

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

ESTUDO DE BOMBEAMENTO
DE PARTÍCULAS GROSSAS

Aluno: Alisson Miler Vidal

Professor Orientador: George Eduardo Sales Valadão

Agosto - 2011

DEDICATÓRIA

A minha família,

que sempre me apoia em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me concedeu força, saúde e paz para vencer todos os meus desafios.

Ao meu Orientador Professor George Valadão, pela paciência e ótimas idéias.

Ao Professor Paulo Viana, pelas conversas sempre produtivas.

Agradeço aos professores do CEERMIN pelos ensinamentos.

Aos colegas de trabalho, Ana Flávia, Antônio Bernucci, Antônio Trevisam (in memoriam) Daniel Pinto, Daniel Sá, Hevaldo Duarte, Jay Chapman, Marcos Eustachio, Paulo, Rafael Lima e Thales Simon pelo incentivo, auxílio e companheirismo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO E RELEVÂNCIA.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Características do fluido	5
3.1.1	Massa.....	5
3.1.2	Volume.....	5
3.1.3	Densidade (ρ).....	6
3.1.4	Peso Específico (SG).....	6
3.1.5	Pressão de Vapor	6
3.1.6	Módulo de Elasticidade e velocidade Acústica da onda.....	6
3.1.7	Viscosidade Dinâmica.....	8
3.1.8	Viscosidade Cinemática.....	8
3.2	Concentração de sólidos	9
3.3	Tonelagem transportada x vazão	10
3.4	Reologia	10
3.5	Granulometria	15
3.6	Corrosão e abrasão.....	17
3.7	Tipos de fluxos.....	18
3.7.1	Permanente	18
3.7.2	Não permanente	19
3.7.3	Uniforme	19
3.7.4	Não uniforme.....	19
3.7.5	Fluxo laminar, de transição e turbulento	19
3.7.6	Pressão atmosférica	20
3.7.7	Pressão manométrica.....	21
3.7.8	Equação de Bernoulli	21
3.7.9	Gradiente hidráulico.....	23
3.7.10	Perda de carga	24

3.7.11	Perdas de Carga Lineares	25
3.7.12	Perdas de carga singulares.....	28
3.7.13	Fenômenos de transientes.....	30
3.8	Velocidade crítica	30
3.8.1	Velocidade de deposição	31
3.8.2	Velocidade de transição.....	34
3.9	Tipos de bombas	37
4	ESTUDO DE CASO	40
4.1	Projeto conceitual	40
4.2	Projeto básico.....	41
4.2.1	Porcentagem de sólidos e o peso específico	43
4.2.2	Reologia da polpa	43
4.2.3	Distribuição granulométrica.....	45
4.2.4	Testes de penetração.....	46
4.2.5	Testes de ângulo de repouso e de escorregamento.....	47
4.2.6	Teste de corrosão	50
4.3	Projeto detalhado	51
4.4	Projeto elaborado	52
4.5	Construção	55
4.6	Análise do comissionamento	59
4.6.1	Bombeamento normal	59
4.6.2	Evento de transiente	63
4.6.3	Longa parada com polpa.....	64
5	CONCLUSÃO	66
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	67
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Tipos de peneira.....	16
Tabela 3.2: Rugosidade dos materiais	27
Tabela 3.3: Valores de singularidades K.....	30
Tabela 4.1: Concentração de sólidos como recebido	43
Tabela 4.2: Resultados da Reologia	44
Tabela 4.3: Distribuição granulométrica	45
Tabela 4.4: Testes de penetração.....	47
Tabela 4.5: Testes de ângulo de repouso.....	49
Tabela 4.6: Testes de ângulo de escorregamento	50
Tabela 4.7: Faixa de operação	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Depósito de sólidos na tubulação (AUSENCOPSI, 2007).	4
Figura 3.2: Gradiente de velocidade (AUSENCOPSI, 2007).	11
Figura 3.3: Modelos reológicos (AUSENCOPSI, 2007).....	13
Figura 3.4: Esquema de peneiramento de malhas diferentes (AUSENCOPSI, 2007). .	15
Figura 3.5: Abrasão por impacto (ASPEN TECHNOLOGY, 2003).	18
Figura 3.6: Abrasão por formas das partículas (ASPEN TECHNOLOGY, 2003).	18
Figura 3.7: Regimes de transporte (AUSENCOPSI, 2007).....	20
Figura 3.8: Variação da pressão atmosférica normal.	21
Figura 3.9: Definição equação de Bernoulli (AUSENCOPSI, 2007).	23
Figura 3.10: Linha de gradiente hidráulico (LAROOCK et al., 2000).....	23
Figura 3.11: Perda de carga em um tubo (AUSENCOPSI, 2007).....	25
Figura 3.12: Ábaco de Moody (MACINTYRE, 1987).	28
Figura 3.13: F_L para material uniforme (CHAVES, 2002 a).....	32
Figura 3.14: F_L para não material uniforme (CHAVES, 2002 a).	33
Figura 3.15: Curva J (CHAVES, 2002 a).....	34
Figura 3.16: Número de Reynolds x Número de Hedstrom.	36
Figura 3.17: Corte de um bomba de deslocamento positivo (GEHO, 2011).....	38
Figura 3.18: Bomba de deslocamento positivo (GEHO, 2011).....	39
Figura 3.19: Desenho em corte de uma bomba centrífuga	39
Figura 3.20: Instalação bombas centrífugas em série (CHAPMAN, et al. 2009).	40
Figura 4.1: Viscosidade reduzida x concentração de sólidos (AUSENCOPSI, 2006 a).44	
Figura 4.2: Tensão de cisalhamento x concentração de sólidos (AUSENCOPSI, 2006 a).	45
Figura 4.3: Distribuição granulométrica (AUSENCOPSI, 2006 a).....	46
Figura 4.4: Fases do teste de penetrômetro com carga variável	47
Figura 4.5: Parada ideal do bombeamento.	49

Figura 4.6: Corrosão da polpa (AUSENCOPSI, 2006 a).	51
Figura 4.7: Faixa de servidão típica (AUSENCOPSI, 2006 b).	55
Figura 4.8: Desfile de tubos (AUSENCOPSI, 2006 b).	56
Figura 4.9: Abertura de vala (AUSENCOPSI, 2006 b).....	56
Figura 4.10: União da junta (AUSENCOPSI, 2006 b).....	57
Figura 4.11: Proteção da junta (AUSENCOPSI, 2006 b).....	57
Figura 4.12: Abaixamento do tubo (AUSENCOPSI, 2006 b).....	58
Figura 4.13: Cobertura do tubo (AUSENCOPSI, 2006 b).	58
Figura 4.14: Gradiente hidráulico para água.	59
Figura 4.15: Gradiente hidráulico para polpa com 62,8% (Cp).	60
Figura 4.16: Gradiente hidráulico para polpa com 66,0% (Cp).	61
Figura 4.17: Gradiente hidráulico para polpa com 66,0% (Cp).	62
Figura 4.18: Gradiente hidráulico durante a limpeza do mineroduto.....	63
Figura 4.19: Evento de transiente durante queda de energia das bombas.	64
Figura 4.20: Curva de densidade no terminal.....	65

RESUMO

Nos últimos anos o transporte de polpas minerais via tubulação denominada mineroduto tem tido grande relevância nos projetos executados no Brasil e no mundo, principalmente as polpas de concentrado de minério de ferro. Somente em Minas Gerais existem dois minerodutos em operação (Samarco) e dois em fase de projeto e implantação de propriedade da Samarco e Anglo Ferrous Brasil, respectivamente. Em geral os principais minerodutos de concentrado de minério de ferro são de longa distância, com comprimento que varia de 100 a 500 km, e granulometria de $150\mu\text{m} = 99,60\%$ e $45\mu\text{m} = 86,00\%$. Porém, outra alternativa de transporte são os minerodutos de curta distância com poucos quilômetros de comprimento e projetados para uma ampla faixa de sólidos com partículas finas e/ou grossas, $150\mu\text{m} = 96,99\%$ e $45\mu\text{m} = 46,65\%$. O trabalho apresentado mostra ser tecnicamente e economicamente viável um mineroduto de curta distância com as características mostradas. Outro fator importante é a vantagem do mineroduto sobre outros modais, como exemplo a ferrovia que consome uma quantidade excessiva de combustível e mão de obra, elevando o custo operacional em aproximadamente US\$ 15/tonelada.

ABSTRACT

In the past few years the mineral slurry transportation using pipelines has been of great relevance in the projects run in Brazil and in the world, mainly the iron ore concentrate slurries. There are two pipelines in operation (Samarco) and two in the design phase and implementation owned by Samarco and Anglo Ferrous Brazil, respectively. In general, the main iron ore concentrate slurry pipelines are the long distance type, with length varying between 100 to 500 km, and granulometry of $150\mu\text{m} = 99,60\%$ e $45\mu\text{m} = 86,00\%$. However, another alternative are the short distance pipelines, designed for a wide range of solids and containing fine and/or coarse particles $150\mu\text{m} = 96,99\%$ e $45\mu\text{m} = 46,65\%$. The presented paper shows the technical and economical viability of short pipeline transportation with the properties showed above. Another important factor is the advantage of the pipeline against other modes, such as the railroad that consumes an excessive amount of fuel and labor, increasing operating costs by approximately US\$ 15/tonnes.

1 INTRODUÇÃO

Os recursos minerais estão cada vez mais afastados dos portos, usinas e os pontos de uso final. Os minerodutos são um importante meio de transporte de sólidos, pois representam um transporte econômico e ambientalmente seguro para uma grande variedade de polpas.

Em geral os principais minerodutos no mundo são de longa distância, com comprimento em torno de 400 km, exemplo disto são os minerodutos da Samarco Mineração, Fosfertil e Anglo American (Sistema Minas-Rio, em implantação), sendo todos estes instalados no Brasil. Porém outra alternativa de transporte são os minerodutos de curta distância que operam geralmente com poucos quilômetros de comprimento e são projetados para polpas contendo partículas de sólido finas ou grossas.

O transporte de partículas grossas torna-se um desafio devido às dificuldades em manter as partículas em suspensão, sendo necessária uma alta de velocidade de transporte o que leva a um elevado índice de desgaste por abrasão.

Um mineroduto deste tipo foi projetado e implantado por uma empresa do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, com um comprimento de 5 km, diâmetro de 12,75 polegadas (323,8 mm) revestido internamente com borracha natural e para uma produção de 840 t/h (toneladas por hora). Neste caso, a polpa de minério de ferro é transportada desde a Mina até a planta de pelotização, sendo que antes do transporte o produto é remoído a fim de se adequar ao processo de pelotização. Este projeto se tornou economicamente viável devido ao uso do mineroduto, visto que o transporte por outro tipo de modal, como o caminhão, elevaria o custo operacional e causaria também um transtorno para a população no entorno da mina e da planta de pelotização devido ao número elevado de caminhões que seriam necessários para transportar esta quantidade de minério.

2 OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O objetivo deste trabalho é apresentar as características de um sistema de transporte de partículas grossas de minério de ferro através de um mineroduto de curta distância, onde será estudado e apresentado:

- Critérios adotados;
- Etapas do projeto;
- Projeto elaborado;
- Construção;
- Análise do comissionamento.

O transporte de materiais grosseiros quando comparado com partículas de minério de ferro convencionais de longa distância tem-se mostrado ser tecnicamente e economicamente viável. Este tipo de mineroduto é uma opção para o transporte de materiais grosseiros de várias minas para ser entregue em uma planta de concentração única de modo a gerar o concentrado final.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O transporte de minério através de dutos, apesar de ainda pouco explorado, vem se ampliando cada vez mais em todo o mundo, demonstrando ter uma série de vantagens em relação a outros meios de transporte em grande escala, a saber: facilidade de implantação, alta confiabilidade, menor risco de acidentes, baixo consumo de energia. Apesar do alto investimento inicial, apresenta baixo custo operacional, de manutenção e de pessoal, bem como pequeno impacto ambiental, pois o risco de vazamentos é muito pequeno. O número de minerodutos tenderá a crescer pelo fato de os depósitos brasileiros de minério se situarem em locais distantes de pontos de consumo. O sistema de transporte convencional, normalmente é deficitário, sem contar com a grande dependência de importação de combustíveis fósseis, cerca de 10% do óleo diesel consumido no Brasil é importado (MME, 2011), que são fatores encarecedores do transporte por rodovia ou ferrovia.

Minerodutos são sistemas de transporte de suspensões minerais por tubulação, seja por bombeamento hidráulico ou por gravidade. As polpas minerais são usualmente constituídas por concentrados, rejeitos, e pastas.

O transporte por mineroduto é um dos grandes diferenciais competitivos das empresas, pois opera com baixos custos operacionais e elevada confiabilidade, além de proporcionar grande segurança operacional tem pequeno impacto ambiental quando comparado com os sistemas convencionais de transporte.

Em sistemas de transporte de minerais, normalmente o fluido transportador é a água, podendo-se também utilizar óleo ou outro líquido. O material a ser transportado deve estar finamente moído para ser misturado à água para a formação de uma polpa. Obviamente, este sistema só é viável se há disponibilidade de água a baixo custo e se o produto não for afetado pela mesma, isto é, se o produto for recuperável após a secagem sem alteração de suas propriedades.

O transporte pode ser por gravidade, se existir um desnível geométrico favorável na rota onde a tubulação vai passar, ou através do bombeamento da polpa.

Normalmente, a tubulação opera constantemente cheia e na falta de polpa (baixa produção) é possível o bombeamento de água em bateladas, a fim de manter a operação constante do mineroduto sem que haja paradas no bombeamento.

O regime de operação normalmente é turbulento, de modo que as partículas minerais sejam suspensas e não se depositem no fundo da tubulação. Caso contrário as partículas depositaram no fundo do tubo podendo criar um leito fixo ou móvel de sólidos, causando desgaste e entupimentos. A Figura 3.1 mostra o depósito de sólidos no fundo da tubulação.

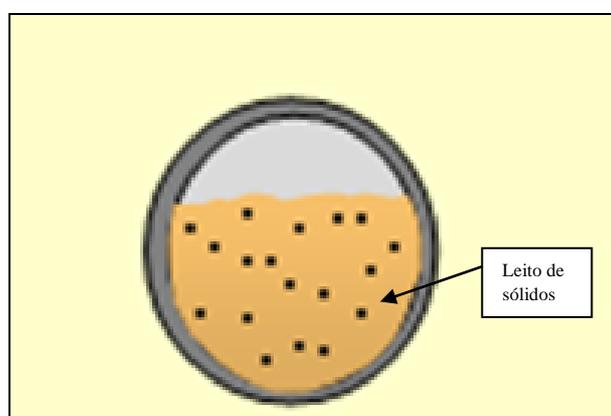


Figura 3.1: Depósito de sólidos na tubulação (AUSENCOPSI, 2007).

