocidade de Transição e Deposição do fluido (Wasp, 1976).....	15
Figura 3.13 - Equação de Bernoulli.....	18
Figura 3.14 - Relação entre C/CA na tubulação.....	23
Figura 3.15 - Perfil do Terreno e Faixas de HGL.....	27
Figura 3.16 - HGL hidrostático.....	28
Figura 3.17 - HGL Transiente.....	29
Figura 4.1 - Estações principais e perfil do terreno de projeto.....	31
Figura 4.2 - Percentual Passante acumulado.....	33
Figura 4.3- Critérios de operação adequada do sistema.....	36
Figura 4.4- Altura Estática do sistema Ano 0.....	40
Figura 4.5- Altura Estática do sistema Ano 20.....	40
Figura 4.6- Gradiente Hidráulico do sistema a 69% e vazão de 2.067 m ³ /h, Ano 0.....	43
Figura 4.7- Gradiente Hidráulico do sistema a 69% e vazão de 2.067 m ³ /h, Ano 20.....	43
Figura 4.8- Gradiente Hidráulico do sistema a 70% e vazão de 2.163 m ³ /h, Ano 0.....	46
Figura 4.9 - Gradiente Hidráulico do sistema a 70% e vazão de 2.052 m ³ /h, Ano 20.....	46
Figura 4.10- Gradiente Hidráulico do sistema a 65% e vazão de 1.915 m ³ /h, Ano 0.....	49
Figura 4.11 - Gradiente Hidráulico do sistema a 65% e vazão de 1.977 m ³ /h, Ano 20...	49
Figura 4.12-Batch de água impulsionando polpa a 67%, quilômetro 125, ano 0.....	51
Figura 4.13- Batch de polpa impulsionando água a 67%, quilômetro 125, ano 0.....	52
Figura 4.14- Faixa de Operação do Mineroduto.....	54

RESUMO

O sistema para transporte de fluidos concentrados por tubulação denominado Mineroduto vem ganhando maior destaque e aplicação mundial nos últimos anos, principalmente por se mostrar como um tipo de transporte econômico, de maior confiabilidade operacional e menor impacto ambiental em comparação com outros tipos de transportes de minérios de longa distância, apesar do relativo investimento inicial. Sendo assim, este trabalho tem como foco evidenciar os principais pontos considerados no dimensionamento de um fictício Mineroduto de longa distância com 200km de comprimento que transportará 24MTSA (Mega toneladas secas por ano) de minério de ferro, utilizando para isso premissas de projetos similares como características reológicas e velocidades de transição e depósito, além de serem realizados cálculos hidráulicos para determinação da capacidade de bombeamento com determinação do tipo e características da tubulação principal utilizada. Por fim, avaliar as condições hidráulicas e operacionais do sistema para cada concentração e propor uma faixa de operação que atenderá a demanda de produção de forma viável e segura.

ABSTRACT

The system for transporting fluids concentrated by pipe called Pipeline has gained greater prominence and used worldwide in recent years, mainly to show how a type of economical transportation, higher reliability and lower environmental impact compared with other types of transport ore long distance, despite the relative initial investment. Thus, this work focuses the main points considered in the dimensioning of a fictional long-distance Pipeline with 200km in length which carry 24MDTY (Mega dry tons per year) of iron ore, using for this suchlike project like characteristics rheological and speed of transition and deposition and hydraulic calculations to determine pumping capacity to determine the type and characteristics of the main pipe used. Finally, evaluate the conditions hydraulic and operating system for each concentration and propose an operating range that will meet the viable and safe demand of producing.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de tubulações para transporte de minérios - os chamados minerodutos - são utilizados em todas as partes do mundo. Constituem um sistema confiável e seguro no que se refere à operacionalidade e aos impactos ambientais, já que as ocorrências de acidentes que prejudicam o meio ambiente são raríssimas, inclusive pelo fato de os materiais presentes no bombeamento serem minério e água, ambos componentes presentes na natureza.

O transporte por dutos são economicamente viáveis, pois demandam investimentos de implantação inferiores aos de uma ferrovia, além de permitirem alterações no traçado, reduzindo assim o comprimento total do trajeto. Somado ao fato do transporte de polpa por tubulações gerar custos operacionais muito inferiores em relação ao transporte por ferrovia.

O uso de dutos metálicos como meio de transporte para polpa de minério, petróleo e outras substâncias teve início na América do Norte, por volta de 1865 e atualmente, é empregado em nível mundial, inclusive no Brasil, tornando-se fundamental para a economia.

O transporte dutoviário de óleo e gás no mundo, de acordo com os especialistas, chega a 4,0 milhões de quilômetros, e mesmo sendo alguns destes produtos tóxicos e inflamáveis, são mais seguros que o transporte ferroviário e principalmente o transporte rodoviário. No entanto, a implantação desse tipo de transporte só se torna economicamente viável para grandes volumes transportados e para longas distâncias.

Os minerodutos mais comuns em operação transportam substâncias como fosfato, carvão, cobre, bauxita, concentrados de minério de ferro ou mesmo rejeitos de mineração. No caso do transporte de polpa de minério, que é classificada como inerte e não perigosa pelos critérios da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, os índices de segurança se elevam significativamente. Assim, as polpas podem ser colocadas no duto e serem bombeadas por longas distâncias com elevada margem de segurança operacional e ambiental.

No que se refere às questões econômicas, os minerodutos implantados e planejados no Brasil possuem como vantagem, o fato de não necessitarem de participação de capital estatal, desonerando assim o poder público. O financiamento dos projetos de transportes minerários é viabilizado com recursos próprios das empresas de mineração ou levantado em bolsa de valores através de abertura de capital.

Assim, a implantação de minerodutos é altamente vantajosa, desde a sua locação, que permite traçados reduzidos até sua operação e manutenção, que é eficaz e segura, além, do baixo impacto ambiental, o que faz com que essa alternativa de transporte venha sendo implantada atualmente em larga escala em nosso país.

2 OBJETIVO E RELEVÂNCIA

Neste trabalho serão tratados os assuntos relativos às características técnicas para dimensionamento e operação de minerodutos de longa distância para transporte de concentrado de minério de ferro. Onde constarão os seguintes itens:

- i. Revisão bibliográfica sobre características do material transportado, critérios de projeto hidráulico e expressões para cálculo hidráulico do sistema de tubulação e bombas.
- ii. Realizar um estudo de caso onde será dimensionado um fictício mineroduto de longa distância para transporte de concentrado de minério de ferro, com análise das condições de operação.
- iii. Determinação da faixa de operação do mineroduto a fim de atender a demanda exigida.

No Brasil, a rede de minerodutos já implantada e em operação ainda é relativamente diminuta, destacando-se dois dutos para transporte de caulim e um para bauxita no Pará, e dois dutos para minério de ferro e um para fosfato em Minas Gerais. Mas, a partir de 2005, o interesse por esta alternativa para transporte de bens minerais - especialmente para minério de ferro - tem crescido acentuadamente e atraído investimentos privados para suprir, em parte, as deficiências operacionais e de segurança, e a restrita capacidade de uso das ferrovias e rodovias brasileiras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MINERODUTO

Mineroduto pode ser definido como o modo de transporte de sólidos granulares misturado com um líquido, que funciona como o veículo de transporte. Este líquido normalmente é a água, mas pode ser qualquer outro líquido conveniente, por exemplo, álcool etílico, metanol, salmoura etc. O sólido granulado pode ser constituído também pelos mais diversos materiais: carvão, minério de ferro, minério de cobre, concentrados de cobre, ferro ou fosfato, calcário, rejeitos de beneficiamento, lascas de madeira, bagaço de cana etc. (Chaves, 2002)

Para o transporte de concentrado, um sistema típico inclui tanques de abastecimento com agitadores, uma estação de bombeamento geralmente com bombas centrífugas e bombas de deslocamento positivo somado à tubulação de transporte do concentrado. Em alguns casos, incluem estações de monitoramento de pressão e estações intermediárias de válvulas para melhorar a operação do mineroduto, conforme Figura 3.1. (Betinol e Rojas, 2008).

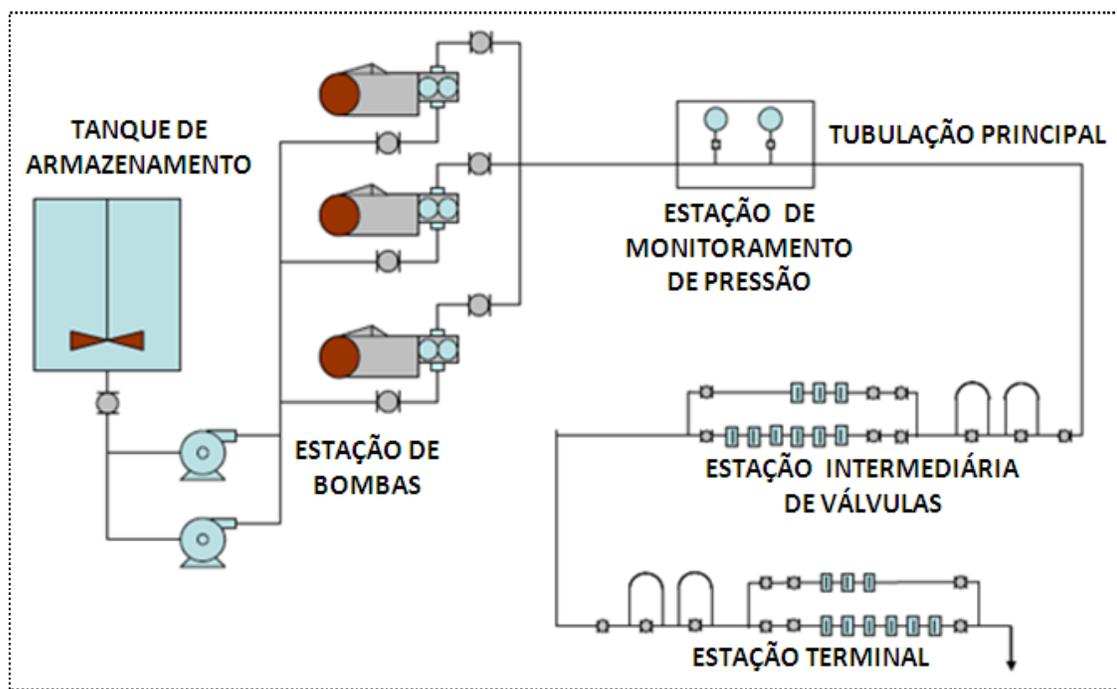


Figura 3.1 - Componentes típicos de um mineroduto (BRASS Engineering, 2008)

Nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 a seguir se evidenciam alguns dos principais componentes de um mineroduto de longa distancia para transporte de concentrado:



Figura 3.2 – Bomba de deslocamento positivo (Weir, 2012)



Figura 3.3 – Estação de válvulas (Collahuasi, 2008)



Figura 3.4 – Instalação da tubulação principal (Brass Engineering, 2008)

3.2 REOLOGIA

Reologia é o estudo do escoamento e deformação da matéria, ou seja, a reologia é o estudo do comportamento da fluidez. Os comportamentos dos fluidos podem apresentar diferentes formas geométricas, características diversas de ligação, tamanhos variados, que lhe conferem comportamentos distintos. (Possa, 2000)

Devido a sua composição alguns produtos possuem uma única viscosidade a uma dada temperatura independente da força de cisalhamento e são denominados fluidos Newtonianos, enquanto a maioria dos fluidos apresenta comportamento reológico mais complexo e a determinação da viscosidade não é um tópico simples.