A maior parte das tubulações de longa distância são enterradas e possuem sistema de proteção catódica, para evitar corrosão do solo para a tubulação. Se forem aéreas estão sob suportes (dormentes). Quando enterrada a tubulação é revestida por uma tripla camada de PEAD (polietileno de alta densidade) e protegida por proteção catódica.

Em geral, os minerodutos exigem um alto investimento com valores entre US\$ 25.000.000 até US\$ 1.000.000.000, dependendo do tipo de bombas utilizadas e o comprimento do mineroduto. Porém com baixos custos operacionais. Grandes quantidades de materiais podem ser transportadas por centenas de quilômetros, com custos operacionais de cerca de US\$ 1/tonelada, com uma taxa de retorno de capital de poucos US\$ / tonelada (CHAPMAN, et al. 2009).

No projeto de um mineroduto a velocidade de transporte deve ser maior que a velocidade crítica calculada, seja de deposição ou de transição.

O diâmetro selecionado da tubulação deve ser determinado analisando a velocidade crítica e a máxima de transporte, e a perda de carga aceitável.

No Brasil grande parte dos transportes é feita por bombeamento através de bombas volumétricas ou do tipo centrífugas dependendo da pressão de operação. O transporte por gravidade também é possível desde que se tenha um desnível considerável entre o ponto inicial e o final do mineroduto.

3.1 Características do fluido

O fluido é definido como um elemento que apresenta as seguintes características:

- Em estado de repouso, adota sempre a forma do recipiente que o contém;
- Ao ser solicitado por forças externas, se deforma, escorrendo, fluindo, e a única resistência ao movimento que apresenta é dada por uma propriedade intrínseca do fluido denominada viscosidade.

A diferença entre um fluido e um sólido é que o elemento sólido, ao ser solicitado por forças externas, apresenta uma resistência a ser deformado. Esta resistência se traduz em um acúmulo interno de forças no sólido até conseguir uma situação de equilíbrio, na qual as forças externas continuam atuando, mas o corpo do sólido não se deforma (AUSENCOPSI, 2007).

3.1.1 Massa

É a quantidade de matéria que forma parte ou compõe o fluido.

Unidade (SI): quilogramas - kg

3.1.2 Volume

É o espaço físico ocupado pela massa do fluido.

Unidade (SI): metro cúbico - m³

3.1.3 Densidade (ρ)

Corresponde à relação entre a massa (m) e o volume (v) ocupado por essa massa, ou seja:

$$\rho = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} = \frac{m}{v}$$

Unidade: kg/m^3 .

3.1.4 Peso Específico (SG)

Corresponde à densidade de um elemento (fluido ou sólido) dividida pela densidade da água a uma determinada temperatura de referência.

Sua fórmula é do tipo:

$$SG = \frac{\rho_{\text{ELEMENTO}}}{\rho_{\text{AGUA}}}, \text{ sendo um número adimensional.}$$

3.1.5 Pressão de Vapor

Fisicamente é a pressão à qual um líquido muda de fase e se transforma em vapor. Esta propriedade depende principalmente da temperatura.

Cada fluido tem sua própria pressão de vapor.

Unidade: kgf/cm^2 .

3.1.6 Módulo de Elasticidade e velocidade Acústica da onda

Módulo de Elasticidade

Esta é uma medida da compressibilidade do líquido. Normalmente considera-se que os líquidos são incompressíveis a pressões normais. Esta propriedade dos líquidos é utilizada para calcular a velocidade de uma onda de pressão ao propagar-se no interior do líquido. É importante em tubulações, pois é possível ter uma apreciação do tempo requerido pela onda de pressão. O fechamento de uma válvula pode provocar uma onda de pressão que fique presa entre dois pontos na tubulação. O módulo é uma razão entre

a mudança de pressão requerida para comprimir o líquido e a variação unitária de volume que se produz.

$$K = \frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}}$$

Unidade: kgf/m².

Velocidade Acústica da onda

Corresponde à velocidade de propagação de uma onda de som em um líquido. Esta propriedade é característica de cada fluido.

Sua fórmula é do tipo:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Onde:

- a - Celeridade (rapidez) da onda de pressão m;
- K - Módulo de elasticidade do fluido kgf/m²;
- ρ - Densidade do fluido kg/m³.

Esta expressão corresponde à celeridade de uma onda de pressão em um meio não confinado. Existem outras fórmulas que consideram a rigidez da tubulação, além do módulo de elasticidade do fluido, para calcular a celeridade dessa onda.

Para uma tubulação, a equação de propagação pode ser calculada como (MACINTYRE, 1987):

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K}{E}\right)\left(\frac{D}{e}\right)c_1}}$$

Onde:

- a - Celeridade (rapidez) da onda de pressão - m;

- K - Módulo elasticidade fluido - kgf/m²;
 E - Módulo elasticidade tubulação - kgf/m²;
 D - Diâmetro tubulação - m;
 e - Espessura tubulação - m;
 c₁ - Depende da ancoragem da tubulação, onde:

$$c_1 = \frac{5}{4} - \omega \quad \text{Tubulação sem grau de liberdade no início do trecho;}$$

$$c_1 = 1 - \omega^2 \quad \text{Tubulação sem grau de liberdade em todo o trecho;}$$

$$c_1 = 1 - \frac{\omega}{2} \quad \text{Tubulação com grau de liberdade no sentido axial ao tubo;}$$

- ω - Coeficiente de Poisson ($\cong 0,3$), número adimensional.

O módulo de elasticidade e a velocidade acústica da onda são dados extremamente importantes para análise do transiente em minerodutos, pois ajudam a entender a propagação de uma onda de pressão ao longo da tubulação.

3.1.7 Viscosidade Dinâmica

Representa fisicamente a resistência ao movimento que apresenta um fluido (quando está em movimento). Denomina-se viscosidade dinâmica e significa que tem associadas forças que atuam sobre o fluido.

Representa-se pelo símbolo μ .

Unidades: Pa.s - Pascal segundo.

3.1.8 Viscosidade Cinemática

Viscosidade cinemática é a relação entre a viscosidade dinâmica do fluido e sua densidade.

Representa-se pelo símbolo ν .

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Unidades: m² /s.

3.2 Concentração de sólidos

Existem dois (2) parâmetros que normalmente são utilizados para caracterizar a concentração da polpa: concentração em massa (Cm) e concentração em volume (Cv).

A mistura é composta por uma parte sólida e uma parte líquida. Cada parte mantém suas características (densidade, por exemplo) e a mistura resultante possuem características novas que dependem das propriedades iniciais.

Em peso:

- Peso da mistura = Peso do sólido + Peso do líquido;
- Volume da mistura = Volume de sólido + Volume de líquido.

A definição dos parâmetros é:

Concentração em massa (Cm)

$$C_m = \frac{\text{Massa Fração Sólida}}{\text{Massa Total Mistura}}$$

Concentração em Volume (Cv)

$$C_v = \frac{\text{Volume Fração Sólida}}{\text{Volume Total Mistura}}$$

a densidade da mistura é determinada por:

$$\rho_m = \frac{SG}{\frac{C_p}{100} + SG \cdot \left(1 - \frac{C_p}{100}\right)}$$

Onde:

ρ_m - Densidade da mistura;

- SG - Peso específico do sólido;
 Cm - Concentração de sólidos em massa - %.

3.3 Tonelagem transportada x vazão

A relação entre a vazão de polpa e a tonelagem equivalente transportada é dada pela equação abaixo.

$$Q = T/H \times \left[\frac{100}{C_m} - 1 + \frac{1}{SG} \right]$$

Onde :

- Q - Vazão - m³ / h (pode ser volume por unidade de tempo);
 T/H - Toneladas secas por hora (é a quantidade de mineral seco, sem água);
 Cm - Concentração de sólidos em massa - %;
 SG - Peso específico do sólido.

3.4 Reologia

Reologia é uma parte da física que estuda a deformação dos fluidos. Os dois parâmetros reológicos mais importantes são a viscosidade e a tensão de escoamento, que dependem das propriedades do fluido discutidas anteriormente (AUSENCOPSI, 2007).

A única maneira de se determinar tanto a viscosidade como a tensão de escoamento da polpa, é através de testes de laboratório, onde se constrói os reogramas, que sendo adequadamente interpretados fornecem os dados.

Para entender o conceito, será abordado o exemplo clássico de Newton, onde se supõe que se tem uma camada de fluido, localizada entre duas placas paralelas; a placa inferior está fixa, sem movimento, e a segunda placa está localizada sobre o fluido e está em movimento por ação de uma força paralela à placa.

A força externa que move a placa causa um movimento da mesma com velocidade constante (V). Caso a força (F) seja maior, a velocidade (V) também será maior, mas constante.

A camada de fluido intermediária entre as duas placas apresentará movimento, e se produzirá entre ambas a placa o que se denomina “taxa de cisalhamento”. A Figura 3.2 mostra esta situação.

A relação entre a força tangencial (paralela) e a área desta placa se denomina “tensão de cisalhamento” (τ), e sua definição matemática é:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

para cada força (F) constante, tem:

uma velocidade (V) constante.

um ângulo de deformação (γ) ou taxa de cisalhamento constante entre ambas as placas.

uma tensão de cisalhamento (τ) constante.

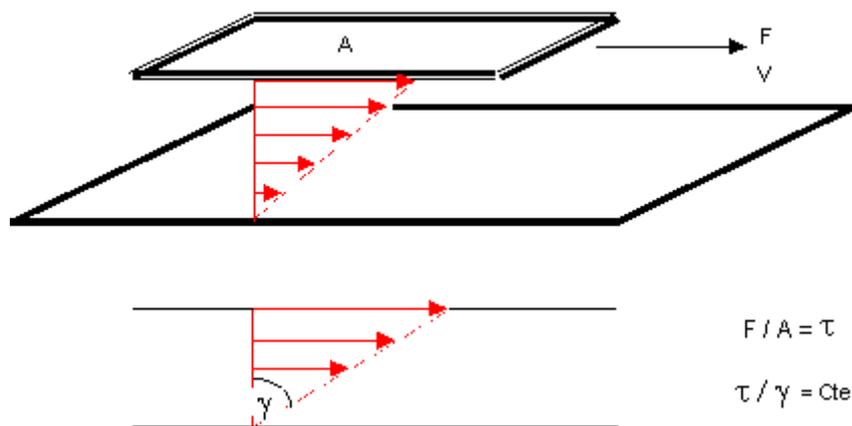


Figura 3.2: Gradiente de velocidade (AUSENCOPSI, 2007).

A medida que se aumenta a força, a taxa de cisalhamento também aumenta proporcionalmente.

Logo existe uma proporcionalidade direta entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento (γ).

Isso significa que:

$$\frac{\tau_1}{\gamma_1} = \frac{\tau_2}{\gamma_2} = \frac{\tau_3}{\gamma_3} = \text{CTE} = \mu$$

Escrito de outra forma:

$$\tau = \mu \gamma$$

Onde:

- τ - Tensão de cisalhamento - Pa ou dinas/cm²;
- μ - Viscosidade dinâmica do fluido - Pa.s;
- γ - Taxa de cisalhamento do fluido - 1 / s.

Sendo que a constante de proporcionalidade é o que Newton denominou viscosidade.

Este modelo se conhece como modelo linear ou modelo de Newton, e se caracteriza por ter uma viscosidade constante. Representa a maior parte dos fluidos puros (uma fase), como a água.

Existem outros modelos que refletem o comportamento entre a tensão de cisalhamento de um fluido e sua velocidade de deformação. São modelos de tipo não linear (não Newtonianos). Isso significa que o valor da viscosidade não apresenta um valor constante à medida que o fluido é deformado.

Para o fluido de Newton, a qualquer força aplicada há um movimento do fluido. Alguns fluidos apresentam uma resistência inicial ao movimento. É o caso da pasta de dente, onde é necessário “apertar” (exercer força) para que a pasta flua.

Esta resistência inicial ao movimento é o que denomina-se Tensão de Cisalhamento (ou *Yield Stress*).

A Figura 3.3 mostra um diagrama reológico com três modelos.

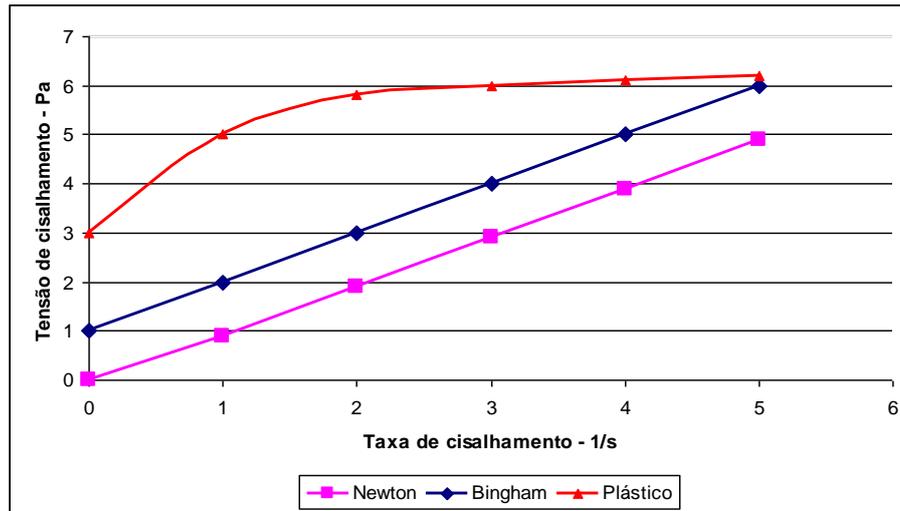


Figura 3.3: Modelos reológicos (AUSENCOPSI, 2007)

O modelo 1 corresponde ao modelo de Newton, onde a relação entre a tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento é linear, (viscosidade dinâmica constante), ou seja:

$$\tau = \mu \gamma$$

Onde:

- τ - Tensão de cisalhamento - Pa ou dinas/cm²;
- μ - Viscosidade dinâmica (consistência), modelo de Newton - Pa.s;
- γ - Taxa de cisalhamento - 1/ s.

O modelo 2 corresponde ao denominado modelo de Bingham, cuja equação é do tipo:

$$\tau = \tau_0 + \eta \gamma$$

- τ - Tensão de cisalhamento - Pa ou dinas/cm²;
- τ_0 - Tensão de cisalhamento crítica - Pa ou dinas/cm²;
- η - Viscosidade dinâmica (consistência) - Pa.s;
- γ - Taxa de cisalhamento - 1/ s.

O modelo 3 corresponde ao denominado modelo Pseudo-plástico, cuja equação é do tipo:

$$\tau = \tau_0 + \eta \gamma^N$$

- τ - Tensão de cisalhamento - Pa ou dinas/cm²;
- τ_0 - Tensão de cisalhamento crítica - Pa ou dinas/cm²;

- η - Viscosidade dinâmica (consistência) - Pa.s;
 γ - Taxa de cisalhamento - 1/ s.
N - Índice do comportamento do fluido, onde:

$N = 1$ para fluido Newtoniano e plástico de Bingham;

$N < 1$ para fluido pseudoplástico.

Existem outros modelos para representar o comportamento de um fluido, em termos de viscosidade e tensão de cisalhamento. Porém, os mais comuns na prática industrial são o modelo de Bingham e o de Newton.

O modelo de Newton indica que para taxa de cisalhamento zero (nula), a tensão de cisalhamento é nula. Isso significa que, para começar a se mover, este fluido não requer energia adicional frente a qualquer força externa, começa a fluir de imediato. A tensão de cisalhamento ou *yield stress* é zero.

Fisicamente não se pode ter esforço de cisalhamento (τ) com valor negativo.

O modelo de Bingham indica que é requerida uma energia adicional (τ_0) para que se inicie o movimento. Entretanto não seja alcançado esse valor mínimo de energia, o fluido se comportará como um sólido. Atingindo o valor mínimo (τ_0) se iniciará o movimento, e a viscosidade (η), também denominada de “consistência”, apresentará as mesmas características físicas da viscosidade dinâmica (μ) do modelo de Newton.

A análise reológica em uma suspensão deve considerar:

- Granulometria das partículas sólidas que constituem a suspensão;
- Densidade e Peso Específico das partículas sólidas;
- Densidade do fluido de transporte (normalmente água);
- Viscosidade do fluido (água);
- Viscosidade da suspensão (mistura).

O reograma permite caracterizar um fluido em termos do seu comportamento perante solicitações por esforço de cisalhamento.

3.5 Granulometria

As partículas naturais que intervêm nos processos industriais têm habitualmente formas irregulares cuja caracterização é difícil, inclusive em termos estatísticos. Nos termos mais simples, a especificação de uma partícula requer pelo menos uma medida do seu tamanho e uma medida da sua forma.

A forma mais usual de medir o tamanho é passar uma amostra do material granulado através de uma série de peneiras ou malhas, cuja abertura é decrescente. Dessa forma o material será separado em frações de tamanhos compreendidos entre duas peneiras consecutivas e, por pesagem, pode-se obter um tamanho médio.

Geralmente supõe-se que o tamanho representativo de cada fração é a média geométrica das aberturas de peneiras extremas. O tamanho assim determinado será denominado diâmetro nominal da partícula.

A amostra passa através de diferentes peneiras (malhas) e se determina o peso de material retido em cada uma das peneiras.

Cada peneira possui uma malha, com uma abertura padronizada. O material da amostra cujo diâmetro de partícula seja maior que a abertura da malha, ficará retido na mesma.

O material da amostra de sólidos, cujo diâmetro seja menor que a abertura da malha, passará através da mesma para a peneira seguinte, conforme mostrado na Figura 3.4.

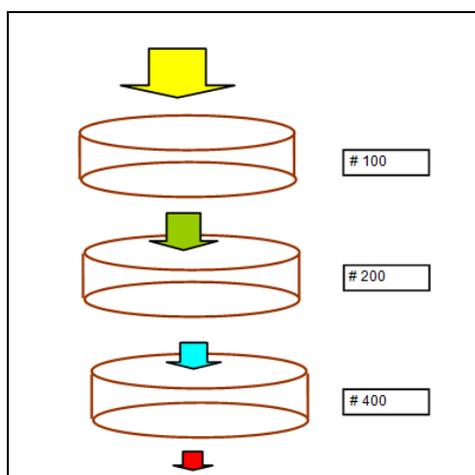


Figura 3.4: Esquema de peneiramento de malhas diferentes (AUSENCOPSI, 2007).

A Tabela 3.1 mostra algumas das peneiras normalmente utilizadas.

Tabela 3.1: Tipos de peneira

Designação Sieve Padrão	Abertura [mm]	Denominação Alternativa	Denominação Tyler Equivalente
2,00 mm	2,00	No. 10	# 9
1,00 mm	1,00	No. 18	# 16
300 μm	0,300	No. 50	# 48
212 μm	0,210	No. 70	# 65
150 μm	0,150	No. 100	# 100
75 μm	0,075	No. 200	# 200
45 μm	0,045	No. 325	# 325

O tamanho das partículas presentes em um mistura bifásica, influencia principalmente no comportamento que apresenta o fluxo.

Quando as partículas são muito finas, a mistura resultante costuma ter comportamento homogêneo, ou seja, ao realizar um cisalhamento transversal em uma seção de tubulação, não se detecta um gradiente de concentração no seu interior. O mineral está suspenso “flutuando” e a concentração é aproximadamente igual em qualquer ponto na seção transversal. Fala-se de fluxo homogêneo.

Por outro lado, quando as partículas transportadas são de maior tamanho, devido ao seu peso, tendem a ser transportadas perto da zona mais baixa da tubulação (“fundo”). Nesse caso, a seção transversal de fluxo apresenta um gradiente de concentrações, denomina-se de fluxo heterogêneo.

Caso a concentração em massa de sólidos seja alta e a distribuição de tamanhos das partículas tenha predomínio de partículas finas (alta % > 45 μm), as mesmas atuarão como suporte das partículas de maior tamanho.

Pelo contrario, caso a concentração de sólidos seja baixa, as partículas de maior tamanho tenderão a ser transportadas perto do fundo do tubo.

Utilizam-se também diâmetros característicos para representar a granulometria, sendo os mais comuns D_{50} , D_{85} e D_{90} . Isso significa que D_{90} é o diâmetro associado aos 90 % do material que passa ou é retido na malha correspondente.

O mineral proveniente de moagem pode apresentar uma distribuição granulométrica larga (curva granulométrica inclinada, que tende a ser quase horizontal) ou distribuição granulométrica estreita (curva granulométrica quase vertical), dependendo da relação entre seus diâmetros característicos.

A superfície específica corresponde à soma da área de todas as partículas presentes em um determinado volume. À medida que o tamanho da partícula é menor, a superfície específica cresce e começam a prevalecer outros fenômenos além do peso das mesmas.

A área superficial específica controla a reologia de uma amostra, e a porcentagem (%) que passa pelas malhas mais finas é somente uma medida referencial da superfície específica, pois é possível ter porcentagens similares debaixo das malhas finas e apresentar reologias muito diferentes.

Todo o material com tamanho muito grande se acumula nas depressões do perfil do terreno e, eventualmente, é expulso da tubulação através ondas de densidade (dunas), as quais constituem um risco para a operação da instalação de um mineroduto.

3.6 Corrosão e abrasão

A corrosão é definida pela deterioração sofrida por um material em consequência da ação química ou eletroquímica do meio, aliada ou não a esforços mecânicos.

A corrosão mais comum é a corrosão eletroquímica, caracterizada pelo transporte de cargas elétricas por meio de um eletrólito em um meio favorável, geralmente aquoso.

A corrosão química é devida ao ataque de produtos químicos sobre os materiais metálicos, provocando a sua oxidação.

A erosão é o resultado das ações dinâmicas do movimento de partículas, podendo ser devido ao impacto, ou pela forma das partículas que podem cortar o material. Quanto maior a velocidade de transporte e o tamanho da partícula maior será o desgaste por abrasão de uma tubulação, conforme Figura 3.5 e Figura 3.6 (AUSENCOPSI, 2007).

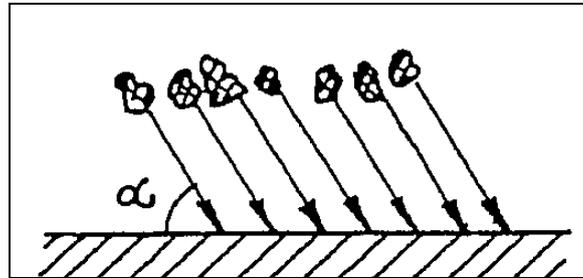


Figura 3.5: Abrasão por impacto (ASPEN TECHNOLOGY, 2003).

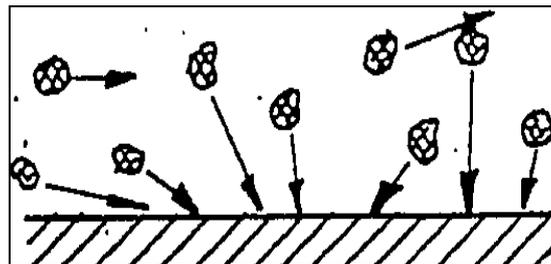


Figura 3.6: Abrasão por formas das partículas (ASPEN TECHNOLOGY, 2003).

3.7 Tipos de fluxos

O fluxo de fluidos através de tubulações podem ser classificado de acordo com a variação de suas propriedades no tempo e no espaço.

3.7.1 Permanente

As propriedades do fluido em uma determinada seção não apresentam mudança no tempo.

3.7.2 Não permanente

As propriedades do fluxo em uma determinada seção mudam à medida que transcorre o tempo.

3.7.3 Uniforme

As propriedades do fluxo não apresentam mudança no espaço.

3.7.4 Não uniforme

As propriedades do fluxo mudam de uma seção para outra.

3.7.5 Fluxo laminar, de transição e turbulento

O fluxo laminar se realiza por camadas paralelas.

O fluxo de transição é a passagem do fluxo laminar para o turbulento

O fluxo turbulento apresenta componentes de velocidade em todos os sentidos.

Reynolds realizou experimentos em tubulações e encontrou o seguinte:

- através de uma tubulação horizontal transparente, fez circular um líquido e através de um dispositivo adicional injetou uma solução de fluido colorante. Encontrou que para certas condições de velocidade na tubulação, o fluido corante se deslocava em linhas paralelas. Isso indicava que o fluido na tubulação principal também se deslocava através de camadas paralelas. Este regime de fluxo é denominado de fluxo laminar.
- para condições de maior velocidade, as linhas de fluido corante se desordenavam, indicando que o fluxo na tubulação principal também começava a escorrer de forma desordenada. Este regime de fluxo é denominado de fluxo de transição.
- com velocidades ainda maiores, o corante apresenta uma desordem total na tubulação. Isso significa que o fluxo na tubulação principal é totalmente desordenado. Este regime de fluxo é denominado de fluxo turbulento.

A Figura 3.7 mostra os tipos de transporte.

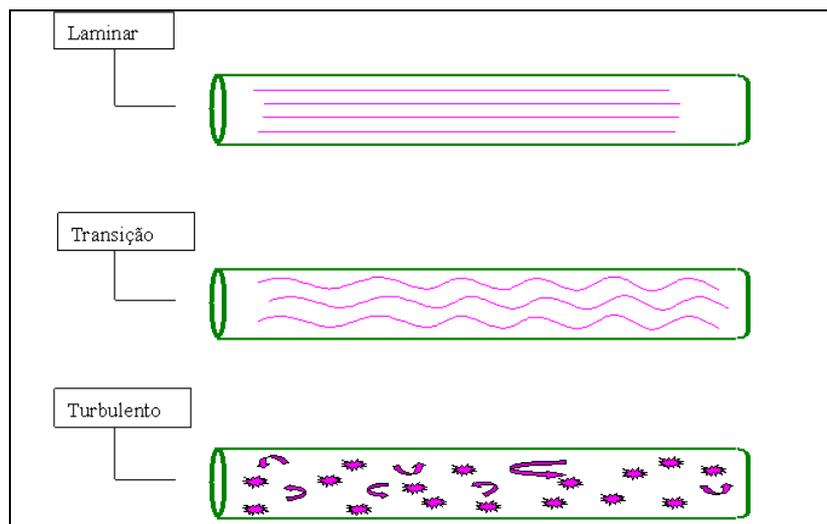


Figura 3.7: Regimes de transporte (AUSENCOPSI, 2007)

3.7.6 Pressão atmosférica

É o efeito que atmosfera exerce sobre a Terra. Supondo que a água possui um peso de $1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, ou seja, um espaço físico de 1m de altura por 1 m de largura por 1 m de comprimento, tem um peso de 1000 quilos.

Nesse mesmo espaço de 1m x 1m x 1m, cheio de ar, o peso é de 1 [kg] (aproximado). Isso significa que o ar pesa na ordem de 1000 vezes menos que a água. Entende-se por pressão atmosférica, o efeito que exerce o peso da coluna de ar sobre a superfície da terra. A pressão atmosférica normal se considera a 45 graus de latitude e ao nível do mar.

Em outras latitudes, e a outras altitudes (alturas), a pressão atmosférica será diferente. Para efeitos práticos, o que interessa é a variação da pressão com a altura.