As polpas se caracterizam com este comportamento complexo, sendo denominados fluidos “não Newtonianos” e exigindo outros parâmetros além da viscosidade para caracterizar o seu comportamento. A Figura 3.5 mostra um diagrama tensão de cisalhamento x gradiente de velocidades, usualmente designado por reograma e os vários tipos de fluidos estudados pela Reologia. A maior parte das polpas usuais em Tratamento de Minérios pode ser assimilada a um modelo denominado “fluido de Bingham” ou fluido visco-plástico. (Chaves, 2002)

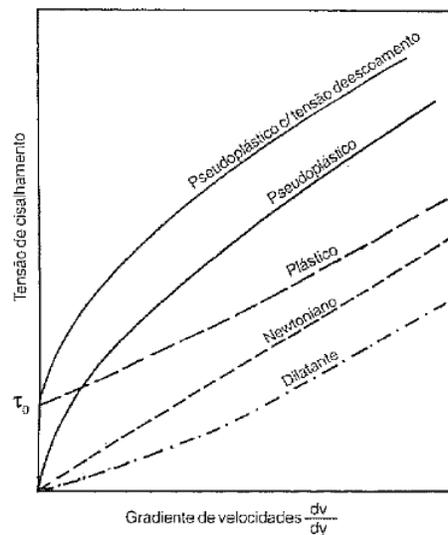


Figura 3.5 - Modelos reológicos de polpas (Chaves, 2002)

O fluido newtoniano pode ser representado por uma reta que passa pela origem e cuja inclinação é a viscosidade. O fluido de Bingham precisa ser cisalhado até um determinado valor limite para começar a escoar e passar a se comportar como fluido newtoniano. A Figura 3.6 mostra o valor de τ_0 ou tensão de escoamento, que representa o esforço mínimo que deve ser fornecido para iniciar o deslocamento do fluido. O valor da inclinação da reta (correspondente a viscosidade) é chamado de módulo de rigidez. (Chaves, 2002)

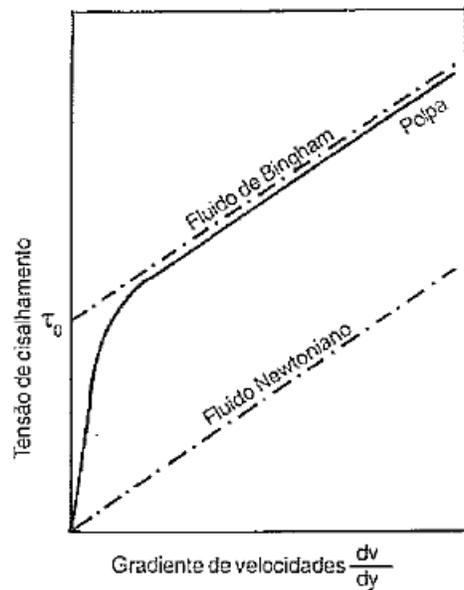


Figura 3.6 - Fluidos Newtonianos e de Bingham (Chaves, 2002)

A equação reológica para o comportamento do plástico de Bingham é descrita abaixo:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \times \dot{\gamma}$$

Onde:

τ	=	tensão de cisalhamento	(Pa)
τ_0	=	tensão de cisalhamento inicial	(Pa)
η_p	=	viscosidade plástica	(Pa.s)
$\dot{\gamma}$	=	taxa de deformação	(s ⁻¹)

A reologia de uma polpa pode ser medida com um equipamento chamado reômetro, mostrado na Figura 3.7, no qual consiste em dois cilindros concêntricos, dos quais um gira e o outro se mantém fixo, no entanto, ambos se encontram submergidos no fluido que se deseja medir. O instrumento permite medir a tensão de cisalhamento que se deve realizar para poder suportar uma determinada taxa de deformação do fluido (Nascimento, 2008).



Figura 3.7 - Reômetro para análise de viscosidades (Fann, 2012)

Na prática, ao realizar uma medição de reologia, pode-se obter curvas como as que se mostram na Figura 3.8.

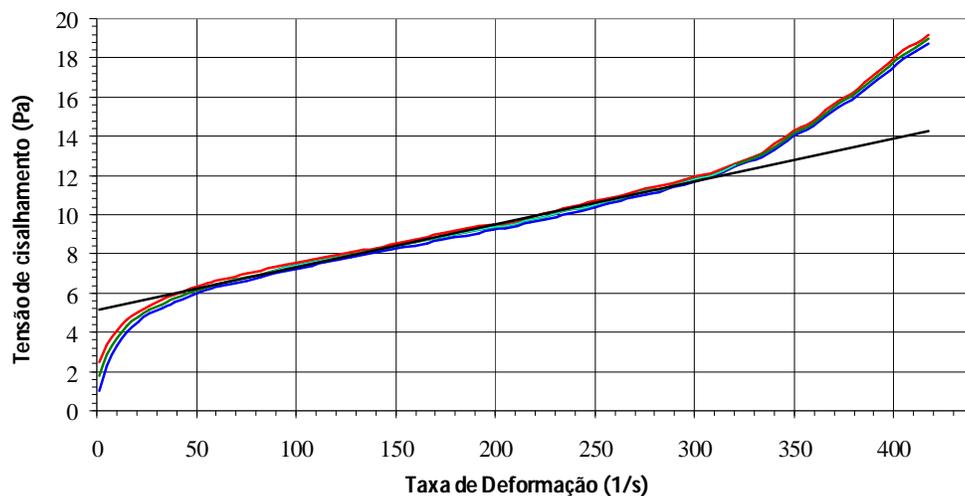


Figura 3.8 - Medição de reologia (BRASS Engineering, 2006)

Da figura anterior podem-se identificar três zonas:

A primeira é uma zona com baixas taxas de deformação, é onde se pode observar uma tendência não linear do fluido. Esta zona representa uma limitação do instrumento, já que este não é capaz de “mover” o cisalhar todo o fluido que se encontra entre os dois tubos concêntricos.

A segunda zona observa-se uma tendência linear do fluido. Esta é a zona de interesse, já que mostra o comportamento linear do fluido de Bingham. Ao interpolar uma reta na zona de interesse, se obtêm a tensão de cisalhamento crítica e a viscosidade do fluido medido.

A terceira zona começa no fim da zona linear. Esta zona representa o início da turbulência no interior dos cilindros concêntricos do instrumento.

As propriedades de interesse para o projeto de um mineroduto são a tensão de fluência e viscosidade reduzida.

3.3 CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO

3.3.1 Tipos de fluxo de polpas

Suspensões coloidais podem manter-se indefinidamente em suspensão estável. Já com as misturas sólido-líquido usuais no tratamento de minérios, isto se constitui exceção, a regra sendo as partículas sedimentarem quando em repouso. Para o transporte é necessário que o escoamento tenha certo grau de turbulência, capaz de manter as partículas sólidas em suspensão. (Chaves, 2002)

Os fluxos, de acordo com a Figura 3.9, podem ser apresentados como:

Fluxo homogêneo: Apresenta uma composição uniforme da mescla em qualquer ponto da secção transversal da tubulação. No se observa diferenças de concentração de sólidos na secção transversal, e o tamanho das partículas sólidas tem uma distribuição granulométrica uniforme em toda a seção. Fluxo homogêneo ou aproximadamente homogêneo se encontra em misturas de alta concentração e tamanho de partículas finas. As misturas que exibem comportamento homogêneo não tendem a sedimentar e/ou

formar depósitos sob condições normais de fluxo, se fala normalmente de fluxo pseudo-homogêneo.

Fluxo heterogêneo: Se caracteriza por apresentar uma composição não uniforme da mistura na seção transversal da tubulação. Apresenta diferenças de concentração de sólidos na seção transversal e as partículas sólidas têm uma distribuição não uniforme na seção, as partículas maiores e/ou mais pesadas tendem a fluir para a parte inferior da tubulação. Apresenta-se um acentuado gradiente de concentrações através da seção transversal da tubulação.

Fluxo de leito móvel: parte dos sólidos deposita no fundo da tubulação, mas continua em movimento, criando um leito móvel que acompanha o fluxo. Parte das partículas pode se mover por rolamento ou por saltitação.

Fluxo com leito fixo: os sólidos depositados no fundo da tubulação deixam de se movimentar. Aumentando a sua quantidade, a seção útil vai diminuindo progressivamente, até o entupimento da linha.

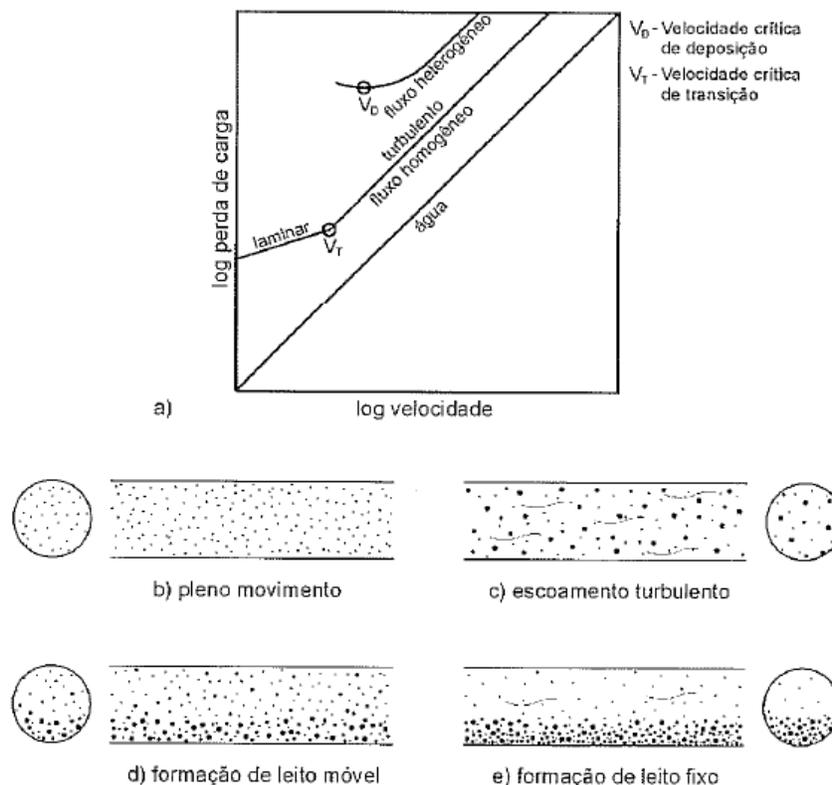


Figura 3.9 - Tipos de Fluxos (Chaves, 2002)

3.3.2 Fluido Bifásico e fórmulas de cálculo

Em um fluido bifásico se apresentam duas fases ou estados, geralmente para concentrados, se trata de água e um elemento mineral em fase sólida.

Este mineral sólido se apresenta em forma de uma “areia” com uma granulometria de projeto que permite seu transporte através de sistemas de tubulação (mistura de água e “areia”).

A seguir, definem-se duas concentrações para caracterizar uma mistura bifásica e outras fórmulas utilizadas para cálculos de concentrados:

Concentração de Sólidos em Peso (C_p): Corresponde ao peso da fração sólida dividida pelo peso da fração da mistura.

$$C_p = \frac{\text{Peso Sólidos}}{\text{Peso Mistura}} = \frac{\rho_s \text{Vol}_s}{\rho_s \text{Vol}_s + \rho_L \text{Vol}_L}$$

Concentração de Sólidos em Volume (C_v): Corresponde ao volume da fração sólida dividida pelo volume da mistura.

$$C_v = \frac{\text{Volumen de Sólidos}}{\text{Volumen de Mistura}} = \frac{\text{Vol}_s}{\text{Vol}_s + \text{Vol}_L}$$

Densidade da mistura (ρ_M) (ou peso específico da mistura):

$$\rho_M = \rho_L + (\rho_s - \rho_L)C_v$$

Assumindo que o fluido é água, pode-se escrever:

$$\rho_M = 1 + (\rho_s - 1)C_v$$

Alternativamente pode-se escrever:

$$\rho_M = \frac{GES}{C_p + GES(1 - C_p)}$$

Existem várias formas de expressar estas relações, sendo a mais utilizada:

$$C_v = \frac{C_p}{C_p + GES(1 - C_p)}$$

Relação entre Fluxo e Tonelagem Transportada:

$$Q \left(\frac{m^3}{Hr} \right) = TSPH \left(\frac{1}{C_p} - 1 + \frac{1}{GES} \right)$$

$$TSPA = FU \times 24 \times 365 \times TSPH$$

Volume de água transportada na mistura:

$$Vol \text{ de Água} \left(\frac{m^3}{Hr} \right) = TSPH \left(\frac{1}{C_p} - 1 \right)$$

Volume de sólidos transportados na mistura:

$$Vol \text{ Sólidos} \left(\frac{m^3}{Hr} \right) = TSPH \left(\frac{1}{GES} \right)$$

Onde:

Vol_L	=	Volume do líquido	(m^3)
Vol_s	=	Volume do sólido	(m^3)
ρ_L	=	Densidade do líquido	(kgf/m^3)
ρ_s	=	Densidade do sólido	(kgf/m^3)
GES	=	Gravidade específica do sólido	(adimensional)
$TSPH$	=	Tonelagem seca por hora	(ton/h)
$TSPA$	=	Tonelagem seca por ano	(ton/ano)
FU	=	Fator de utilização	(%)

3.3.3 Regimes de Escoamento

Outra classificação muito importante do tipo de fluxo é correspondente ao regime de escoamento ou grau de turbulência que o mesmo apresenta conforme indicado na Figura 3.10. O fluxo pode ser caracterizado como:

Regime Laminar: O fluxo se desenvolve por camadas paralelas, ou seja, todas as partículas se deslocam na mesma direção do fluxo médio.

Regime de Transição: Fluxo caracterizado pelo início do desordenamento no sentido do escoamento.

Regime Turbulento: O fluxo apresenta componentes de velocidade em todas as direções do escoamento.