A

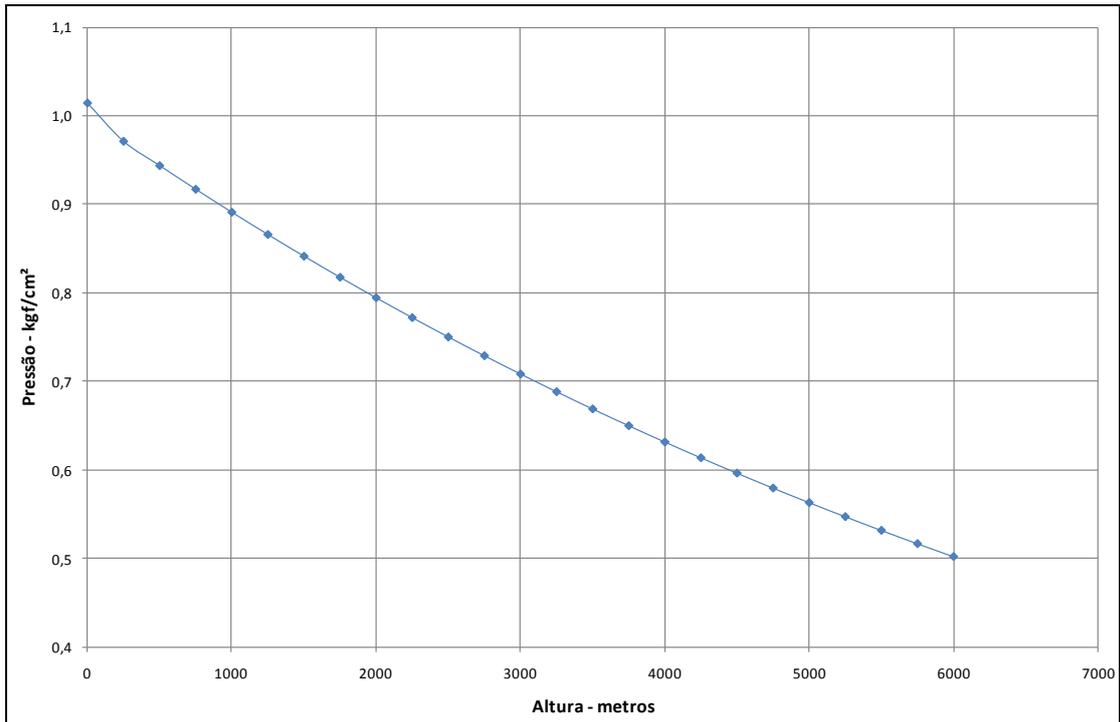


Figura 3.8 mostra a variação da pressão atmosférica normal com a altitude. Nela é possível ver que a pressão diminui à medida que a altura aumenta.

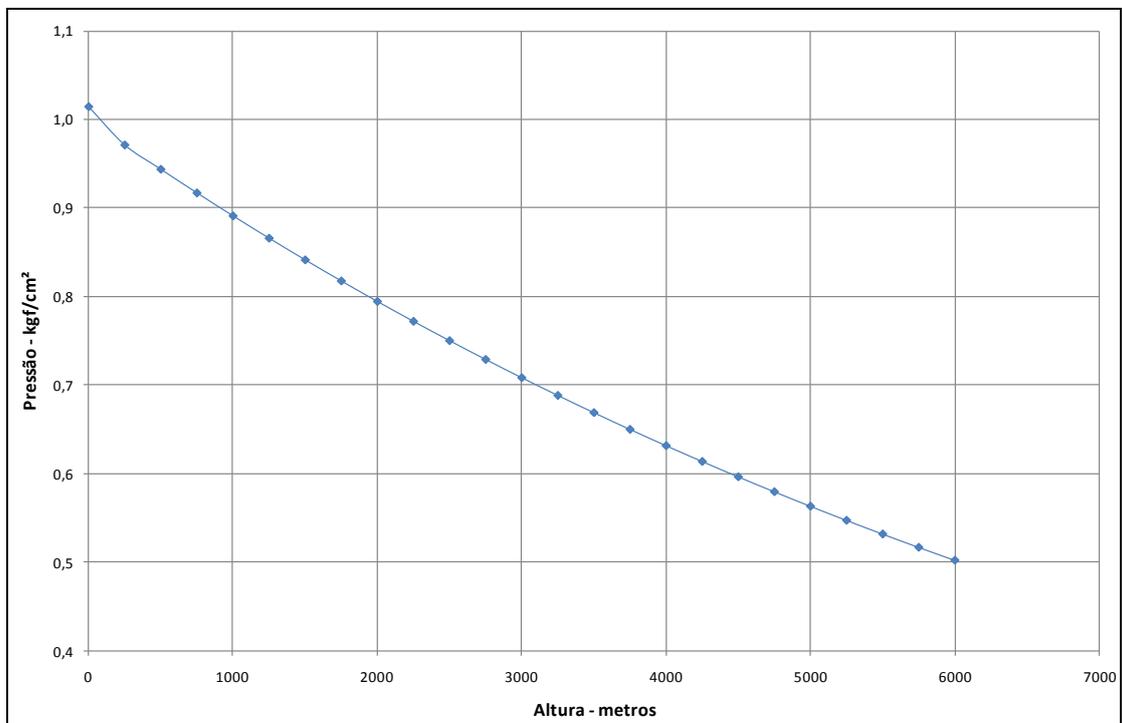


Figura 3.8: Variação da pressão atmosférica normal.

Ao nível de mar a pressão atmosférica tem um valor denominado de Pressão Atmosférica Normal. Em alturas maiores, a pressão atmosférica diminui o valor.

A pressão atmosférica também é conhecida como pressão barométrica.

3.7.7 Pressão manométrica

Corresponde à pressão de um fluido, sendo o nível de referência a Pressão Atmosférica.

3.7.8 Equação de Bernoulli

Em fluxo de fluidos em tubulações, a equação que permite modelar o comportamento do sistema é denominada de equação de Bernoulli.

Esta equação, na sua modalidade mais simples, é composta por três tipos de energia:

- energia potencial;
- energia cinética;
- energia associada à altura de pressão.

Em regime permanente e uniforme aplica-se esta equação em uma linha de corrente, ou seja, dado um sistema de transporte de fluidos por tubulação, se escolhe uma linha de corrente, que geralmente coincide com o eixo longitudinal da tubulação, e em dois pontos dessa linha aplica-se a equação de Bernoulli.

Para o escoamento de um fluido ideal, ou seja, sem atrito (viscosidade zero) sua energia total permanece constante ao longo de uma linha corrente.

A forma da equação de Bernoulli é:

$$B = Z + \frac{p}{\rho l} + \frac{v^2}{2g}$$

B - altura total de energia - m.

Z - cota geométrica - m.

p - altura de pressão - m.

ρl - densidade do líquido - g/cm³.

- V - velocidade - m/s.
 g - aceleração da gravidade - m/s².

As hipóteses mais importantes envolvidas nesta equação são:

- regime uniforme;
- regime permanente;
- fluido incompressível e homogêneo;
- não se consideram as perdas de energia;
- não se considera a ação de bombas e/ou turbinas no balanço de energia.

Tendo uma tubulação que transporta fluido, seleciona-se um ponto inicial, um ponto final e uma linha de corrente.

A aplicação da equação de Bernoulli representa um balanço de energia entre dois pontos em uma linha de corrente, conforme Figura 3.9.

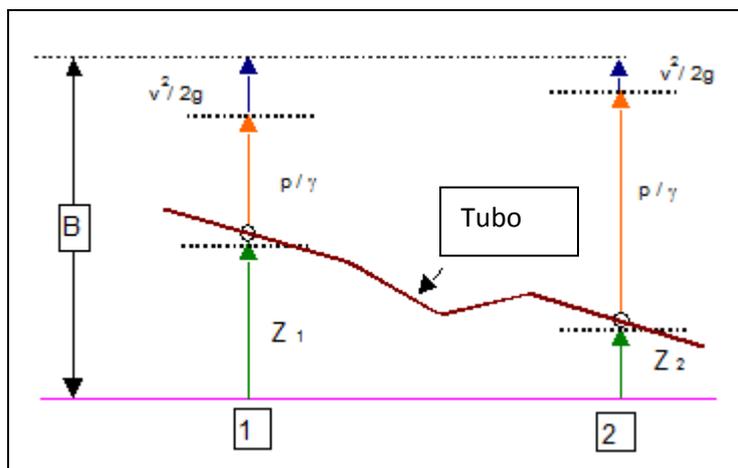


Figura 3.9: Definição equação de Bernoulli (AUSENCOPSI, 2007).

Aplicando a equação de Bernoulli através da Figura 3.9 é possível determinar a altura de energia em qualquer ponto da tubulação.

3.7.9 Gradiente hidráulico

A linha de gradiente hidráulico ou linha piezométrica (HGL), representa a pressão requerida em metros de coluna de líquido (mcl) para vencer as perdas de carga ao longo do mineroduto (LAROCK et al., 2000).

Sua leitura em um diagrama é de simples entendimento, sendo necessário apenas saber qual a densidade do fluido transportado a Figura 3.10 mostra um gradiente hidráulico.

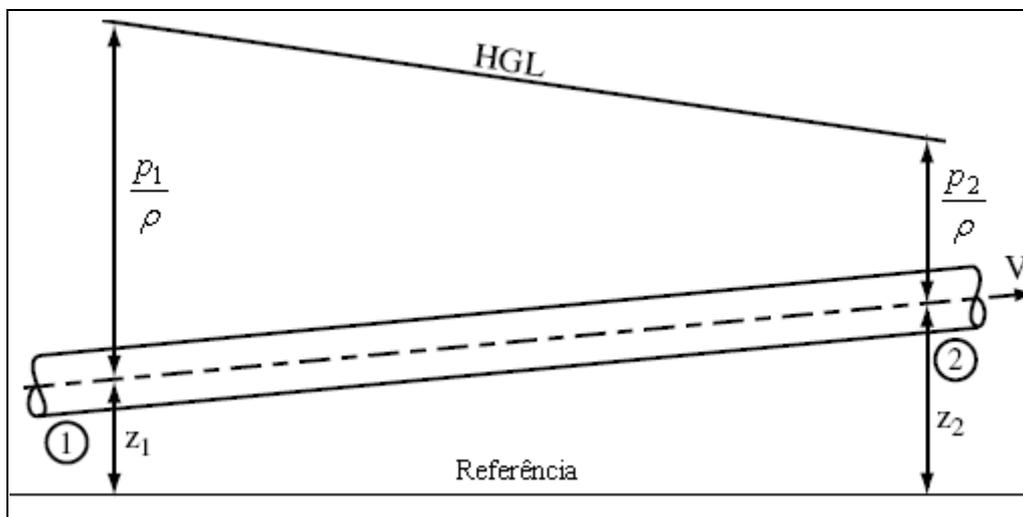


Figura 3.10: Linha de gradiente hidráulico (LAROCK et al., 2000).

Pela figura 3.10 é possível determinar a pressão em mcl no ponto 1 ou 2 através da equação descrita abaixo:

$$\text{HGL} = \frac{p_1}{\rho l} + z_1$$

$$p_1 = (\text{HGL} - z_1) \rho l$$

Onde;

HGL - linha de gradiente hidráulico - mcl.

z - cota geométrica - mcl.

p - altura de pressão - mcl.

ρl - densidade do líquido - g/cm³.

3.7.10 Perda de carga

Na equação de conservação de Bernoulli não se considera outro tipo de forças, como o atrito com as paredes, com as quais não se cumpriria esta equação de conservação. Para levar esta equação à situação real, as perdas de energia são avaliadas de diversas formas.

Estas perdas de energia, também denominadas de "perdas de carga", podem se apresentar distribuídas ao longo todo um conduto (perdas lineares) ou concentradas em um ponto (perdas singulares).

Para o tubo da Figura 3.11:

$$B_1 = B_2 + \Delta h_{12}$$

Onde;

B_1 - altura de energia ponto 1 - m.

B_2 - altura de energia ponto 2 - m.

Δh_{12} - perda de carga desde a seção (1) até a seção (2) - m.

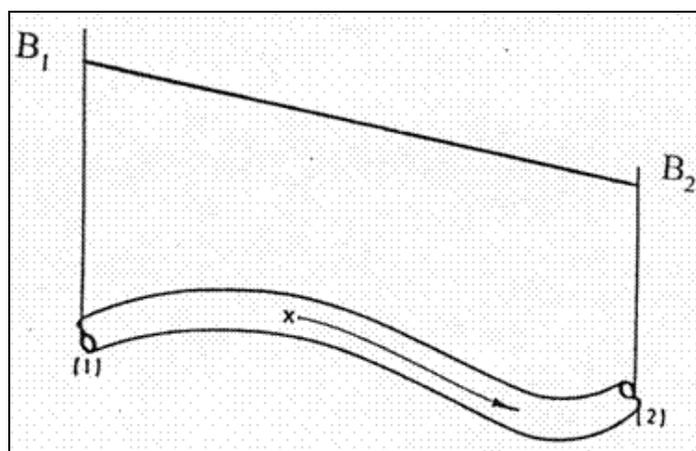


Figura 3.11: Perda de carga em um tubo (AUSENCOPSI, 2007).

3.7.11 Perdas de Carga Lineares

No caso do fluxo em tubulações, o cálculo pode ser feito através da expressão de Darcy.

$$J = \frac{\lambda \cdot V^2}{D \cdot 2 \cdot g}$$

Onde,

J - perda de carga - m.

λ - coeficiente de atrito e é função do número de Reynolds e da rugosidade da tubulação (ϵ).

V - velocidade - m/s.

D - diâmetro do tubo - m.

g - aceleração da gravidade - m/s^2 .

Para escoamento laminar, onde o número de Reynolds ≤ 2000 utiliza-se a formula:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Onde;

λ - coeficiente de atrito.

Re - número de Reynolds.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\eta}$$

Onde,

Re - Número de Reynolds.

V - velocidade - m/s .

D - diâmetro do tubo - m .

η - viscosidade dinâmica - $Ns/m^2 = Pa.s$.

A rugosidade ε depende do material do conduto e representa a rugosidade média do mesmo, geralmente medida em mm .

Os valores de rugosidade para distintos materiais podem ser verificados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Rugosidade dos materiais

Material (Descrição)	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 limado 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
Amianto-cimento	0,05
Borracha	0,002
Bronze polido e cobre	0,01-0,03
Ferro fundido	0,001-0,002
Ferro fundido com incrustações	0,25-0,26
Concreto bem acabado	0,025
Concreto	0,15-0,35
Concreto com acabamento ruim	0,35-3,00
Poliuretano	0,0015-0,0025
Vidro	0,001-0,002

Os valores de λ podem ser calculados através de fórmulas ou do Ábaco de Moody, Figura 3.12.