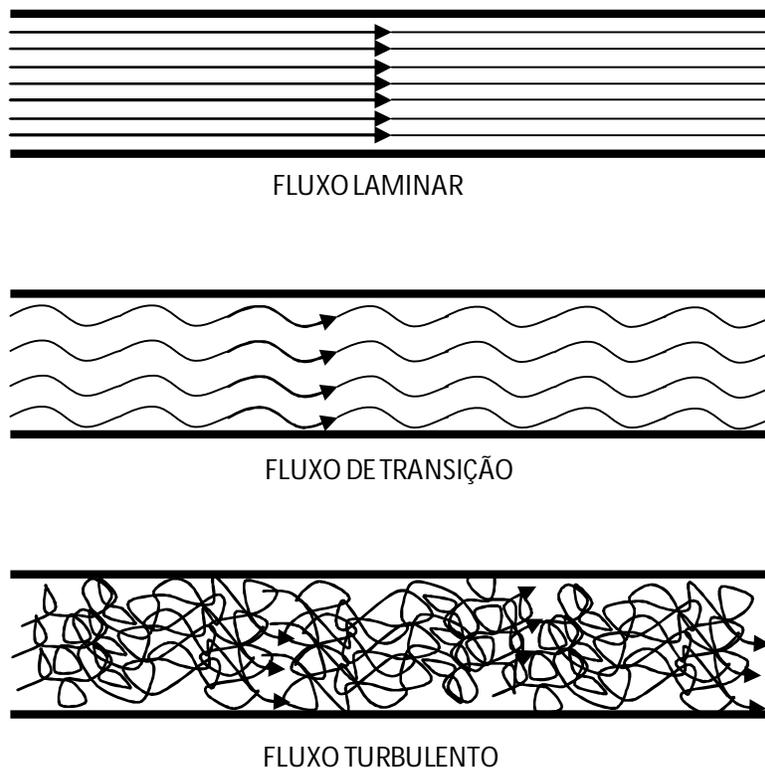


Figura 3.10 - Regimes de escoamento (BRASS Engineering, 2008)

Mediante uma técnica de análise hidráulica chamada “Análise Dimensional” Reynolds estabelece a seguinte relação (adimensional) utilizada em sistema de tubulação:

$$Re = \frac{V D \rho}{\mu}$$

Donde:

Re	=	Número de Reynolds	(adimensional)
V	=	Velocidade do fluxo na tubulação	(m/s)
D	=	Diâmetro interior da tubulação	(m)
μ	=	Viscosidade dinâmica do fluido	(m ² /s)
ρ	=	Densidade do fluido	(kg/m ³)

Ao observar o comportamento do atrito do líquido sobre a tubulação, Reynolds pôde estabelecer que para o regime do tipo laminar a relação entre velocidade do fluxo e perda de pressão (perda de carga) podia ser representada em um gráfico logarítmico mediante uma linha reta.

Graficamente, a situação é como se indica na Figura 3.11:

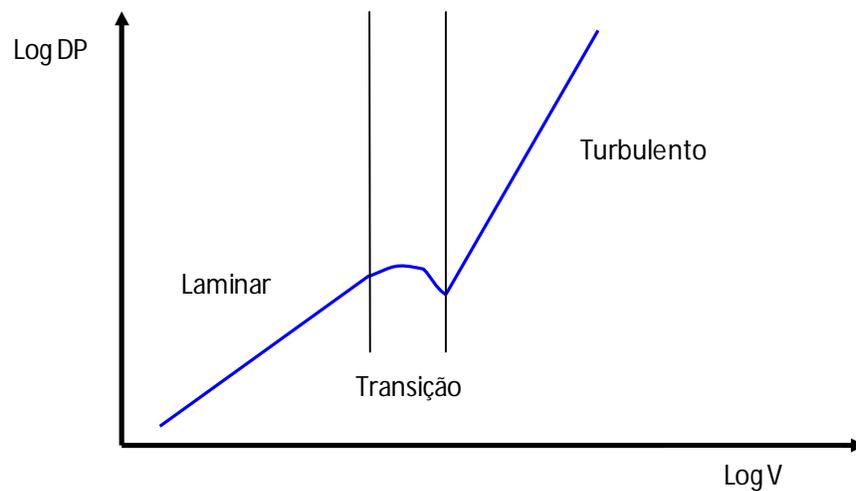


Figura 3.11 - Gráfico Velocidade x Perda de carga (BRASS Engineering, 2008)

Reynolds também pôde estabelecer que para o regime turbulento a relação entre velocidade do fluxo na tubulação e a perda de pressão (perda de carga) também podia ser representada em um gráfico logarítmico mediante uma linha reta, no entanto, a inclinação desta linha reta em regime turbulento não é igual à inclinação da linha reta em regime laminar.

3.3.4 Velocidade limite de transporte

A velocidade limite de uma mistura representa a menor das velocidades na qual o sistema pode ser operado, tal que as condições de estabilidade do fluxo ainda prevaleçam. A velocidade limite está determinada pela maior entre as velocidades de depósito e transição, ou seja, a velocidade limite é a mínima velocidade a qual se pode transportar o concentrado assegurando fluxo homogêneo e turbulento. (BRASS Engineering, 2008)

Ela deve ser suficientemente grande para produzir a turbulência necessária para manter os sólidos em suspensão. E deve ser a menor possível para reduzir o atrito com as paredes do tubo e conseqüentemente reduzir a perda de carga (Chaves, 2002), conforme a Figura 3.12.

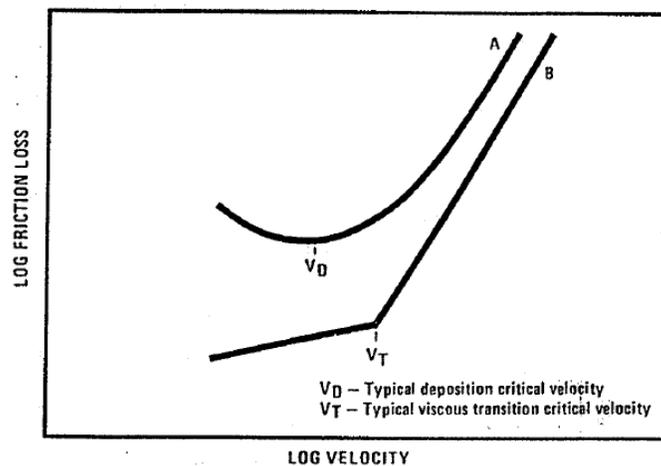


Figura 3.12 - Velocidade de Transição e Deposição do fluido (Wasp, 1976)

3.3.4.1 Velocidade de deposição

A fórmula para cálculo da velocidade crítica de deposição (V_d) mais utilizada atualmente foi definida por Durand (1953):

$$V_D = F_L \sqrt{2gD \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L}}$$

Onde:

F_L : Parâmetro de sustentação dependente da granulometria e concentração

D : Diâmetro da tubulação (m)

ρ_S : Densidade do sólido (kgf/m³)

ρ_L : Densidade do líquido (kgf/m³)

g : Aceleração da gravidade (m/s²)

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

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

Onde:

C_V : Concentração em volume do concentrado (kgf/m³)

d_{50} : Tamanho das partículas em percentual passante de 50% (mm)

3.3.4.2 Velocidade de transição

Existe uma velocidade crítica que estabelece a diferença entre fluxo laminar e fluxo turbulento, esta velocidade se denomina velocidade de transição (V_t). Sendo esta velocidade depende das características reológicas da mistura (densidade, viscosidade,

tensão de cisalhamento) e diâmetro da tubulação entre outros fatores. (BRASS Engineering, 2008)

Slatter e Wasp (1976) determinaram a seguinte correlação para cálculo da velocidade de transição baseado no modelo reológico do plástico de Bingham:

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

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

$$Vt = Re_c \cdot \frac{\eta}{D \cdot \rho}$$

O número de Reynolds que define a transição entre regime laminar e turbulento não tem um valor constante, não sendo capaz de determinar com precisão o tipo de regime. Sendo assim, para obter uma melhor aproximação, associa-se o valor do Reynolds crítico ao número de Hedstrom (He):

$$He = \frac{\rho \tau_0 D^2}{\eta}$$

Onde:

Vt :	Velocidade de transição	(m/s)
Re_c :	Reynolds crítico	(adimensional)
He :	Número de Hedstrom	(adimensional)
ρ :	Densidade do concentrado	(kgf/m ³)
τ_0 :	Tensão de cisalhamento crítica	(Pa)
D :	Diâmetro da tubulação	(m)
η :	Viscosidade do concentrado	(Pa.s)

Dada uma característica reológica de uma polpa, ao associar-la a um diâmetro de tubulação, constará de imediato uma definição a faixa onde se encontrará o fluxo em condição de transição.

3.4 CRITÉRIOS DE PROJETO HIDRÁULICO DO MINERODUTO

A seguir, se detalham os critérios e as expressões usadas para os cálculos hidráulicos em regime permanente do mineroduto.

3.4.1 Balanço de Energia

Em se tratando de fluxo de fluidos por tubulação, a equação que permite modelar o comportamento do sistema em estado estacionário é a chamada “Equação de Bernoulli”. Esta equação, em sua modalidade mais simples, esta composta por três tipos de energia, energia potencial, energia cinética e a energia associada à altura de pressão, conforme apresentado na Figura 3.13.

Em regime permanente e uniforme, aplicaremos esta equação em uma linha de corrente, ou seja, dado um sistema de transporte de fluido por tubulação, se escolhe uma linha corrente, que geralmente coincida com o eixo longitudinal da tubulação, e em dois pontos desta linha aplicamos a equação de Bernoulli. (BRASS Engineering, 2008)

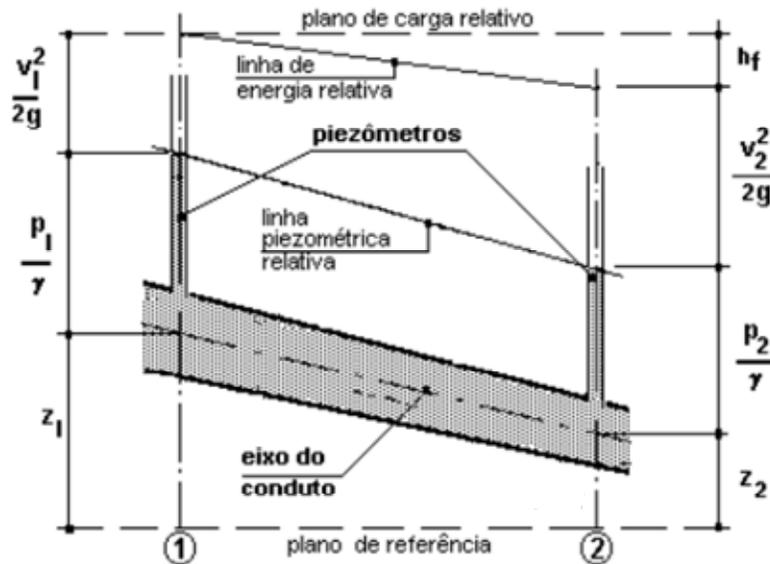


Figura 3.13 - Equação de Bernoulli (BRASS Engineering, 2008)

O balanço de energia da figura acima se determina com a seguinte fórmula:

$$H_s = \Delta Z_c + \Delta \frac{V^2}{2g} + JL + ks \frac{V^2}{2g}$$

Onde:

H_s : Pressão (altura) de bombeamento (m).

ΔZ_c : Diferença de altura geométrica entre sucção e descarga (m).

V : Velocidade de fluxo (m/s).

J : Perda de carga por fricção (m/m).

L : Extensão do mineroduto (m).

ks : Coeficiente perda de pressão local através de válvulas e acessórios (m).

g : Aceleração gravitacional (m/s²).

Com esta equação será determinado o valor da pressão requerida pelo sistema para a vazão de projeto:

$$\frac{P}{\rho g} = \Delta Z_c + H_F$$

Onde:

H_F : Perda de carga por fricção (m)

ρ : Densidade do fluido (kg/m³)

3.4.2 Determinação das espessuras da tubulação

De acordo com a ASME B31.11, a espessura mínima selecionada para seções retas de tubulação descontando a tolerância de fabricação, não deve ser menor que a espessura determinada pela expressão:

$$t_N = t + A$$

Onde:

- t_N : Espessura nominal que satisfaz os requerimentos de pressão interna e sobre-espessuras. (mm)
- t : Espessura de projeto calculado conforme ASME B31.11 (mm)
- A : Sobre espessura por corrosão, erosão. (mm)

A espessura de projeto devido à pressão interna em seções retas de tubulação deverá ser menor que a calculada pela seguinte expressão:

$$t = \frac{P.D}{2.S}$$

Onde:

- P : Pressão manométrica interna de projeto (MPa)
- D : Diâmetro externo da tubulação (mm)
- S : Tensão admissível que se determina com a seguinte expressão do código ASME B31.11: (MPa)

$$S = SMYS \times E \times FS$$

Onde:

- $SMYS$: Mínima tensão de escoamento da tubulação pela ASME B31.11
- E : Fator de qualidade por solda na ASME B31.11
- FS : Fator de segurança conforme ASME B31.11

Conforme o código ASME B31.11, a tabela 3.1 mostra os fatores de projeto para polpa de minério de ferro para cálculo da pressão.