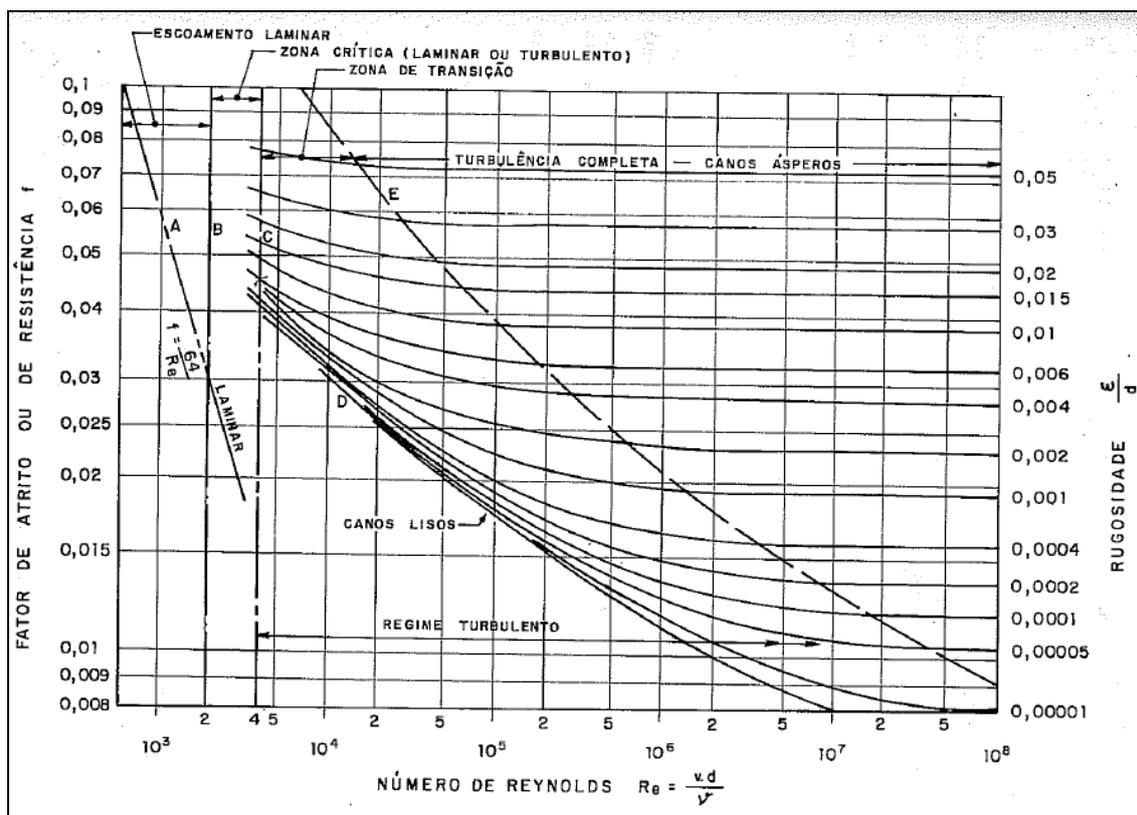


Figura 3.12: Ábaco de Moody (MACINTYRE, 1987).

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

3.7.12 Perdas de carga singulares

Qualquer variação brusca da forma ou da direção do conduto origina-se uma perda de carga adicional que se denomina perda singular.

A mesma ocorre pelo fato de que qualquer modificação em um conduto altera a uniformidade do fluxo.

Casos frequentes de perdas singulares são os de válvulas, curvas, cotovelos, mudanças de seção brusca ou paulatina, e inclusive uniões entre trechos de tubulações ou canais.

Para avaliar estas perdas, nas mesmas unidades que Bernoulli, utiliza-se, geralmente, um coeficiente adimensional K , próprio de cada singularidade, de tal forma que a perda é:

$$h_s = K \frac{\bar{V}^2}{2 \cdot g}$$

Onde,

- h_s - perda singular - m.
- K - coeficiente de perda próprio de cada singularidade.
- \bar{V} - velocidade média - m/s.
- g - aceleração da gravidade - m/s².

Cabe ressaltar que o valor de K pode oscilar entre 0,01 e 5,00, dependendo do tipo de singularidade.

Deve-se prestar atenção à definição do valor de \bar{V} , no sentido de sua correspondência com a velocidade antes ou depois da singularidade.

Os valores de K das singularidades que se apresentam com maior frequência, podem ser verificados na Tabela 3.3. Estes valores de singularidade são simplesmente valores médios, e variam de um fornecedor para outro. Devendo ser utilizada a informação proporcionada pelo fabricante.

Tabela 3.3: Valores de singularidades K

Singularidades	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

3.7.13 Fenômenos de transientes

O fenômeno de transientes é uma instabilidade do fluxo em uma tubulação caracterizado pela mudança brusca da vazão e pressão ocorrida em uma parada do bombeamento por exemplo. Portanto, para detectar um fenômeno transiente, é necessário ter um controle permanente da vazão e da pressão ao longo de toda a linha (LAROCK et al., 2000).

3.8 Velocidade crítica

No transporte de polpas, há duas (2) velocidades que devem ser consideradas no fluxo de misturas em tubulações: a Velocidade de Deposição (V_d) e a Velocidade de Transição (V_t).

Dependendo da granulometria das partículas, da reologia da mistura e do tipo de regime de fluxo (Laminar / Turbulento), uma destas duas velocidades passa a ser considerada velocidade crítica.

3.8.1 Velocidade de deposição

Corresponde à velocidade em que as partículas apresentam tendência a se depositar no fundo da tubulação.

A velocidade de deposição (V_d) é o parâmetro que determina a mínima velocidade de fluxo para que não exista risco de depósito e obstrução na tubulação. Consiste na velocidade em que as partículas sólidas apresentam tendência a formar um leito no fundo da tubulação (formação de dunas móveis e/ou leito fixo de fundo).

Em termos práticos, a velocidade limite corresponde ao menor valor da velocidade do fluxo de polpa sobre o qual não há risco de sedimentação da polpa. Pelo contrário, caso o valor da velocidade do fluxo de polpa seja inferior a esse valor, existe um sério risco de sedimentação total da tubulação.

A velocidade limite depende fundamentalmente das seguintes variáveis:

- granulometria das partículas sólidas;
- peso específico do sólido;
- diâmetro da tubulação;
- concentração de sólidos na mistura;
- inclinação da tubulação;
- pH da polpa.

O modelo teórico clássico para prever V_d elaborado por CHAVES, 2002 (a):

$$V_d = F_L \left[2 g D \left(\frac{SG - \rho_L}{\rho_L} \right) \right]^{1/2}$$

Onde:

- V_d - velocidade limite de deposição [m/s];
 D - diâmetro do tubo - m;

- g - aceleração da gravidade - m/s^2 ;
 F_L - fator em função da diluição e granulometria da polpa;
 SG - peso específico do sólido;
 ρ_L - densidade do líquido de transporte.

Os valores de F_L podem ser determinados através dos ábacos das Figura 3.13 e Figura 3.14.

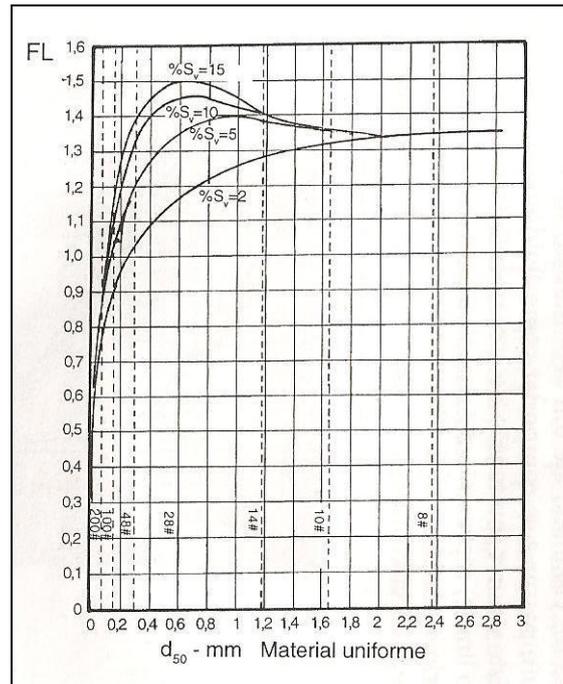


Figura 3.13: F_L para material uniforme (CHAVES, 2002 a).

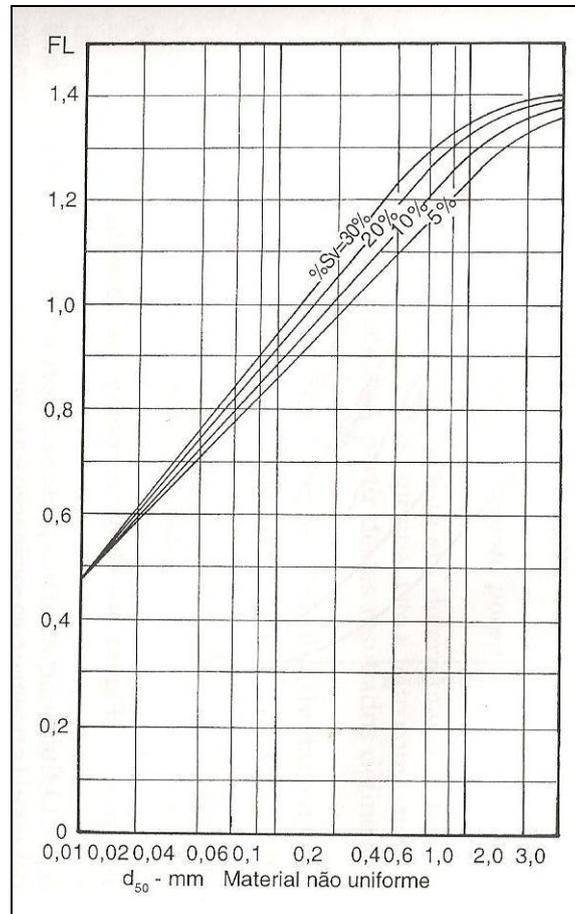


Figura 3.14: FL para não material uniforme (CHAVES, 2002 a).

A uniformidade do material será determinada através do coeficiente proposto por Caputo, 1973:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

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 passante na malha em questão;

D_{10} - 10% das partículas passante na malha em questão.

A forma prática de determinar esta velocidade de deposição é realizar testes em uma instalação piloto ou circuito de teste (loop de teste) e construir a curva de perda de carga versus velocidade associada à faixa de concentração estudada.

Determina-se para diferentes vazões a perda de pressão associada, e esse valor é lançado em um gráfico logarítmico, denominado na prática como curva J, a Figura 3.15 apresenta esta curva.

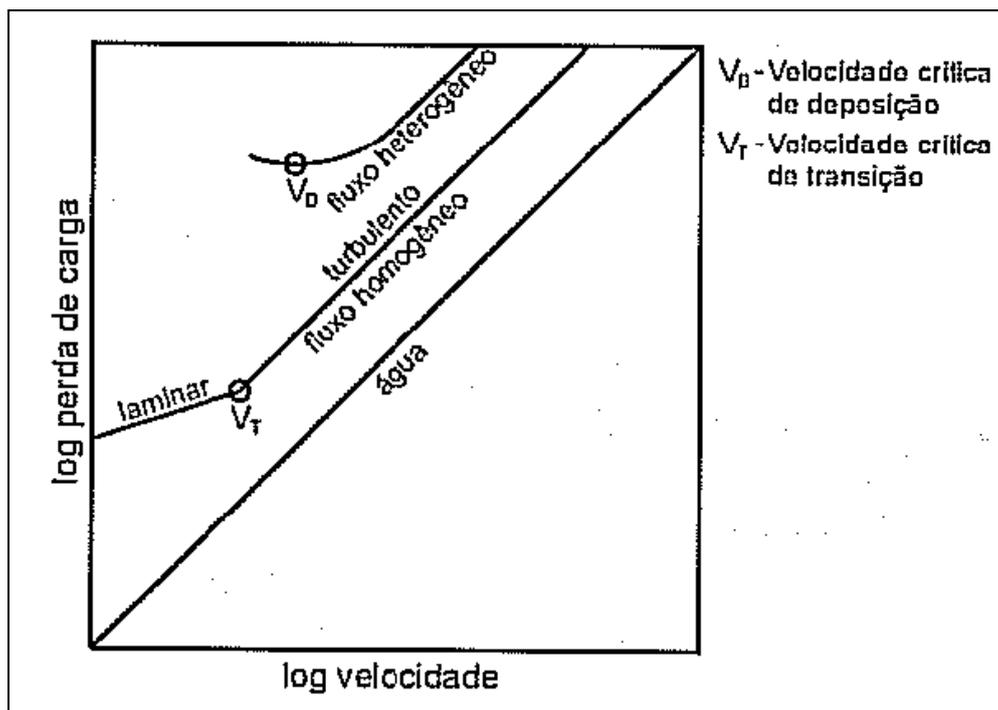


Figura 3.15: Curva J (CHAVES, 2002 a).

Sendo que a linha reta corresponde ao fluido (água) e a linha curva corresponde à perda de carga da mistura.

3.8.2 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).

Esta velocidade depende das características reológicas da mistura (densidade, viscosidade, tensão de cisalhamento) e diâmetro da tubulação entre outros fatores,

O número de Reynolds que define a transição entre regime laminar e turbulento não tem um valor constante.

Para as misturas bifásicas (concentrados, água de lavagem, polpas), se define um número de Reynolds Crítico, o qual depende da reologia da mistura e do diâmetro da tubulação.

A transição entre fluxo laminar e fluxo turbulento se estabelece através de um parâmetro denominado número de Hedstrom (WASP et al., 1977) e dos estudos realizados para por Hanks, que entrega uma curva entre o número de Hedstrom e o número de Reynolds Crítico. As equações de Hanks (HANKS & DADIA, 1971) são:

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

Onde:

- He - número de Hedstrom;
- D - diâmetro do tubo - m;
- τ - tensão de cisalhamento crítica - Pa;
- ρ - densidade da mistura - ton/m³;
- η - viscosidade dinâmica - Pa.s.

$$R_c = \frac{1 - \frac{4}{3}x + \frac{1}{3}x^4}{x}$$

$$He = 16800 \frac{x}{(1-x)^3}$$

Sendo:

- Rc - número de Reynolds Crítico;
- He - número de Hedstrom;
- x - relação entre tensão de cisalhamento crítica e tensão de cisalhamento na parede da tubulação.

Através dos resultados da reologia da polpa se calcula o número de Hedstrom (He).

O gráfico da Figura 3.16 mostra a relação entre o número de Reynolds e o número de Hedstrom.

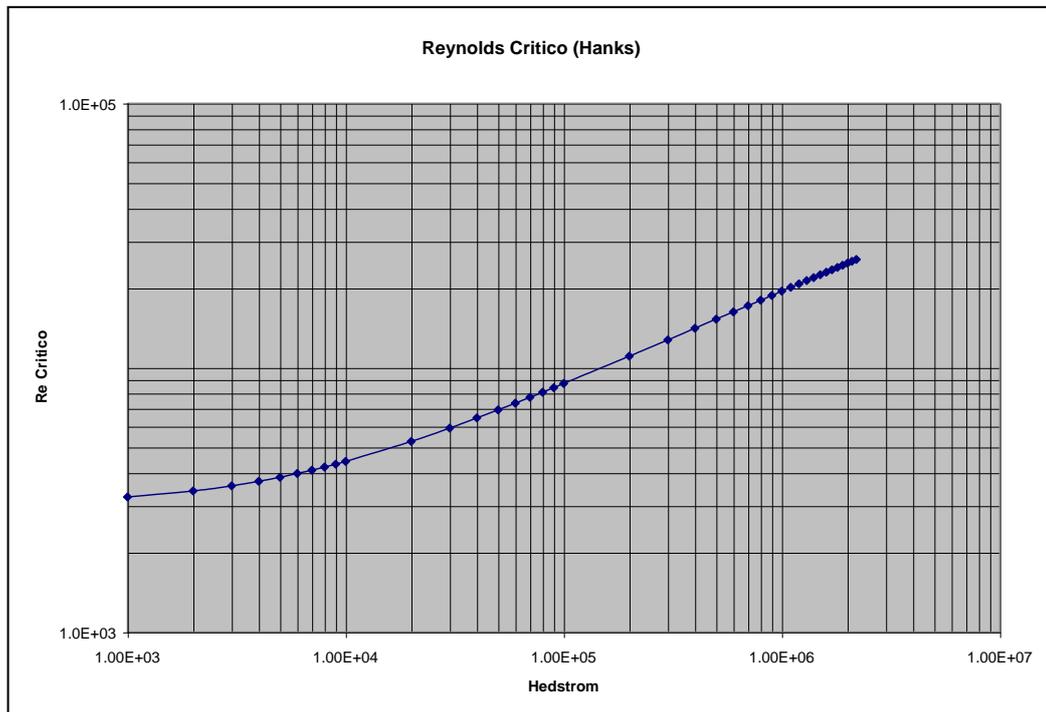


Figura 3.16: Número de Reynolds x Número de Hedstrom.

Para determinar o número de Reynolds Crítico lança-se no gráfico da Figura 3.16 o número de Hedstrom, no eixo horizontal, interceptando a curva do gráfico e no lado esquerdo se lê o valor do número de Reynolds Crítico.

O transporte em regime turbulento é caracterizado para valores acima de 2500 para o número de Reynolds Crítico.

Foi demonstrado por (WASP et al., 1977) que utilizando o conceito de viscosidade efetiva μ_E , para a definição do número de Reynolds Crítico, podiam-se estimar os valores da velocidade de transição.

$$\mu_E = \eta \left[1 + \frac{\tau_0 D}{6 \eta Vt} \right] \approx \eta \left[\frac{\tau_0 D}{6 VT} \right] \approx \frac{\tau_0 D}{6 Vt}$$

Onde:

- μ_E - viscosidade efetiva;
- η - viscosidade dinâmica;
- D - diâmetro do tubo - m;

- τ_0 - tensão de cisalhamento - Pa;
 V_t - velocidade de transição - m/s.

$$Rc = \frac{V_t \times D \rho}{\mu_E} \approx \frac{6 V_t^2 \rho}{\tau_0} \Rightarrow V_T = \sqrt{\frac{Rc \tau_0}{6 \rho}}$$

Onde:

- Rc - número de Reynolds Crítico;
 He - número de Hedstrom;
 μ_E - viscosidade efetiva;
 η - viscosidade dinâmica;
 ρ - densidade da mistura - ton/m³;
 τ_0 - tensão de cisalhamento - Pa;
 V_t - velocidade de transição - m/s.

Alguns autores utilizam um valor fixo do número de Reynolds para a transição, podendo ficar da seguinte forma a fórmula da velocidade de transição.

$$V_t = K_1 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

Onde:

- V_t - velocidade de transição - m/s.
 K_1 - constante para $Rc = 2100$ ($K_1=19$) e $Rc = 3000$ ($K_1=22$);
 τ_0 - tensão de cisalhamento - Pa;
 ρ - densidade da mistura - ton/m³;

3.9 Tipos de bombas

Bombas tipo deslocamento positivo

São bombas caracterizadas pela admissão de uma dada quantidade de fluido, que é retido no seu interior, comprimindo até a pressão de descarga e deslocado por completo através da tubulação de descarga. No caso da Figura 3.17 a potência mecânica é transmitida para um fluido intermediário e, em seguida, é transferida através de um diafragma ao fluido bombeado.

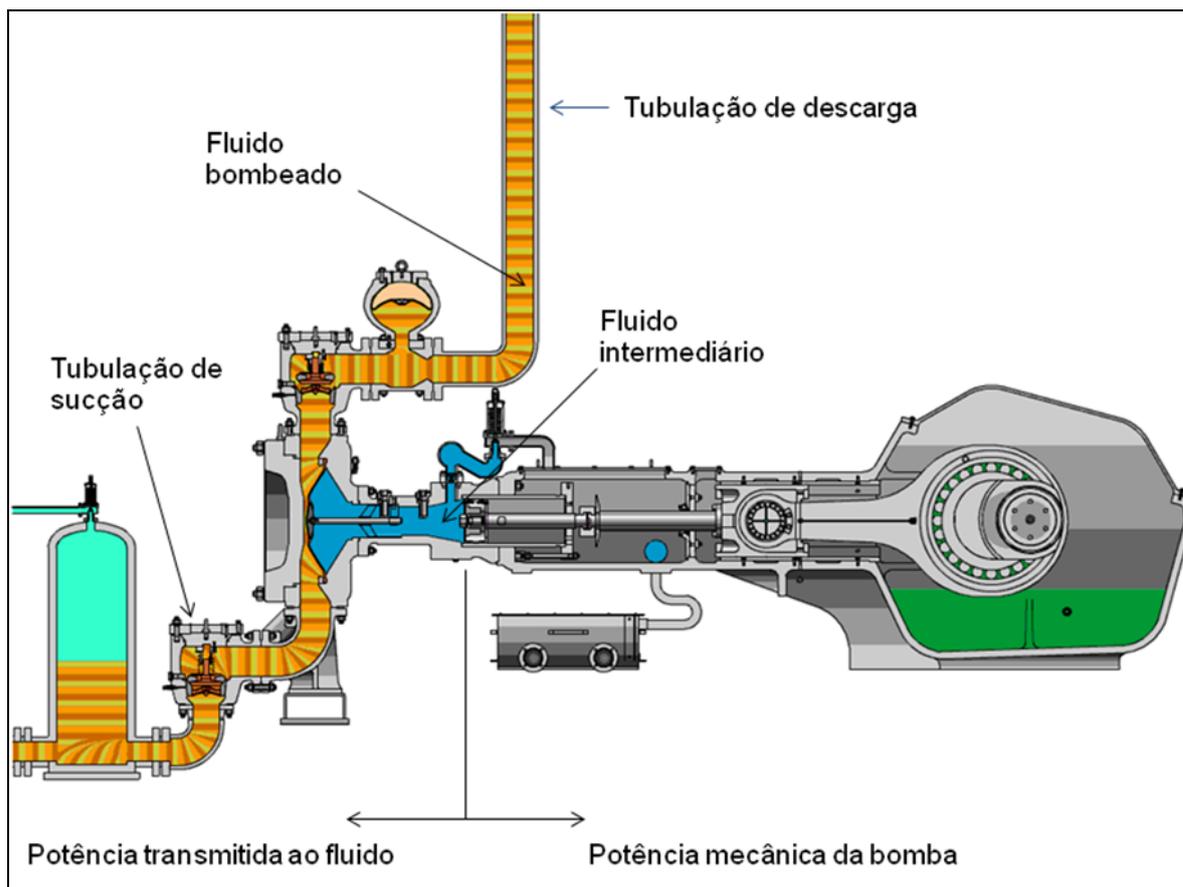


Figura 3.17: Corte de um bomba de deslocamento positivo (GEHO, 2011).

Estas bombas consideradas de alta pressão são necessárias para mover a polpa através de minerodutos de longa distância podendo fornecer pressões de 200 kgf/cm². Em alguns casos bombas centrífugas de alta pressão são usadas geralmente limitadas a pressões de descarga de 50 kgf/cm². Sistemas de pasta e rejeitos espessados usam ambos DP e bombas centrífugas, dependendo da pressão exigida. As bombas de DP, Figura 3.18 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são grandes, pesadas e mais complexas de operar do que as bombas centrífugas. As vantagens das bombas DP incluem maior eficiência e pressão, as desvantagens são as peças de reposição, pulsação e complexidade na operação.



Figura 3.18: Bomba de deslocamento positivo (GEHO, 2011).

Bombas centrífugas

Bombas centrífugas são máquinas de fluxo, cuja função é fornecer energia para um fluido, a fim de recalca-la, através da conversão de energia mecânica de seu rotor ou impulsor proveniente de um motor a combustão ou de um motor elétrico. A Figura 3.19 mostra um corte de uma bomba centrífuga.

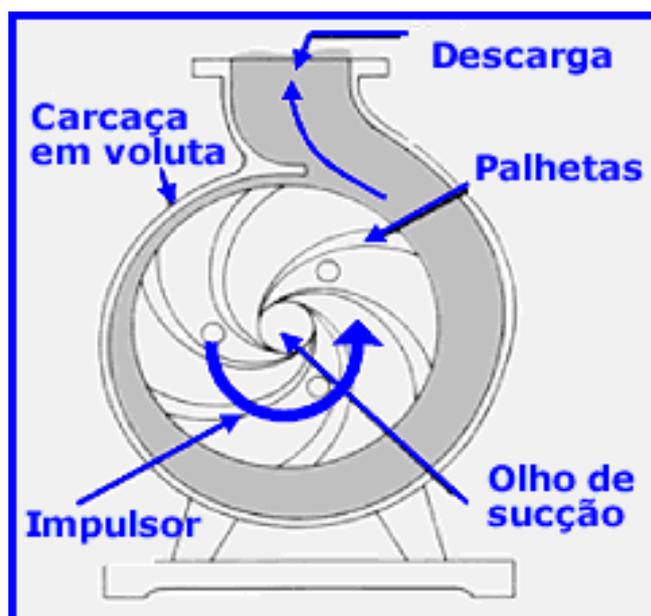


Figura 3.19: Desenho em corte de uma bomba centrífuga

Bombas centrífugas não são normalmente utilizadas como as principais bombas para minerodutos de longa distância. O limite prático da pressão na carcaça da bomba limita o número de bombas que podem ser colocadas em série, e estas bombas requerem selagem do eixo contra a entrada de sólidos. Isso causa diluição significativa da polpa em aplicações com mais de um estágio de bombas. A Figura 3.20 mostra uma típica instalação com bombas centrífugas em série.



Figura 3.20: Instalação bombas centrífugas em série (CHAPMAN, et al. 2009).

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Projeto conceitual

Para a primeira etapa do projeto também chamada de Estudo de Viabilidade, foram estudadas todas as informações disponibilizadas pelo cliente como produção horária, concentração em massa dos sólidos. Nesta etapa foi possível determinar a rota do mineroduto analisando apenas mapas disponíveis pelo IBGE, diâmetro, e espessura do tubo e perda de carga.

Os estudos elaborados nesta etapa foram suficientes para determinar um custo de capital (CAPEX) e um custo operacional (OPEX) com uma margem de erro/acerto de 40%. Apenas cotações da tubulação e da bomba principal foram realizadas.

Nenhum teste de laboratório foi realizado, sendo adotadas características de polpas similares de outros projetos.

Os documentos preparados para o Projeto Conceitual foram incorporados ao relatório final do empreendimento, conforme descrito abaixo:

- critério de projeto preliminar;
- fluxograma de processo;
- arranjos das instalações;
- lista de equipamento mecânico preliminar;
- estimativa de custo de investimento (CAPEX);
- estimativa de custo operacional (OPEX);
- mapa com a rota da tubulação.

4.2 Projeto básico

O projeto básico consiste da complementação do projeto conceitual onde foi possível identificar pontos que não haviam sido considerados (CHAVES, 2002 b). Estudos comparativos foram realizados, o principal comparativo foi a análise do tipo de bomba que seria adotada (centrífuga versus deslocamento positivo), onde devido ao custo baixo as bombas centrífugas foram selecionadas.

O Projeto Básico auxiliou o empreendimento a depurar o custo de investimento e operacional chegando a uma margem de erro/acerto igual a 15%.

Os documentos preparados para o Projeto Básicos foram incorporados ao relatório final do empreendimento, conforme descrito abaixo:

- critério de projeto;
- relatório de teste de laboratório;
- relatório Hidráulico;
- fluxograma de processo e balanço de massas;
- fluxogramas de engenharia;
- especificações técnicas dos equipamentos principais, como tubulação, válvulas e bombas;
- especificações técnicas dos sistemas de instrumentação e controle;

- arranjos das instalações e cortes;
- lista de equipamentos mecânicos;
- lista de equipamentos elétricos;
- diagramas unifilares de força;
- lista de consumos de utilidades;
- lista de insumos para o sistema;
- estimativa de custo de investimento (CAPEX);
- estimativa de custo operacional (OPEX);
- mapa com a rota da tubulação.

Foram enviadas amostras de polpa e água de processo e caracterizadas em laboratório e deste teste foi possível refinar todo o cálculo hidráulico, selecionar o material do tubo e identificar a necessidade do seu revestimento, sendo toda sua extensão revestida internamente com borracha natural.

Os testes de laboratório foram realizados no laboratório da AUSENCOPSI.

Para a amostra de polpa determinou-se:

- percentagem de sólidos da amostra como recebida secando uma alíquota da amostra homogeneizada e o peso específico do sólido com o equipamento Quatachrome, modelo Stereopycnometer utilizando-se a técnica de picnometria a gás hélio;
- testes reológicos em diferentes percentagens de sólidos que foram realizados utilizando o sistema A do viscosímetro Contraves Rheomat 15T;
- distribuição granulométrica das partículas através de peneiramento a úmido e a seco, considerando a série de Tyler;
- testes de penetração;
- testes de ângulo de repouso;
- testes de ângulo de escorregamento;
- teste corrosão da polpa utilizando o corrosímetro Rohrback Cosasco System, INC, modelo 9030 plus.

4.2.1 Porcentagem de sólidos e o peso específico

Foi determinada a porcentagem de sólidos e o seu peso específico como recebido de forma a adequar-se sua concentração para a faixa considerada no projeto. A faixa de concentração em massa do projeto é de 66 até 70%.

A Tabela 4.1 mostra a concentração de sólidos e o peso específico dos sólidos da amostra recebida.

Tabela 4.1: Concentração de sólidos como recebido

Amostra	Concentração (% sólido em massa)	Peso específico do sólido
Polpa	84,0	4,80

Conforme indicado na tabela 4.1 a concentração de sólidos em massa teve que ser diluída a fim de adequar-se a faixa de concentração requerida pelo cliente.