Tabela 3.1- Fatores de Projeto para Polpa de Minério (ASME B31.11)

Descrição	Valor conforme ASME B31.11
Fator Projeto Estado Permanente	80,0%
Fator Projeto Evento Transiente	88,0%

3.4.3 Cálculo do Golpe de Aríete

O golpe de aríete é o resultado da mudança de velocidade do fluxo em conduto fechado, gerando uma vibração causada por ondas de pressão que se movem em direção ao montante e jusante do conduto. O aumento da pressão produto do fechamento instantâneo de uma válvula é determinado pela lei de Joukowsky, proporcional a velocidade do fluido e a magnitude da velocidade da onda, independentemente do comprimento de condução: (BHP Biliton, 2007)

$$h_{máx} = \frac{a.V}{g}$$

Onde:

$h_{máx}$: Sobrepressão devido ao golpe de Aríete (mcf)

a : Celeridade da onda de pressão (m/s)

V : Velocidade do fluido transportado (m/s)

A velocidade de propagação da onda chamada de celeridade pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$a = \frac{\left(\frac{\beta \cdot g}{\rho}\right)^{1/2}}{\left(1 + \frac{\beta \cdot D \cdot C}{E \cdot t}\right)^{1/2}}$$

Onde:

β :	Módulo de elasticidade do fluido	(kPa)
ρ :	Densidade do fluido	(kgf/m ³)
E :	Módulo de elasticidade do Aço	(kPa)
D :	Diâmetro interior da tubulação	(m)
t :	Espessura da parede da tubulação	(m)
μ :	Razão de Poisson	
C :	Constante de suportação da tubulação:	

Se a tubulação está rigidamente ancorada $C = 1 - \mu^2$

Se a tubulação está ancorada em um ponto e livre para deformação longitudinal em outro ponto $C = 5/4 - \mu$

Se a tubulação está perfeitamente rígida $C = 0$

A equação de Joukowsky deve ser utilizada quando há um fechamento rápido da válvula, ou seja, quando o tempo de fechamento de uma válvula é menor que o tempo de retorno de uma onda transiente:

$$t < \frac{2L}{a}$$

Onde:

t	=	Tempo de fechamento de válvula	(s)
L	=	Comprimento de tubulação	(m)

Para o caso de um fechamento lento da válvula, a sobrepressão do golpe de Aríete pode ser calculada pela fórmula de Michaud:

$$h_{máx} = \pm \frac{2L}{t} \frac{\Delta V}{g}$$

3.4.4 Perda de carga para fluxos de concentrados heterogêneos

Para o fluxo de concentrados heterogêneos se utilizará o método de Wasp para determinação da perda de carga hidráulica. A característica principal do método empírico desenvolvido por Wasp para calcular o gradiente de pressão está na separação entre a fração homogênea do concentrado que atua como veículo que transporta a fração heterogênea. Esta separação se realiza com a seguinte expressão: (Wasp, 1976)

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

$$u^* = v \sqrt{\frac{f_D}{8}}$$

Onde:

$\frac{C}{C_A}$: Razão da concentração volumétrica de sólidos a $0,08 \cdot D$ 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

χ : Constante de Von Kármán

u^* : Velocidade de fricção (m/s)

v : Velocidade do concentrado (m/s)

f_D : fator de fricção de Darcy determinado com a equação de Colebrook.

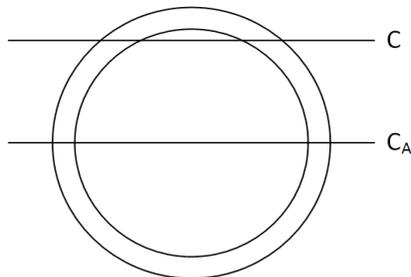


Figura 3.14 - Relação entre C/CA na tubulação (Wasp, 1976)

A fórmula para cálculo da perda de carga para parte homogênea composta pelo fluido não-Newtoniano (Bingham) é determinada por:

$$\Delta P_v = \frac{f \cdot V^2}{D \cdot 2 \cdot g} \cdot vk$$

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/s ²)

Para cálculo da perda de carga devido aos sólidos da parte heterogênea é:

$$\Delta P_c = K \cdot \Delta P_{\text{água}} \cdot C_{v(c)} \cdot \left[\frac{g \cdot D \cdot (SGS - 1)}{V^2 \cdot \sqrt{C_D}} \right]^{1,5}$$

Onde:

ΔP_c :	Perda de carga dos sólidos	(mca)
K :	Constante de Durand	
$\Delta P_{\text{água}}$:	Perda de carga da água	(mca)
$C_{v(c)}$:	Concentração volumétrica do leito	
SGS :	Gravidade específica dos sólidos	(kgf/m ³)
C_D :	Coeficiente de resistência	

Finalmente, a perda de carga total é a soma da perda de carga da parte homogênea e da parte heterogênea, sendo:

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_v + \Delta P_c$$

3.4.4.1 Perda de carga por fricção em tubulação

Para fluidos Newtonianos, devido à rugosidade da parede interior da tubulação, acontece uma dissipação de energia e uma perda de pressão no fluxo, calculada a partir da expressão clássica de Darcy-Colebrook (1845):

$$h_f = f_D \frac{L.v^2}{D.2g} = J.L$$

O fator de fricção de Darcy se determinará com a equação de Colebrook (1939):

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

Onde:

h_f : Perda de carga por fricção em metros de coluna de fluido (mcf)

f_D : Fator de fricção de Darcy

L : Comprimento da tubulação (m)

D : Diâmetro interno da tubulação (m)

v : Velocidade média do fluido (m/s)

g : Aceleração gravitacional (m/s²)

J : Gradiente Hidráulico (m/km)

ε : Rugosidade absoluta (m)

Re : Número de Reynolds (Pa)

3.4.4.2 Perda de carga localizada em tubulação

As perdas de carga localizadas ou acidentais são expressas como uma fração ou um múltiplo da chamada "altura de velocidade" da forma:

$$h_l = K_s \frac{v^2}{2.g} \quad \text{com} \quad K_s = \sum K_i$$

Onde K_i corresponde ao coeficiente de perda de carga por fricção de cada singularidade presente no sistema.

3.4.5 Dimensionamento de bombas

As bombas utilizadas no sistema são dimensionadas para impulsionar tanto a vazão de nominal quanto a vazão máxima de projeto. O consumo de energia no eixo da bomba se determina através da seguinte expressão: (Macintyre, 1987)

$$P_W = \frac{Q \cdot H \cdot SG}{366 \cdot \eta_p}$$

A potência elétrica requerida pelo motor da bomba é calculada da seguinte forma:

$$P_{motor} = \frac{P_W}{\eta_T}$$

Onde:

P_W :	Potência proporcionada ao líquido pela bomba	(kW)
Q :	Vazão impulsionada pela bomba	(m ³ /h)
H :	Altura total de descarga da bomba	(m)
SG :	Gravidade específica do fluido	(kgf/m ³)
η_p :	Eficiência da bomba	(%)
η_T :	Eficiência da transmissão	(%)

3.4.6 Linhas de Gradiente Hidráulico

Uma das ferramentas de maior utilidade para compreender e ter uma visão global do projeto de um sistema de transporte de fluido por mineroduto constitui na confecção do perfil hidráulico. (BRASS Engineering, 2008)

Corresponde a uma visualização gráfica do perfil longitudinal da tubulação, seguindo estritamente a rota selecionada. A idéia é identificar claramente os níveis de pressão comprometidos ao longo da condução pela qual são identificadas as seguintes situações:

1. Gradiente de Operação Normal, ou Estado Permanente.
2. Gradiente Hidrostático ou Detenção do sistema.
3. Gradiente de Operação Eventual, ou Estado Transiente.

3.4.6.1 Gradiente de Operação Normal

Corresponde à posição do plano de energia ao longo da tubulação, expressada em metros, com referência o nível do mar - msnm, quando o sistema opera em regime estacionário. Permite visualizar em forma gráfica o nível de pressão em cada ponto da linha, associado ao nível de fluxo determinado. No caso dos sistemas de transporte flexíveis que admitem uma faixa de fluxo associada às vazões de operação, podem representar-se gradientes para fluxo máximo, médio e mínimo, como indicado na Figura 3.15.

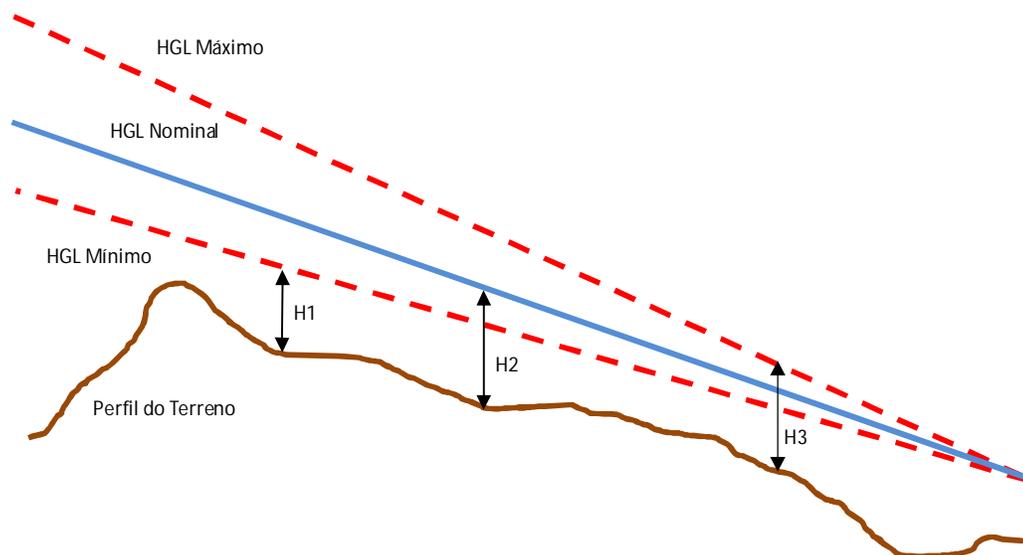


Figura 3.15 - Perfil do Terreno e Faixas de HGL (BRASS Engineering, 2008)

A diferença de altura entre uma linha determinada de gradiente de operação (mínimo, nominal e máximo) e a cota de terreno permite calcular a altura de pressão que se exerce sobre a tubulação neste ponto (H1, H2 e H3), em (mcf), respectivamente.

3.4.6.2 Gradiente Hidrostático ou Detenção do sistema

Mostra os níveis que adota o plano de energia sob as condições de detenção do sistema, considerando os trechos que definem a posição das válvulas de bloqueio nas estações de válvulas e estação terminal.

Na condição do sistema parado, o plano (linha hidráulica) de energia é horizontal, e o cálculo de pressões em um ponto da tubulação se determina da mesma forma que no caso anterior. Em qualquer ponto, a pressão está dada pela diferença entre o HGL hidrostático e o perfil de terreno, como mostra a Figura 3.16:

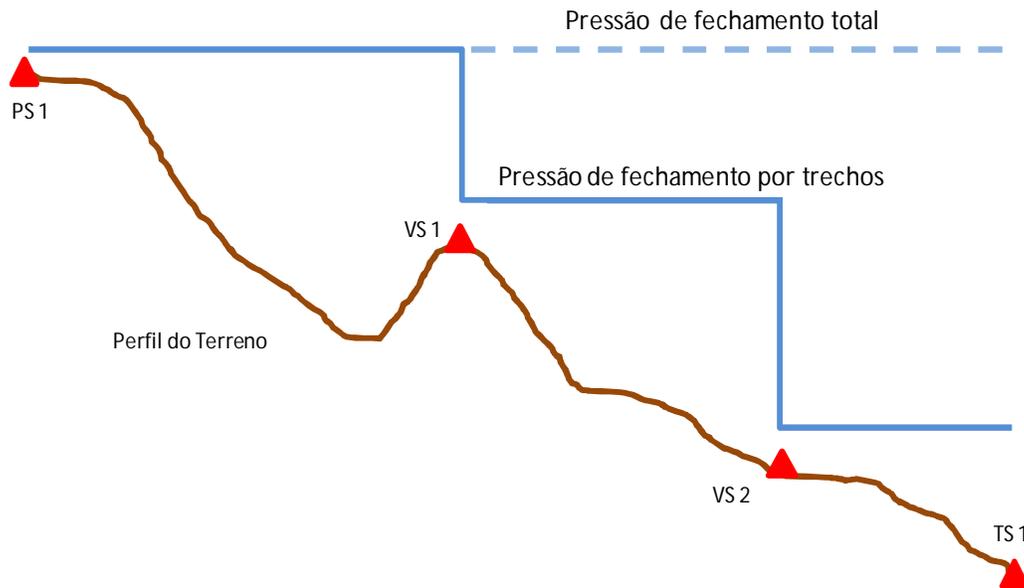


Figura 3.16 - HGL hidrostático (BRASS Engineering, 2008)

Ao colocar estações de válvulas intermediárias, e deter o sistema, as válvulas correspondentes a estas estações dividem a coluna hidrostática em várias partes. Ao separar a coluna hidrostática em varias partes, a altura de pressão resultante nos diferentes trechos é menor. Por exemplo, no trecho VS1 e VS2 na Figura 3.16, a altura de pressão esta dada pela altura de pressão na saída da estação VS1.

3.4.6.3 Gradiente de Operação Eventual, ou Estado Transiente

Trata-se de um gradiente análogo ao de pressões normais de operação, mas que mostra a posição da envolvente de pressões máximas e mínimas que podem ocorrer no sistema por operações de caráter eventual (manobras de operação, abertura ou fechamento de válvulas, ruptura de discos, detenção de bombas, etc.). Um relatório de análise de transiente deve simular todas as possibilidades de operação do sistema, em particular as seqüências de detenção, de partida, ruptura de discos etc.

A partir destas análises, se determina uma “envolvente” de pressões máximas e mínimas conforme Figura 3.17, as quais, posteriormente são transformadas em gráfico de forma similar ao HGL de operação normal simulado no estado estacionário.

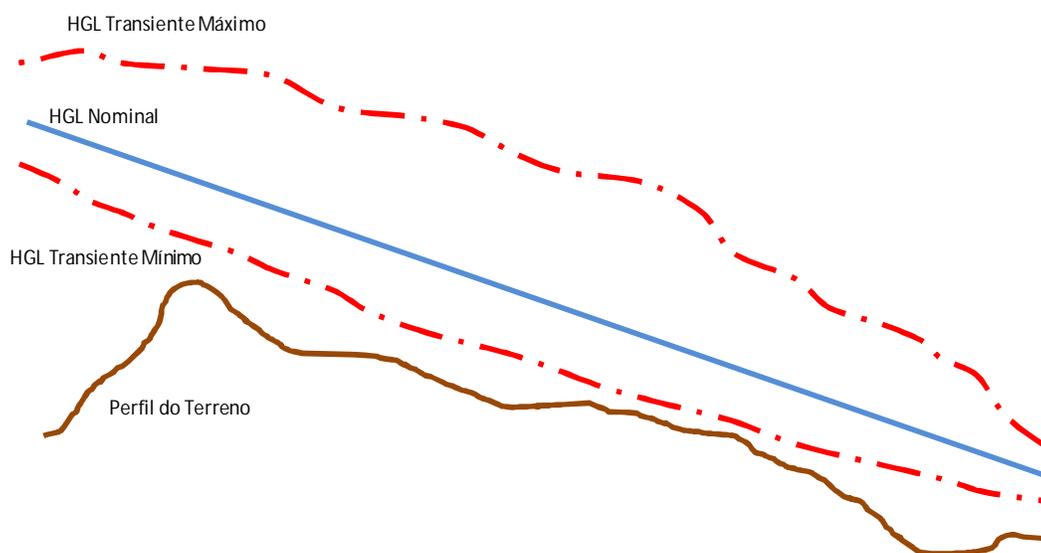


Figura 3.17 - HGL Transiente (BRASS Engineering, 2008)

A linha de gradiente de operação eventual correspondente a pressões máximas é importante porque define as classes dos flanges, as espessuras e qualidade do aço requerido para suportar as pressões máximas de operação.

A linha de gradiente de operação eventual mínima é importante, pois permite determinar a cavitação transiente gerada pelo fenômeno da “separação de coluna”, também chamado “slack flow”, a diferença é que neste caso, a separação é um

fenômeno muito rápido. Quando as colunas de líquido volta-se a juntar, resulta em um “choque” de massas de líquido, dentro da tubulação, que pode gerar um fenômeno denominado “spike”, que é um pulso de pressão, cuja magnitude pode ser de 4 a 5 vezes o valor determinado pela envolvente de pressões de Joukowsky.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 BASES DE PROJETO

4.1.1 Desenho e produtividade do sistema

Para o estudo de caso a nível conceitual foi criado um mineroduto fictício de 200km de comprimento para transporte de concentrado de minério de ferro da planta de beneficiamento até o porto. O sistema de tubulação será desenhado para um transporte nominal de 24,0 milhões de toneladas secas por ano (MTSPA) de minério de ferro, sendo feita através de uma estação de bombeamento localizado na planta de beneficiamento. Constará também de uma estação de válvulas e três estações de monitoramento de pressão ao longo do mineroduto, além da estação terminal.

Todas as características físicas do sistema de tubulação quanto propriedades reológicas do fluido transportado são baseados em projetos de similares características.

O mineroduto será dimensionado para uma vida útil de 20 anos de operação, com uma disponibilidade operacional de 95% para análise do sistema em regime permanente.

A faixa de Concentração em peso de sólidos (C_p) para o projeto será de 65% a 70%, sendo:

- Concentração mínima de 65%,
- Concentração nominal de 67%,
- Concentração máxima de 70%.

A tonelagem nominal de 24,0 MTSPA sofrerá variação de +15% (Concentração em peso de 70%) e -15% (Concentração em peso de 65%) a fim de garantir melhor operacionalidade do sistema.

A figura 4.1 mostra o perfil geométrico do mineroduto com seus pontos de elevação:

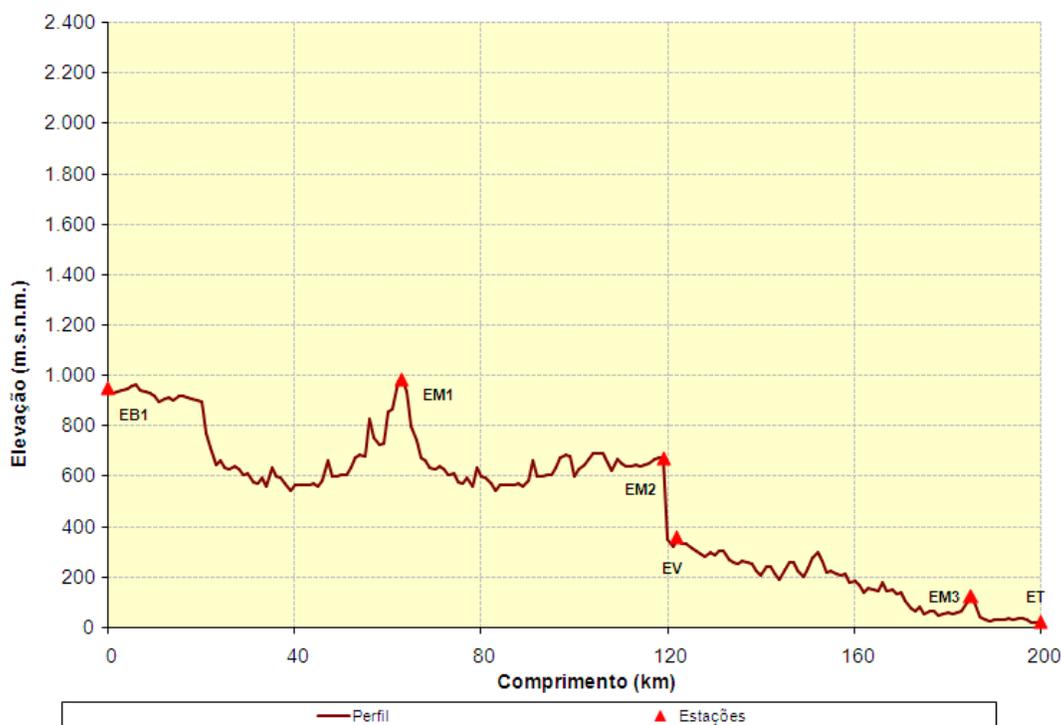


Figura 4.1 - Estações principais e perfil do terreno de Projeto

O mineroduto possui uma (1) estação de bombeamento (EB), uma (1) estação de válvulas (EV), três (3) estações de monitoramento (EM1, EM2, EM3) e uma (1) estação terminal dissipadora (ET).

As estações de monitoramento, com localizações-chaves, estão dispostas para monitorar as condições intermediárias de pressão na tubulação. Estas estações complementam os dados da pressão disponível nas estações de válvulas e fornecem informações de apoio para que o operador tome decisões.

A estação de válvulas e estação terminal tem duas funções principais: seccionar (dividir) a altura da coluna hidrostática no sistema durante as paralisações do mineroduto e dissipar o excesso de energia hidráulica durante a operação.

As localizações exatas das principais estações são apresentadas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Localização das estações principais

Estação	Localização (km)	Elevação (m.s.n.m.)
EB	0,00	948
EM1	63,00	983
EM2	119,00	671
EV	122,00	355
EM3	185,00	125
ET	200,00	22

A inclinação máxima dos trechos da tubulação ao longo do mineroduto não deve ultrapassar 15%.

4.1.2 Testes Reológicos

Para verificação da viabilidade de transporte do minério de ferro por mineroduto de longa distância e cálculos hidráulicos, os seguintes parâmetros reológicos foram adotados para dimensionamento do sistema:

4.1.2.1 Gravidade específica dos sólidos

O valor da gravidade específica dos sólidos considerado para o projeto foi de 4,5 ton/m³.

4.1.2.2 Distribuição do tamanho das partículas

As distribuições granulométricas de projetos similares consideradas para dimensionamento do sistema de bombeamento estão indicadas na Tabela 4.2 e na Figura 4.2:

Tabela 4.2 - Distribuição Granulométrica de projeto

Tela (Tyler Mesh)	Tamanho (μm)	Passante Acumulado (%)	Tamanho (mm)
100	149	99,9	0,149
150	105	99,5	0,105
200	74	95,4	0,074
270	53	76,8	0,053
325	44	61,3	0,044
400	37	50,2	0,037

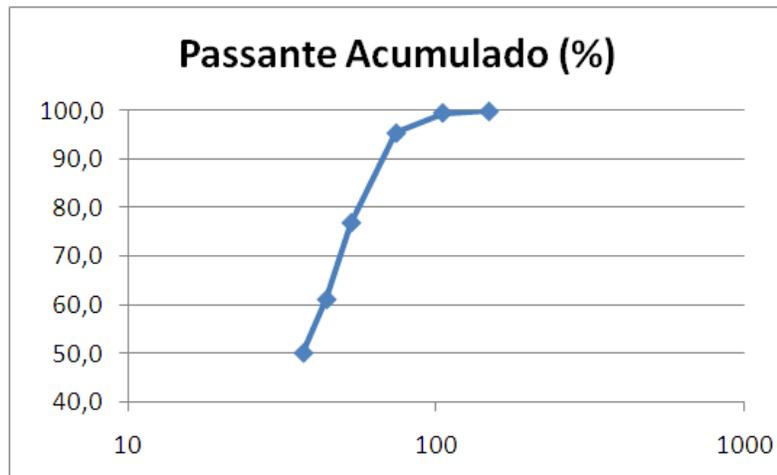


Figura 4.2 - Percentual Passante acumulado

Para efeitos de bombeamento, as partículas finas ajudam a manter as partículas mais grossas e/ou pesadas em suspensão, este efeito é auxiliado pela turbulência presente no fluxo, o que contribui com a diminuição da velocidade dos depósitos.

4.1.2.3 Características da polpa de concentrado de ferro

A seguir, na Tabela 4.3, para o fluido de características não-newtonianas, está apresentada uma faixa de viscosidade de Bingham e tensão de escoamento adotada:

Tabela 4.3- Propriedades Reológicas do concentrado

Cp (%)	Cv (%)	Vt (-)	Viscosidade (cP)	Tensão de Cisalhamento (dinas/cm²)
65	0,285	0,339	5,80	2,96
66	0,294	0,417	6,32	3,88
67	0,304	0,437	6,94	5,10
68	0,313	0,457	7,65	6,70
69	0,323	0,479	8,50	8,80
70	0,334	0,502	9,50	11,58

O pH considerado para o projeto foi de 10,5.

4.1.2.4 Propriedades da água

A seguir, se definem as propriedades da água utilizada no concentrado a transportar pelo mineroduto:

Módulo de Bulk a 30° C (GPa):	2,235
Gravidade Específica a 30° C:	0,996
Viscosidade dinâmica a 30° C (cP):	0,80
Pressão de Vapor Absoluta a 30° C (kPa):	3,91

4.1.2.5 Taxa de Corrosão admissível

A taxa de corrosão admissível assumida para esta etapa do projeto foi de 0,2 mm/ano. Na Engenharia Básica deverão ser realizados estudos mais aprofundados para determinar o valor real a ser utilizado para a taxa de corrosão, através da análise laboratorial da água de processo e polpa.

4.2 CRITÉRIOS DE VELOCIDADE DE OPERAÇÃO

A velocidade mínima de operação adotada para o projeto está baseada em sistemas de semelhantes características, vale ressaltar que os cálculos das velocidades de depósitos e velocidade de transição do regime laminar para o turbulento são complexos e geralmente dependem de softwares específicos que utilizam iterações para gerar resultados aproximados.