4.2.2 Reologia da polpa

Para a análise reológica a faixa de concentração do projeto foi considerada e as curvas reológicas foram interpretadas utilizando o modelo de Bingham. O modelo de Bingham é apresentado pela seguinte equação:

$$\tau = \tau_0 + \eta \times \gamma$$

Onde;

- τ - tensão de cisalhamento - Pa;
- τ_0 - tensão de cisalhamento crítica - Pa;
- η - viscosidade dinâmica da polpa - Cp (1 Cp = 0,001 Pa.s);
- γ - taxa de cisalhamento - 1/s.

A Tabela 4.2 mostra os resultados da reologia para a faixa de concentração do projeto.

Tabela 4.2: Resultados da Reologia

% Cm	Cv	η (cP) 25° C	η/ ς	τ_y (dyn/cm ²)
66,5	0,29	3,92	4,40	3,00
67,8	0,30	4,54	5,10	3,30
69,8	0,32	5,87	6,60	4,70
71,5	0,34	8,90	10,00	6,60

Onde;

- Cm - concentração de sólido em massa;
 Cv - concentração volumétrica;
 τ_0 - tensão de cisalhamento crítica - Pa;
 η - viscosidade dinâmica da polpa;
 ς - viscosidade da água na temperatura medida.

Observa-se um rápido crescimento da viscosidade reduzida (viscosidade dinâmica em relação a viscosidade da água na temperatura de bombeamento) e da tensão de cisalhamento com aumento da porcentagem de sólidos da polpa.

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 mostram o crescimento da viscosidade reduzida e da tensão de cisalhamento com a porcentagem de sólidos, respectivamente.

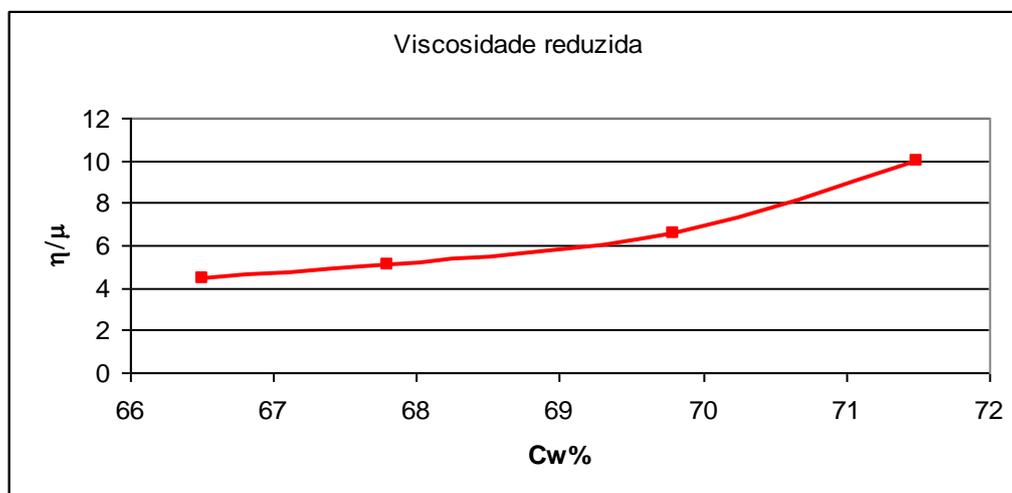


Figura 4.1: Viscosidade reduzida x concentração de sólidos (AUSENCOPSI, 2006 a).

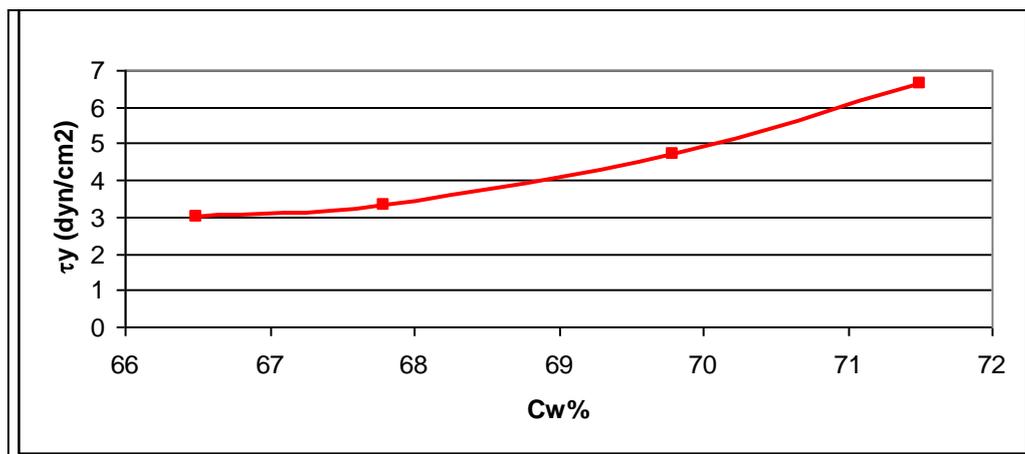


Figura 4.2: Tensão de cisalhamento x concentração de sólidos (AUSENCOPSI, 2006 a).

4.2.3 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica encontrada através do peneiramento a seco e úmido esta indicada na Tabela 4.3 e sua curva indicada na Figura 4.3.

Tabela 4.3: Distribuição granulométrica

Tela (Tyler Mesh)	Tela (μm)	% Passante Acumulada
50#	300	99,89
70#	212	99,27
100#	150	96,99
200#	75	75,93
270#	53	56,98
325#	45	46,65

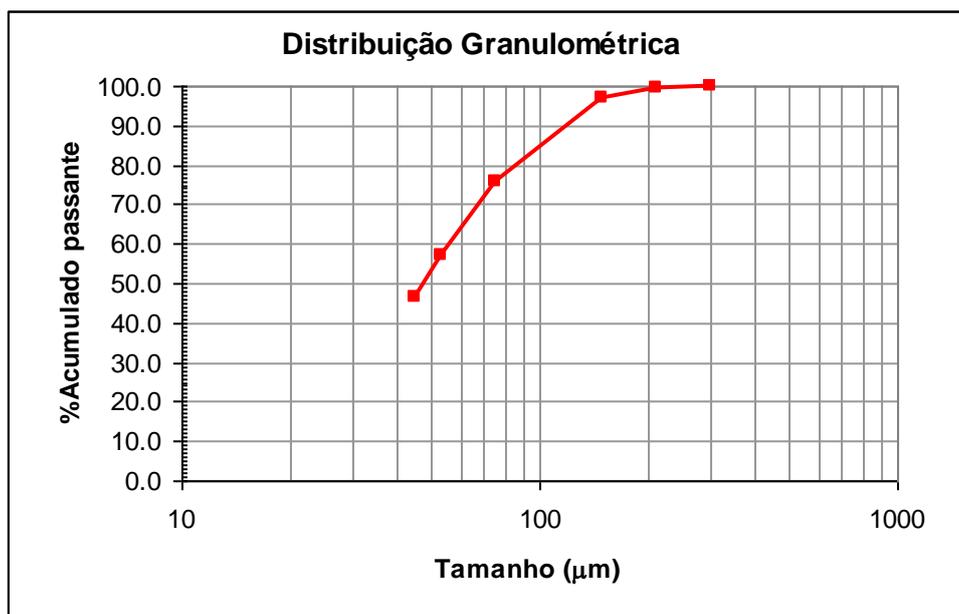


Figura 4.3: Distribuição granulométrica (AUSENCOPSI, 2006 a).

Observam-se as frações d_{50} (49 μm) e d_{95} (140 μm).

4.2.4 Testes de penetração

O objetivo deste teste é determinar o grau de compactação das partículas medindo a massa necessária para um penetrômetro possa atravessar uma camada de sólido sedimentada em um béquer após 24 horas. O resultado deste teste indica o grau de dificuldade de reinício após uma parada do mineroduto.

Os resultados dos testes de penetração são mostrados na Tabela 4.4 e na Figura 4.4.

Tabela 4.4: Testes de penetração

Amostra	Temp. (°C)	pH	% sólidos	Peso do penetrômetro acumulado (g)	Nível (cm)	Pmin (g) 1
				0	3,3	
				15	5,8	
Polpa	25	7,9	68	25	5,8	20
				35	5,9	
				55	8,8	

1. Peso mínimo para que a penetrômetro alcance o fundo do béquer em um movimento.

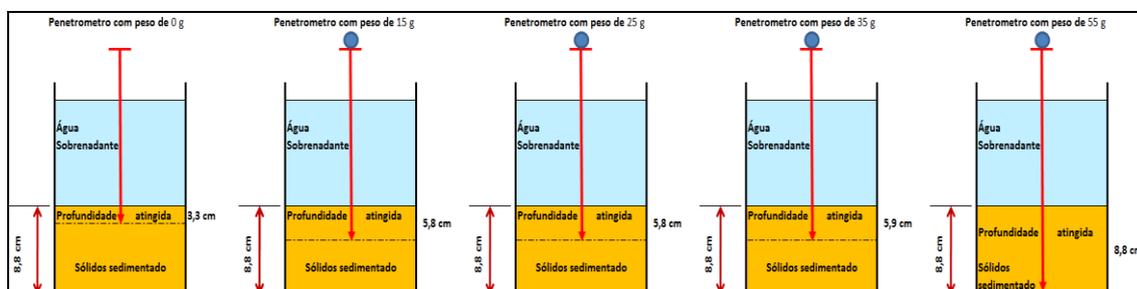


Figura 4.4: Fases do teste de penetrômetro com carga variável

A amostra apresentou um grau de compactação médio sendo que a massa necessária para a cabeça do penetrômetro atingir o fundo do béquer em um único movimento está próxima de 20 gramas. Isto quer dizer que em um reinício do bombeamento do mineroduto não haverá maiores problemas.

4.2.5 Testes de ângulo de repouso e de escorregamento

Ângulo de repouso

Quando materiais granulares são lançados sobre uma superfície horizontal, forma-se uma pilha em forma cônica. O ângulo entre a superfície da pilha e a superfície horizontal é conhecida como o ângulo repouso e está relacionado com a densidade, a área específica e o coeficiente de fricção entre os materiais.

O teste de ângulo de repouso foi realizado na amostra com uma concentração de sólidos em massa de 67,8% de sólidos em peso nas inclinações de 10%, 13% e 15%. O resultado do teste indica qual a inclinação máxima da tubulação do mineroduto. Esta inclinação é essencial para assegurar que o mineroduto não irá entupir em uma parada.

Ângulo de escorregamento

Este teste refere-se à inclinação máxima sobre um plano horizontal, a qual os materiais sólidos fragmentados começam a deslizar.

O objetivo deste teste é simular, qualitativamente, o comportamento da polpa durante a parada do mineroduto.

Os testes de ângulo de repouso e ângulo de escorregamento são de extrema importância durante a fase de projeto porque este ângulo máximo visa manter um filme de água sobre a polpa sedimentada em uma possível parada do bombeamento. Este filme de água é necessário em um reinício do bombeamento, pois a água irá entrar em turbulência e com o aumento da vazão de bombeamento os sólidos serão suspensos. A Figura 4.5 apresenta uma parada ideal do bombeamento.

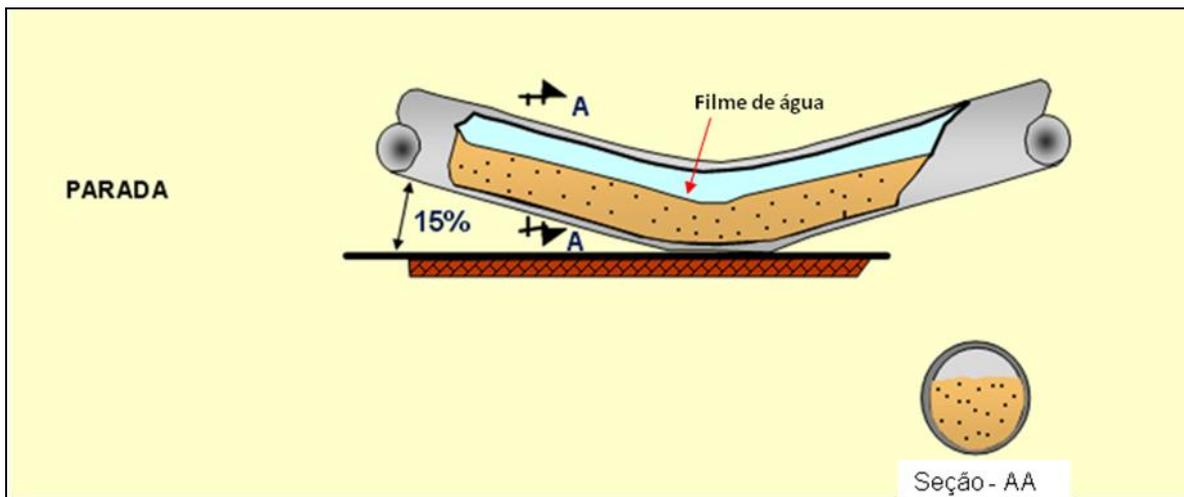
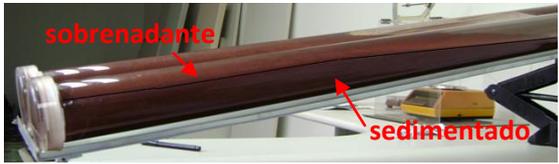
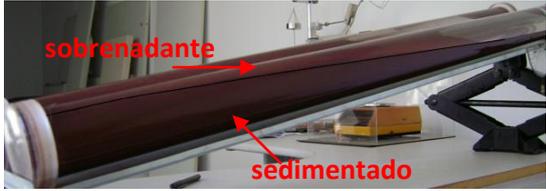


Figura 4.5: Parada ideal do bombeamento.

A Tabela 4.5 mostra os resultados do teste para as inclinações de 10%, 13% e 15%.

Tabela 4.5: Testes de ângulo de repouso

Inclinações (%)	Tubo de acrílico com amostra de polpa	Fundo do tubo de acrílico
10		
13		
15		

Os resultados mostraram que não houve entupimento nas inclinações estudadas.

A Tabela 4.6 mostra o resultado do teste de escorregamento.