Na Tabela 4.4 estão definidas as velocidades mínimas adotadas para o projeto. Estas velocidades estão relacionadas à concentração do fluido transportado, a gravidade específica dos sólidos, granulometria, propriedades reológicas da polpa e ao diâmetro da tubulação:

Tabela 4.4- Velocidades mínimas de operação

Cp (%)	Vel mín (m/s)
65	1,16
66	1,05
67	0,95
68	0,86
69	0,78
70	0,69

A máxima velocidade de transporte permitida, tanto na tubulação principal como nas estações de válvulas e monitoramento será de 3,5 m/s. Esta velocidade é limitada a fim de não gerar desgaste excessivo da tubulação e componentes do sistema.

4.3 CRITÉRIOS HIDRÁULICOS

Alguns critérios para correta operação, segurança e confiabilidade do sistema devem ser adotados para transporte do concentrado pela tubulação, sendo elas indicadas na Figura 4.3:



Figura 4.3 - Critérios de operação adequada do sistema

Caso 1: (HGL – Perfil) O gradiente hidráulico em regime estacionário deve ter uma altura de pressão de pelo menos 20 m.c.f. (metros de coluna de fluido) sobre o perfil do terreno em todos os pontos e em qualquer condição de operação, para evitar cavitação (slack flow).

Caso 2: (MASP – HGL Trans) O limite máximo de pressão permissível do mineroduto será dado pela folga de 10 mcf entre o MASP (Máximo pressão admissível em fenômenos transientes) da tubulação e o HGL Trans (Gradiente hidráulico transiente).

Caso 3: (MAOP - HGL) A pressão máxima permissível de operação da tubulação (MAOP) em regime estacionário deverá superar a curva do gradiente hidráulico (HGL) com no mínimo uma altura de pressão de 40 m.c.f. (metros de coluna de fluido), em todos os pontos do traçado e em qualquer condição da operação. Isto é feito com a intenção de garantir que a resistência da tubulação seja sempre maior a pressão interna, atendendo a Norma ASME B31.11.

Caso 4: (Altura Estática - Perfil) A altura estática do sistema deve ter uma altura de pressão de pelo menos 20 m.c.f. (metros de coluna de fluido) sobre o perfil do terreno em todos os pontos na condição de parada do mineroduto.

Caso 5: (MAOP – Altura Estática) A pressão máxima permissível de operação da tubulação (MAOP) em regime estacionário deverá superar a Altura Estática com no mínimo uma altura de pressão de 40 m.c.f. (metros de coluna de fluido), em todos os pontos do traçado.

Em regime permanente as pressões transientes são estimadas mediante o método de Joukowsky.

4.4 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO SISTEMA

O dimensionamento hidráulico do mineroduto será feito atendendo as seguintes solicitações:

- a) Determinação dos diâmetros e espessuras adequadas da tubulação com suas respectivas propriedades e posicionamento das estações de monitoramento e estação de válvula.
- b) Análise e cálculo hidráulico de regime permanente do sistema sob a condição máxima, nominal e mínima de operação para cada concentração em peso dos sólidos e condições de batches de água.
- c) Análise e cálculo hidráulico de regime permanente para o ano 0 e ano 20, atendendo as condições de demanda de operação.
- d) Determinação da faixa de operação do mineroduto.

4.4.1 Diâmetro da tubulação da linha de impulsão principal

Os cálculos realizados indicam que deve ser utilizado, para o mineroduto em análise, uma tubulação de diâmetro nominal 20”, 22” e 24” de aço de alta resistência, material API 5L grau X70 com espessuras de parede variável ao longo de todo o traçado.

A Tabela 4.5 apresenta as principais características da tubulação:

Tabela 4.5- Características da tubulação para o mineroduto

Descrição	Unidade	Valor adotado
Especificação	-	API 5L Grau X70
SMYS	MPa	482,7
Diâmetro Externo	Polegadas	24" (609,6 mm) / 22" (558,8 mm) / 20" (5,8,0 mm)
Densidade	Kgf/m ³	7.850,0
Espessura do Aço	mm	11,9 / 12,7 / 14,3 / 17,5 / 19,1 / 22,2
Rugosidade	mm	0,051

4.4.2 Características da linha de impulsão principal

As características da linha de impulsão principal são as seguintes:

Tabela 4.6- Características da Linha de Impulsão Principal

De (km)	Até (km)	Diâmetro (pol)	Espessura (mm)	Comprimento (km)	Peso aço (ton)
0,00	20,00	24	14,3	20,00	4199,05
20,00	45,00	24	19,1	25,02	6958,78
45,00	56,00	24	17,5	11,02	2815,35
56,00	63,00	24	14,3	7,02	1473,10
63,00	119,00	22	14,3	56,03	10759,86
119,00	122,00	22	19,1	3,05	775,70
122,00	145,00	20	14,3	23,00	4005,22
145,00	185,00	20	11,9	40,01	5825,15
185,00	200,00	20	12,7	15,00	2327,25
				200,15	39139,46

4.4.3 Equipamentos de Bombeamento

Considera-se uma (1) estação de bombeamento localizada na quilometragem e elevação indicadas na Tabela 4.1.

Para impulsão do concentrado de minério de ferro pela tubulação principal o sistema dispõe de seis (6) bombas de deslocamento positivo, cinco (5) operando normalmente e uma (1) em “stand-by”.

Consideram-se as seguintes eficiências para o cálculo preliminar da potência das bombas:

- a) Eficiência hidráulica bomba deslocamento positivo : 95%
- b) Eficiência de transmissão : 90%

A Tabela 4.7 apresenta os requerimentos para as bombas de deslocamento positivo da estação de bombas EB para a condição máxima de operação com concentração em peso de 65% de minério de ferro:

Tabela 4.7- Requerimento de bombas de deslocamento positivo

Estação de Bombeamento	Nº Bombas deslocamento positivo		Vazão por bomba (m ³ /h)	Pressão Descarga Máx. Operação (kPa)	Potência (kW)		
	Op.	Stand-by			Hidráulica	Consumida	Instalada por bomba
EB	5	1	453,31	14.855	1.269	2.188	2.250

4.5 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE

4.5.1 Condição de Parada do Sistema

As Figuras 4.4 e 4.5, apresentam a Altura Estática para esta condição de parada do sistema, para o ano 0 e o ano 20.



Figura 4.4 - Altura Estática do sistema Ano 0

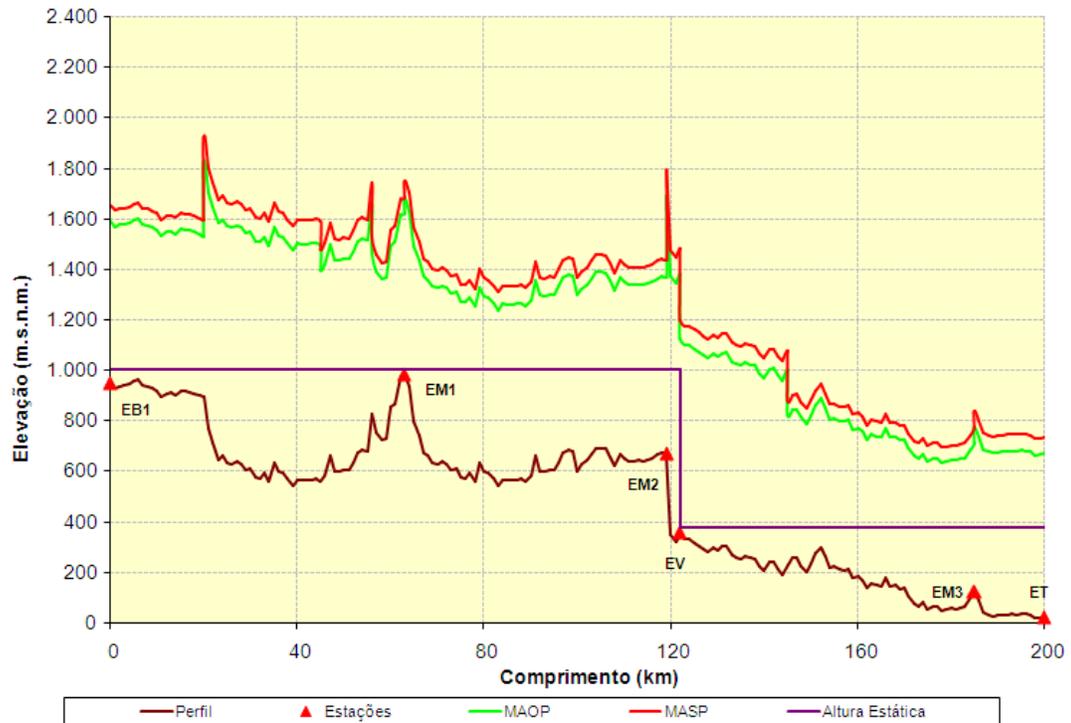


Figura 4.5 - Altura Estática do sistema Ano 20

A Tabela 4.8 apresenta as folgas operacionais do mineroduto para a condição de parada do sistema, para os anos 0 e 20.

Tabela 4.8: Folgas operacionais, Condição de parada, Ano 0 e Ano 20

Estação	(Altura Estática - Perfil) mcf		(MAOP - Altura Estática) mcf	
	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20
EB	55,00	55,00	604,38	356,44
EM1	20,00	20,00	505,24	234,69
EM2	332,00	332,00	608,91	338,36
EV	20,00	20,00	556,72	259,00
EM3	250,00	250,00	585,26	287,54
ET	353,00	353,00	505,24	234,69

Observa-se que as folgas operacionais para este cenário atendem os critérios de folgas do item 4.3 deste relatório.

A Tabela 4.9 apresenta as pressões máximas a montante e jusante dos principais pontos de controle do mineroduto para a condição de parada do sistema do Ano 0 e Ano 20:

Tabela 4.9: Pressões de operação, Condição de parada, Ano 0 e Ano 20

Estação	Pressão Estática (kPa)	
	Ano 0 e Ano 20	
	Montante	Jusante
EB	-	1.123,32
EM1	408,48	408,48
EM2	6.780,76	6.780,76
EV	13.234,73	408,48
EM3	5.105,99	5.105,99
ET	7.209,66	-

4.5.2 Condição de Tonelagem Nominal

A condição de tonelagem nominal é determinada por uma vazão de 2.067 m³/h e uma concentração em peso de 67% com uma capacidade de 24 MTSPA.

As velocidades do fluido por trechos, espessuras e perdas de carga obtidas na tubulação, ao operar em condições de tonelagem nominal no Ano 0 e Ano 20 são apresentadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Dimensionamento hidráulico, Condição Nominal, Ano 0 e Ano 20

De (km)	Até (km)	Diâmetro Nominal (pol)	Comprimento (km)	Espessura (mm)		Velocidade (m/s)		Perda de Carga (m/km)	
				Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20
0,00	20,00	24,00	20,00	14,30	10,30	2,16	2,10	4,44	4,22
20,00	45,00	24,00	25,02	19,10	15,10	2,24	2,18	4,73	4,49
45,00	56,00	24,00	11,02	17,50	13,50	2,21	2,15	4,63	4,40
56,00	63,00	24,00	7,02	14,30	10,30	2,16	2,10	4,44	4,22
63,00	119,00	22,00	56,03	14,30	10,30	2,60	2,52	6,26	5,92
119,00	122,00	22,00	3,05	19,10	15,10	2,70	2,61	7,16	6,76
122,00	145,00	20,00	23,00	14,30	10,30	3,18	3,08	9,77	9,18
145,00	185,00	20,00	40,01	11,90	7,90	3,12	3,02	9,52	8,95
185,00	200,00	20,00	15,00	12,70	8,70	3,14	3,04	9,64	9,06

A Figura 4.6 e 4.7, apresentam o gradiente hidráulico (HGL) desta condição, para o ano 0 e o ano 20. Também apresentam a pressão máxima admissível de operação normal (MAOP), a pressão máxima admissível para fenômenos transientes (MASP) e o aumento de pressão estimado pelo método de Joukowsky (HGL – Trans).

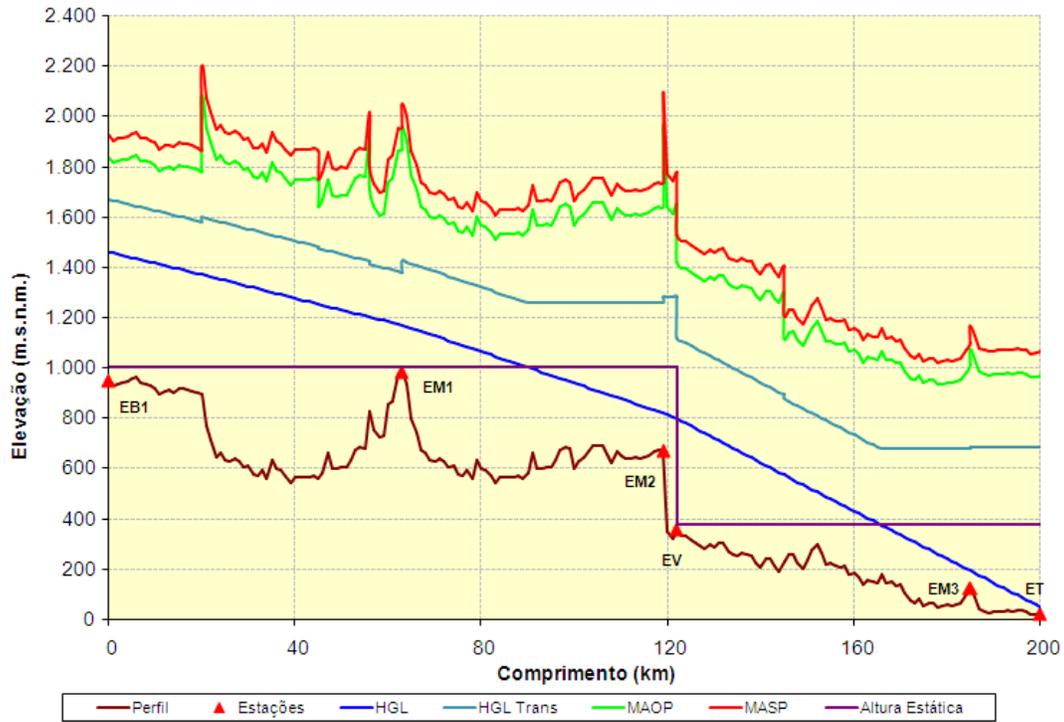


Figura 4.6 - Gradiente Hidráulico do sistema a 67% e vazão de 2.067 m³/h, Ano 0



Figura 4.7- Gradiente Hidráulico do sistema a 67% e vazão de 2.067 m³/h, Ano 20

A Tabela 4.11 apresenta as folgas operacionais do mineroduto para a condição de tonelage nominal de operação, para os anos 0 e 20.

Tabela 4.11: Folgas operacionais, Condição nominal a 67%, Ano 0 e Ano 20

Estação	(HGL - Perfil) mcf		(MAOP - HGL) mcf		(MASP - HGL Trans) mcf	
	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20
EB	186,81	121,37	360,69	192,42	239,69	66,15
EM1	148,07	101,76	445,65	236,43	286,27	71,91
EM2	148,07	101,76	807,52	582,46	459,23	180,28
EV	66,58	57,89	543,34	277,12	329,70	50,52
EM3	25,00	25,00	810,98	520,79	371,76	76,99
ET	25,00	25,00	360,69	192,42	239,69	50,52

Observa-se que as folgas operacionais para este cenário atendem os critérios de folgas do item 4.3 deste relatório.

A Tabela 4.12 apresenta as pressões máximas a montante e jusante dos principais pontos de controle do mineroduto para a condição nominal de operação a 67% no Ano 0 e Ano 20 de operação:

Tabela 4.12: Pressões de operação, Condição nominal a 67%, Ano 0 e Ano 20

Estação	Pressão Dinâmica (kPa)			
	Ano 0		Ano 20	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante
EB	-	10.439,29	-	8.807,72
EM1	3.815,37	3.815,37	2.478,82	2.478,82
EM2	3.024,14	3.024,14	2.078,31	2.078,31
EV	9.032,11	9.032,11	8.111,08	8.111,08
EM3	1.359,73	1.359,73	1.182,30	1.182,30
ET	510,60	-	510,60	-

4.5.3 Condição de Tonelagem Máxima

A condição de tonelagem máxima é determinada por uma vazão de 2.163 m³/h e uma concentração em peso de 70% com uma capacidade de 27,58 MTSPA.

As velocidades do fluido por trechos, espessuras e perdas de carga obtidas na tubulação, ao operar em condições de tonelagem máxima no Ano 0 e Ano 20 são apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13- Dimensionamento hidráulico, Condição Máxima, Ano 0 e Ano 20

De (km)	Até (km)	Diâmetro Nominal (pol)	Comprimento (km)	Espessura (mm)		Velocidade (m/s)		Perda de Carga (m/km)	
				Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20
0,00	20,00	24,00	20,00	14,30	10,30	2,26	2,09	5,00	4,31
20,00	45,00	24,00	25,02	19,10	15,10	2,34	2,16	5,32	4,58
45,00	56,00	24,00	11,02	17,50	13,50	2,31	2,14	5,21	4,49
56,00	63,00	24,00	7,02	14,30	10,30	2,26	2,09	5,00	4,31
63,00	119,00	22,00	56,03	14,30	10,30	2,72	2,50	7,04	6,04
119,00	122,00	22,00	3,05	19,10	15,10	2,82	2,60	8,05	6,90
122,00	145,00	20,00	23,00	14,30	10,30	3,33	3,06	10,98	9,35
145,00	185,00	20,00	40,01	11,90	7,90	3,26	3,00	10,70	9,12
185,00	200,00	20,00	15,00	12,70	8,70	3,28	3,02	10,83	9,23

As Figuras 4.8 e 4.9, apresentam o gradiente hidráulico (HGL) desta condição, para o ano 0 e o ano 20. Também apresentam a pressão máxima admissível de operação normal (MAOP), a pressão máxima admissível para fenômenos transientes (MASP) e o aumento de pressão estimado pelo método de Joukowsky (HGL – Trans).



Figura 4.8 - Gradiente Hidráulico do sistema a 70% e vazão de $2.163 \text{ m}^3/\text{h}$, Ano 0



Figura 4.9 - Gradiente Hidráulico do sistema a 70% e vazão de $2.052 \text{ m}^3/\text{h}$, Ano 20

A Tabela 4.14 apresenta as folgas operacionais do mineroduto para a condição de tonelage máxima de operação a 70%, para os anos 0 e 20.

Tabela 4.14: Folgas operacionais, Condição máxima a 70%, Ano 0 e Ano 20

Estação	(HGL - Perfil) mcf		(MAOP - HGL) mcf		(MASP - HGL Trans) mcf	
	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20
EB	326,40	141,79	142,04	135,15	10,00	10,00
EM1	243,73	115,46	268,23	183,42	95,83	22,32
EM2	243,73	115,46	650,59	519,15	380,42	130,65
EV	84,49	60,45	434,97	239,06	207,33	24,97
EM3	25,00	25,00	749,28	486,94	311,02	48,31
ET	25,00	25,00	142,04	135,15	10,00	10,00

Observa-se que as folgas operacionais para este cenário atendem os critérios de folgas do item 4.3 deste relatório.

A Tabela 4.15 apresenta as pressões máximas a montante e jusante dos principais pontos de controle do mineroduto para a condição máxima de operação a 70% no Ano 0 e Ano 20:

Tabela 4.15: Pressões de operação, Condição máxima a 70%, Ano 0 e Ano 20

Estação	Pressão Dinâmica (kPa)			
	Ano 0		Ano 20	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante
EB	-	14.752,72	-	9.821,96
EM1	7.008,71	7.008,71	3.044,58	3.044,58
EM2	5.233,67	5.233,67	2.479,20	2.479,20
EV	11.491,49	11.491,49	8.812,85	8.812,85
EM3	1.814,16	1.814,16	1.298,03	1.298,03
ET	536,82	-	536,82	-

4.5.4 Condição de Tonelagem Mínima

A condição de tonelagem mínima é determinada por uma vazão de 1.915 m³/h e uma concentração em peso de 65% com uma capacidade de 20,88 MTSPA.

As velocidades do fluido por trechos, espessuras e perdas de carga obtidas na tubulação, ao operar em condições de tonelagem mínima no Ano 0 e Ano 20 são apresentadas na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Dimensionamento hidráulico, Condição Mínima, Ano 0 e Ano 20

De (km)	Até (km)	Diâmetro Nominal (pol)	Comprimento (km)	Espessura (mm)		Velocidade (m/s)		Perda de Carga (m/km)	
				Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20
0,00	20,00	24,00	20,00	14,30	10,30	2,00	2,01	3,80	3,83
20,00	45,00	24,00	25,02	19,10	15,10	2,07	2,08	4,04	4,07
45,00	56,00	24,00	11,02	17,50	13,50	2,05	2,06	3,95	3,98
56,00	63,00	24,00	7,02	14,30	10,30	2,00	2,01	3,80	3,83
63,00	119,00	22,00	56,03	14,30	10,30	2,41	2,41	5,33	5,35
119,00	122,00	22,00	3,05	19,10	15,10	2,50	2,50	6,09	6,11
122,00	145,00	20,00	23,00	14,30	10,30	2,95	2,94	8,32	8,30
145,00	185,00	20,00	40,01	11,90	7,90	2,89	2,89	8,10	8,09
185,00	200,00	20,00	15,00	12,70	8,70	2,91	2,90	8,20	8,19

As Figura 4.10 e 4.11, apresentam o gradiente hidráulico (HGL) desta condição, para o ano 0 e o ano 20. Também apresentam a pressão máxima admissível de operação normal (MAOP), a pressão máxima admissível para fenômenos transientes (MASP) e o aumento de pressão estimado pelo método de Joukowsky (HGL – Trans).

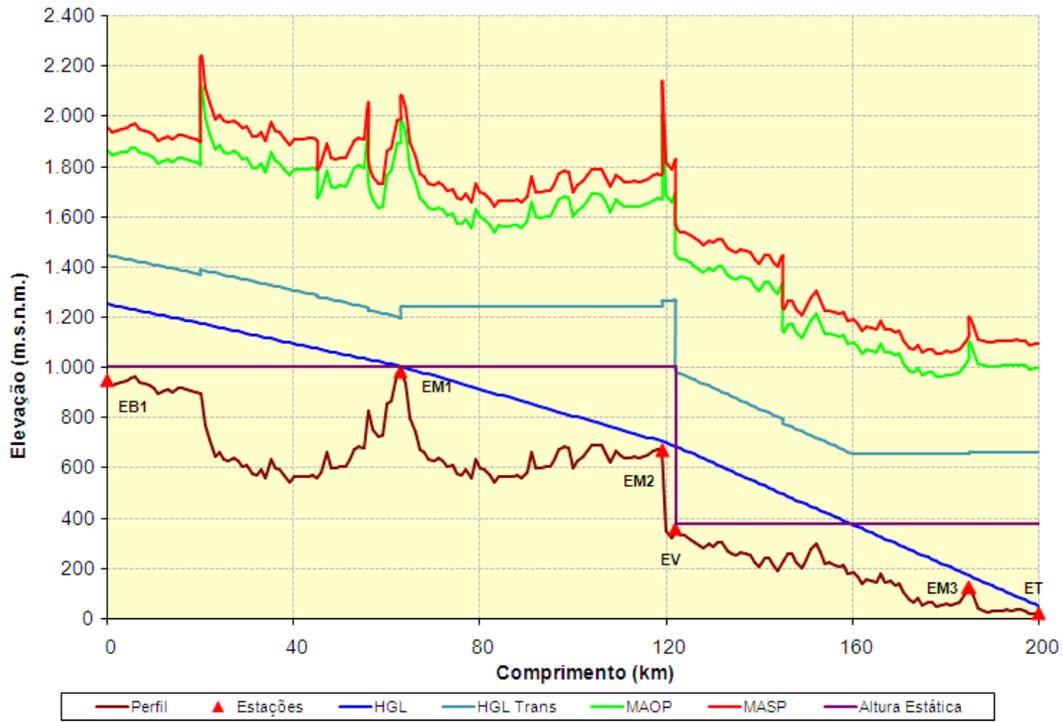


Figura 4.10 - Gradiente Hidráulico do sistema a 65% e vazão de 1.915 m³/h, Ano 0



Figura 4.11 - Gradiente Hidráulico do sistema a 65% e vazão de 1.977 m³/h, Ano 20

A Tabela 4.17 apresenta as folgas operacionais do mineroduto para a condição de tonelage mínima de operação a 65%, para os anos 0 e 20.

Tabela 4.17: Folgas operacionais, Condição mínima a 65%, Ano 0 e Ano 20

Estação	(HGL - Perfil) mcf		(MAOP - HGL) mcf		(MASP - HGL Trans) mcf	
	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20	Ano 0	Ano 20
EB	20,00	20,00	597,99	340,02	493,58	222,33
EM1	20,00	20,00	631,83	352,76	397,32	104,87
EM2	33,16	32,05	962,32	684,10	523,99	226,09
EV	45,06	44,83	650,39	343,71	394,57	80,67
EM3	25,00	25,00	859,61	552,37	425,81	109,62
ET	20,00	20,00	597,99	340,02	394,57	80,67

Observa-se que as folgas operacionais para este cenário atendem os critérios de folgas do item 4.3 deste relatório.

A Tabela 4.18 apresenta as pressões máximas a montante e jusante dos principais pontos de controle do mineroduto para a condição mínima de operação a 65% no Ano 0 e Ano 20:

Tabela 4.18: Pressões de operação, Condição mínima a 65%, Ano 0 e Ano 20

Estação	Pressão Dinâmica (kPa)			
	Ano 0		Ano 20	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante
EB	-	5.974,56	-	6.013,91
EM1	395,60	395,60	395,60	395,60
EM2	655,92	655,92	633,97	633,97
EV	6.538,51	6.538,51	6.515,56	6.515,56
EM3	891,19	891,19	886,82	886,82
ET	494,50	-	494,50	-

4.5.5 Condição de Operação com Batches de Água

São simuladas operações em regime permanente de batches de água deslocando polpa e batches de polpa deslocando água, para uma concentração em peso nominal de 67%.

A Figura 4.12 e Figura 4.13 apresentam um gradiente hidráulico para uma condição de operação com um trecho de tubulação (“batch”), cheio de água no ano 0, que se desloca através do mineroduto estando o resto do mineroduto cheio de concentrado, com uma concentração em peso de 67% na vazão de 2.067 m³/h. A interface água/concentrado está localizada no quilômetro 125 devido este trecho ser o de condição de interface mais exigente para o sistema.

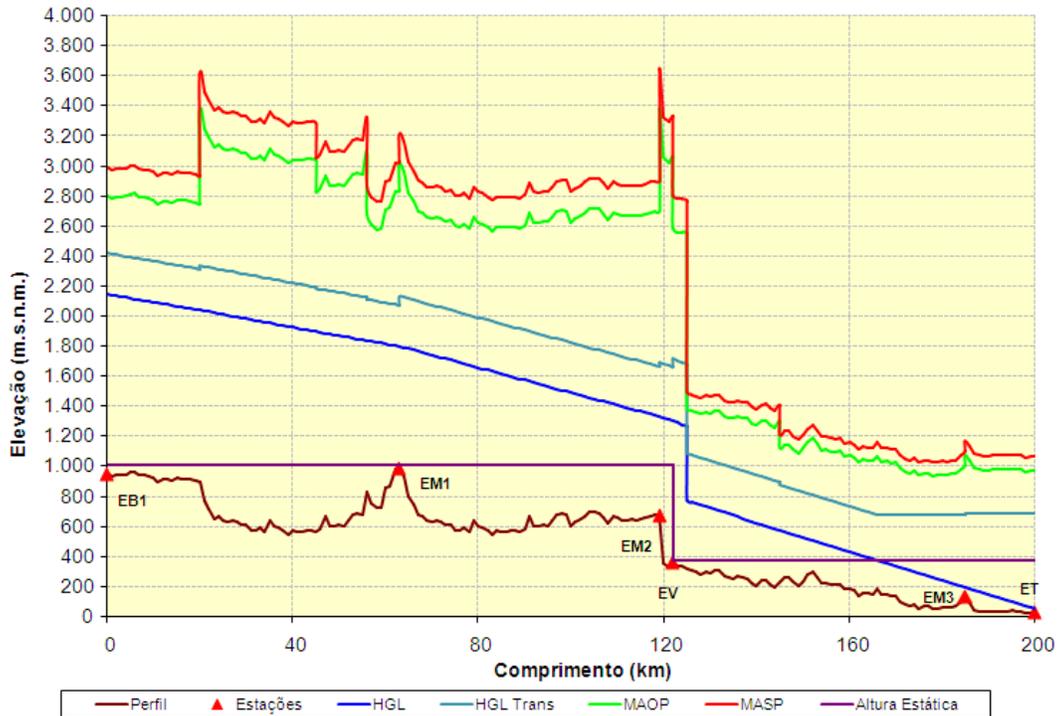


Figura 4.12 - Batch de água impulsionando polpa a 67%, quilômetro 125, ano 0



Figura 4.13 - Batch de polpa impulsionando água a 67%, quilômetro 125, ano 0

Durante o envio de batches tanto de água como de polpa, procurar ter cuidado com um aumento excessivo de pressões e/ou corte de coluna em algum trecho do mineroduto.

O envio de batch pode ser feito para toda a faixa de vazões dentro de cada concentração em peso. Devido aos aumentos de pressão, os cortes de coluna (“slack flow”) deverão controlar a vazão de impulsão na medida em que o batch avança.

Para evitar aumento de pressão devido batches de água e polpa, é recomendável diminuir concentrações depois do envio de um batch de água, e limitar o número de batches de água consecutivos. As condições mais desfavoráveis são obtidas por haver mais de um batch de água tendo início em pontos altos e terminando em pontos baixos.

Existem muitas combinações de comprimento de trechos com água e comprimentos de trechos com polpa que podem gerar estas condições de maiores pressões no sistema. A forma de realizar o trânsito de interfaces é mediante a modificação de velocidades de fluxo no sistema e a incorporação e/ou retiro de anéis dissipadores nas estações dissipadoras. Ainda que se apresentem pressões maiores com a passagem de batches no

sistema, mantendo um controle permanente das pressões, pode ser realizado o transporte de batches sem apresentar riscos para o mineroduto.

4.5.6 Faixa de Operação do Mineroduto

De acordo com os dados reológicos, características da tubulação e do concentrado considerados para o projeto, e após realizar as análises para todas as condições de operação atendendo as concentrações em peso e vazões mínima, nominal e máxima, obtém-se a faixa de operação do mineroduto para toda sua vida útil, apresentado na Figura 4.14.

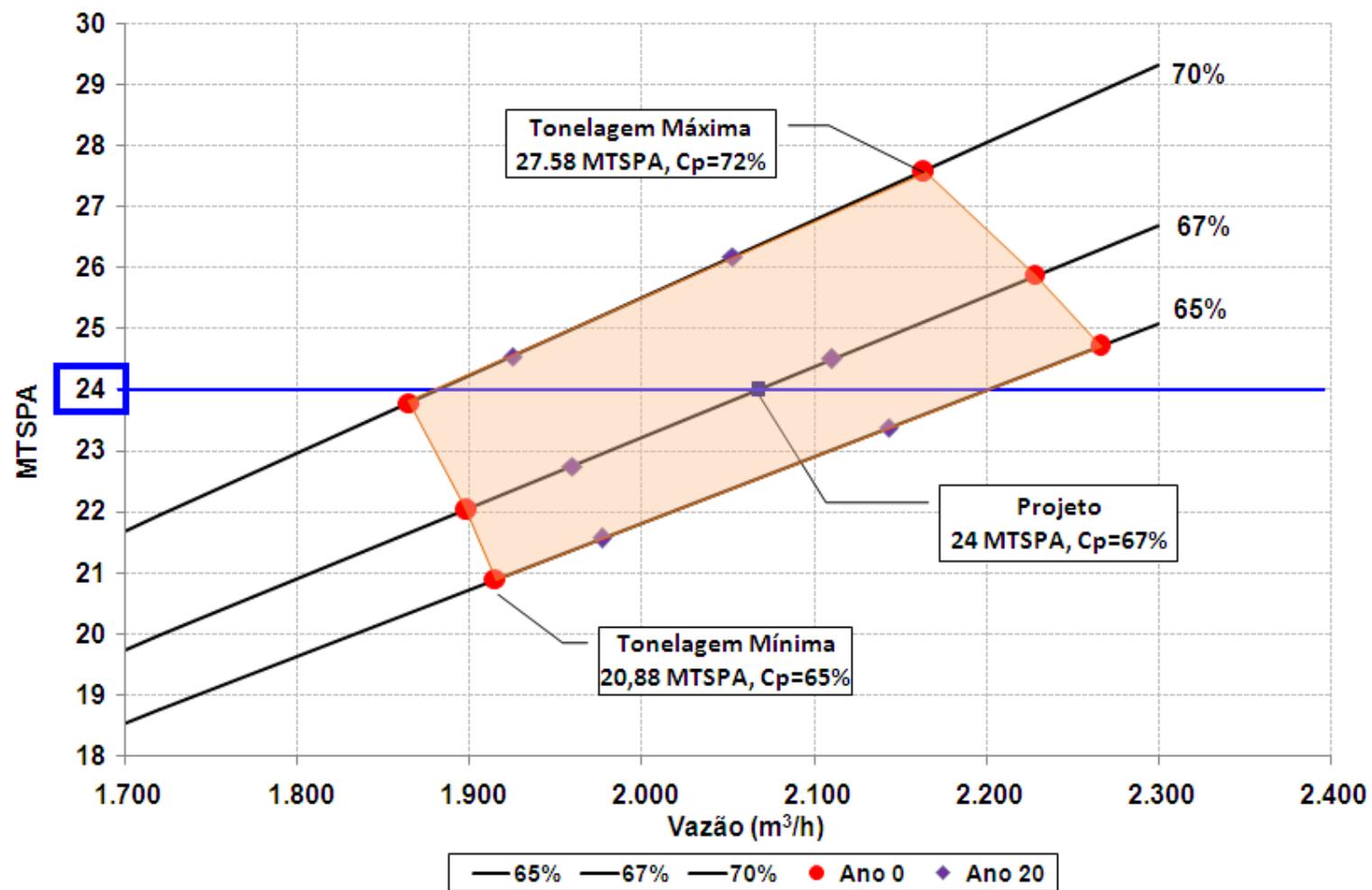


Figura 4.14 - Faixa de Operação do Mineroduto

A faixa de operação preliminar se encontra limitada à direita pela folga da máxima pressão de operação transiente MASP em regime permanente. À esquerda, se encontra limitada pela mínima vazão permitida segundo a configuração do sistema e folga entre o HGL e Perfil do terreno, a fim de se evitar “slack flow”.

Um resumo dos limites da Faixa de Operação do mineroduto é detalhado na tabela 4.19 abaixo:

Tabela 4.19: Resumo da Faixa operacional do mineroduto

Condição Operação	Vazão (m3/h)	Cp	MTSPA	TSPH	Variação (%)
Mínima	1.915	65%	20,88	2.509	-13,0%
Nominal	2.067	67%	24,00	2.884	---
Máxima	2.163	70%	27.58	3.314	+14,9%

É importante destacar que esta faixa de operação pode ser levemente modificada, aumentando a quantidade de anéis fixos na linha, de modo que, para os anos de menor produção, a faixa possa ser modificada para os níveis máximos e mínimos conforme a variação da produção.

5 CONCLUSÃO

Através do estudo de caso, verificou-se a viabilidade operacional do mineroduto de longa distância para transporte de minério de ferro com capacidade nominal de 24,0 milhões de toneladas secas por ano com uma vida útil de 20 anos.

O mineroduto possui extensão total de 200km com tubulação API 5L Gr. X70 de diâmetro nominal 24” nos primeiros 63km, diâmetro de 22” do km 63 ao km 122 e diâmetro 20” no trecho que compreende o km 122 ao km 200 na estação terminal (ET).

Os resultados das análises incluem as características da linha principal, análise e cálculo hidráulico do regime permanente sob diferentes cenários de operação (condição máxima, nominal, mínima, “batches” de água e parada do sistema), determinação das folgas hidráulicas e determinação da faixa de operação do mineroduto.

Observou-se que em nenhum dos trechos das alternativas propostas, as pressões máximas admissíveis na tubulação foram ultrapassadas, segundo o código ASME B31.11.

Durante o desenvolvimento da seguinte etapa de engenharia deve-se realizar análise de reologia do concentrado de ferro que será transportado, assim como a análise laboratorial da água de processo para, desta forma, validar o projeto anteriormente mencionado e realizar novos cálculos que permitam ao sistema operar adequadamente com as novas condições hidráulicas e corrosivas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como alguns itens deste trabalho foram introduzidos de forma parcial, é necessário um estudo mais elaborado na determinação de seus valores específicos aplicados diretamente ao projeto em estudo:

- Análise de sobre pressões em regime transiente para validar e/ou modificar as espessuras propostas na análise em regime permanente, simulação de transientes em operação normal (partidas e paradas) e de emergência (fechamento acidental de válvulas e cortes de energia) para o mineroduto.
- Desenvolvimento de modelos matemáticos para cálculo das velocidades mínimas de deposição e transição.
- Análises químicas para determinação da real taxa de corrosão e desgaste da tubulação.

7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

BETINOL, R.G.;ROJAS L.N. (2008). Slurry Pipeline Design Approach. Chile.

BHP BILITON. (2007). Critério general de diseño hidráulica. Santiago.

BRASS Engineering, (2008). Curso de hidráulica Aplicada a mineroductos. Santiago.

CHAVES, A. P. (2002 a). Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Volume 1. São Paulo: Signus Editora.

MACINTYRE, A. J. (1987). Bombas e Instalações de Bombeamento. Editora Guanabara.

NASCIMENTO, C. R. (2008). Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Minerais. Série Rochas e Minerais Industriais. CETEM. 54p.

POSSA, M. V. (2000). Comportamento Reológico de Polpas de Minério. Série Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM. 37p.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME B31.11, The Slurry Transportation Piping Systems, New York, 2002, 86p.

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

WARMAN, (2009). Slurry Pump Handbook. Centrifugal Slurry Pumps. Fifth Edition.