Tabela 4.6: Testes de ângulo de escorregamento

Inclinações (%)	Tubo de acrílico com amostra de polpa	Fundo do tubo de acrílico
53		

O teste indicou uma inclinação de 53% para que a polpa entupisse o mineroduto, ou seja, teoricamente o mineroduto poderia ser instalado com uma inclinação menor que 53%. Porém como o teste de ângulo de repouso apresentou o valor máximo de 15% este foi o valor adotado na construção do mineroduto.

4.2.6 Teste de corrosão

O objetivo deste teste é medir a taxa de corrosão e o pitting da polpa em um dado pH e nível de oxigênio. O teste inicia-se com o sistema aberto (condição da polpa na entrada do mineroduto) até as variáveis se estabilizarem. Após a estabilização das leituras, fecha-se o sistema para simular a condição no mineroduto.

Os fatores que podem afetar a corrosão no sistema são os seguintes:

- quantidade de oxigênio dissolvido na polpa;
- composição química da polpa;
- corrosão Galvânica;
- temperatura;
- pressão;
- taxa de fluxo. Alta agitação da polpa pode remover uma camada de proteção à corrosão.

A Figura 4.6 mostra os resultados do teste de corrosão da polpa onde foram observados:

- com o sistema aberto: altas taxas de corrosão, e alto nível de oxigênio;

- com o sistema fechado: decaimento do nível de oxigênio a taxa de 1,09 ppm/hora, acompanhada da queda da taxa de corrosão (2,33 mpy/hora).

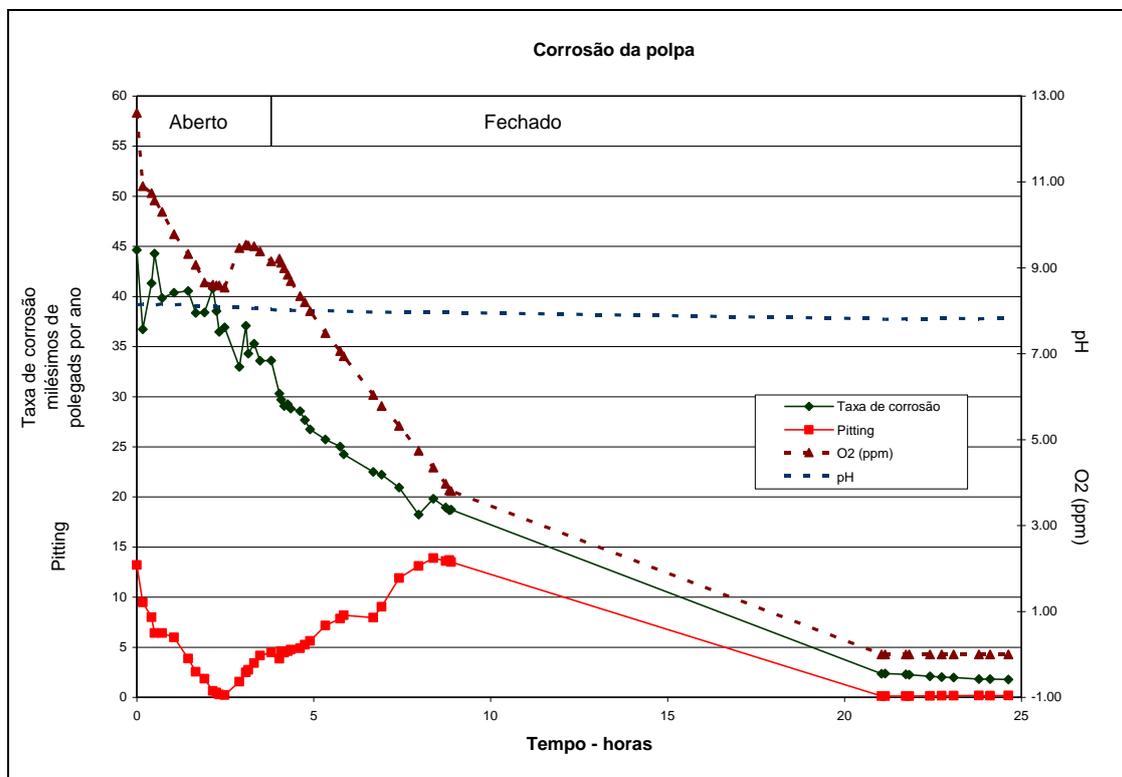


Figura 4.6: Corrosão da polpa (AUSENCOPSI, 2006 a).

Observa-se que há alta taxa de consumo de oxigênio na polpa indicando que o sólido está participando do consumo de oxigênio do sistema. Os testes de corrosão foram realizados durante aproximadamente 25 h. Os valores do pitting em todos os testes foram menores que os valores de corrosão, indicando que problemas com corrosão localizada devem ser mínimos.

Como o tempo de transito da polpa do mineroduto é de aproximadamente 33 min, uma alta taxa de corrosão foi observada, somando o fato de a polpa ser bastante abrasiva, optou-se pelo revestimento interno do tubo.

4.3 Projeto detalhado

O projeto detalhado inicia-se com a consolidação do projeto básico onde é feita a adequação, por exemplo a adequação do projeto aos equipamentos adquiridos, sendo que no projeto básico foi utilizado modelos de equipamentos de catálogos. Após esta

fase o Projeto Detalhado é então iniciado sendo desenvolvida a engenharia destinada para a construção e montagem do mineroduto.

Para o projeto do mineroduto em questão as três fases de projeto tiveram uma duração de 2 anos.

4.4 Projeto elaborado

Instalações do mineroduto

O mineroduto foi projetado para o transporte de 7.000.000 t/ano em uma faixa de concentração em massa de 66 a 70% e uma vazão nominal de 567,5 m³/h.

Em geral, o sistema do mineroduto é composto por:

- uma estação de bomba composta por dois trens de bombas centrífugas (um em operação / um reserva) com cinco bombas de velocidade variável cada;
- quatro tanques de polpa com agitadores de 16 metros de diâmetro por 16 metros de altura, sendo dois na estação de bombas e dois na estação terminal;
- uma tubulação em aço carbono enterrada, comprimento de 5,0 km, 12,75 polegadas (323,8 mm) de diâmetro externo, revestido internamente;
- duas estações de monitoramento de pressão (PMS);
- sistema SCADA (supervisão e aquisição e controle de dados de processo);
- telecomunicações - Cabo de fibra óptica;
- sistema de proteção catódica por corrente impressa.

Estação de bombas

A Estação de bombas está localizada na planta de beneficiamento perto do espessador de concentrado. Ela é projetada para fornecer a carga hidráulica necessária para transportar a polpa de concentrado de ferro do local da instalação para o terminal, localizado 5,0 km a jusante.

Na estação de bomba existem dois tanques de armazenamento (16m x 16 m) de polpa com agitadores. Os agitadores são equipados variadores de frequência, permitindo controlar a velocidade de acordo com o nível do tanque.

Cada trem é composto por cinco bombas centrífugas em serie de velocidade variável. O modelo da bomba é Weir Warman com uma altura manométrica total 80 mcl, quando bombeando batelada de água.

A vazão de projeto para cada bomba é 567,5 m³/h em uma concentração de sólidos em massa de 68%. Cada trem de bomba é projetado para uma pressão de descarga de 40,4 kgf/cm² (575 psi).

A tubulação e as válvulas de sucção da estação de bombas são projetadas para ANSI Classe 150 (285 psi), enquanto que a partir da descarga do trem de bombas as válvulas de isolamento do mineroduto são ANSI Classe 300 (740 psi).

Cada uma das dez bombas de polpa tem uma bomba de água dedicada tipo deslocamento positivo com velocidade variável para sua selagem.

Os dois trens de bombas foram selecionados com capacidade suficiente para fazer a limpeza completa do mineroduto com água.

Mineroduto

O mineroduto tem aproximadamente 5 km de comprimento e inicia-se na Estação de bombas na elevação 1340 m e o seu ponto final é no Terminal na elevação 1380 m. Foi construído em aço carbono API 5L Grau B, diâmetro externo de 12,75 polegadas (323,8 mm) e espessura de parede igual a 0,375 polegadas (9,53 mm).

A fim de proteger o tubo contra erosão e corrosão da polpa, o tubo foi revestido internamente com borracha natural com espessura de 0,625 polegadas (15,88 mm). Devido a este procedimento o tubo deve ser flangeado a cada 12 metros.

O mineroduto foi enterrado em toda sua extensão com uma cobertura média de 0,76 m.

Um sistema de proteção catódica foi instalado para mitigar uma possível corrosão externa do tubo.

Seleção do tubo

A seleção do tubo do mineroduto foi baseado seguindo os critérios abaixo:

Norma	-	ANSI B31.11;
Material	-	API 5L Grau B em aço carbono;
Tensão de escoamento	-	35,000 psi;
Fator de projeto	-	0.80 da tensão de escoamento do tubo.

Estação de monitoramento de pressão

O objetivo desta estação é o operador do mineroduto ter a leituras instantâneas de pressão ao longo da linha e poder tomar decisões de urgência em uma eventual emergência, como um vazamento. Duas estações foram instaladas no quilômetro 1,5 e no quilômetro 3,4.

As estações são interligadas por um cabo de fibra ótica que percorre todo o mineroduto.

Estação terminal

A chegada do mineroduto é no quilômetro 5,0 na estação terminal, onde a polpa é bombeada para uma torre gravimétrica e por gravidade direcionada para os tanques de armazenamento (16 m x 16 m) de polpa com agitadores. Um medidor de densidade e um de vazão foi instalado para que o balanço de massas seja feito pela operação.

Velocidade crítica

Os cálculos demonstraram que a velocidade crítica de transporte é a de deposição dos sólidos, e este valor mínimo é de 2,3 m/s cobrindo toda a faixa de concentração de sólidos em massa do projeto.

Faixa de operação do mineroduto

A faixa de concentração de sólidos em massa varia de 66% a 70%, com uma vazão mínima de 485 m³/h e máxima de 601,5 m³/h. A produção mínima é 669 t/h e máxima de 892 t/h.

A operação nominal do mineroduto é de 840 t/h para uma concentração de 68% e vazão de 567,5 m³/h.

A Tabela 4.7 mostra a faixa de operação do mineroduto.

Tabela 4.7: Faixa de operação

Produção - Milhões de toneladas por ano (MTA)	Vazão (m ³ /h)	Produção (t/h)
5,5	485,0	668
7,0	567,5	841
7,4	601,5	892

4.5 Construção

A construção do mineroduto inicia-se após a obtenção das licenças de implantação e operação, seguindo basicamente as etapas abaixo:

- 1ª etapa - abertura da faixa de servidão onde o mineroduto será instalado. Esta faixa de servidão é de aproximadamente 30 m, sendo possível o trânsito dos equipamentos necessários para a instalação do duto, conforme visto na Figura 4.7.

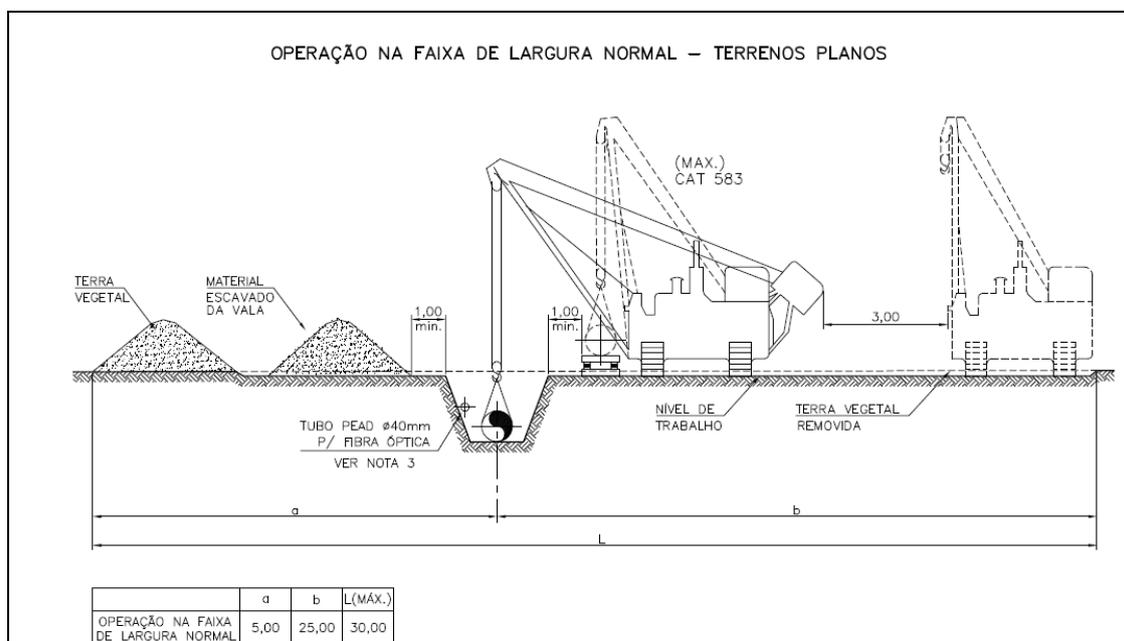


Figura 4.7: Faixa de servidão típica (AUSENCOPSI, 2006 b).

- 2ª etapa - desfile do tubo ao longo da rota do mineroduto, conforme Figura 4.8.



Figura 4.8: Desfile de tubos (AUSENCOPSI, 2006 b).

- 3ª etapa - abertura da vala para alocação do tubo, conforme Figura 4.9.



Figura 4.9: Abertura de vala (AUSENCOPSI, 2006 b).

- 4ª etapa - refere-se a união das juntas que podem ser soldadas ou flangeadas, no caso em questão foram flangeadas e protegidas com uma manta termocontratil, Figura 4.10 e Figura 4.11.



Figura 4.10: União da junta (AUSENCOPSI, 2006 b).



Figura 4.11: Proteção da junta (AUSENCOPSI, 2006 b).

- 5ª etapa - abaixamento do tubo na vala após a etapa de união da junta, Figura 4.12.



Figura 4.12: Abaixamento do tubo (AUSENCOPSI, 2006 b).

- 6ª etapa - cobertura do tubo na vala, Figura 4.13.



Figura 4.13: Cobertura do tubo (AUSENCOPSI, 2006 b).

Durante estas etapas alguns procedimentos são adotados como ensaios não-destrutivos das soldas, testes hidrostáticos, teste de resistência do revestimento das juntas e após a conclusão da construção o mineroduto está pronto para ser comissionado e entregue a operação.

4.6 Análise do comissionamento

4.6.1 Bombeamento normal

O comissionamento inicia-se com a fase de checagem da complementação mecânica da construção onde é possível observar a qualidade, segurança e certificar de que não haverá falhas ao ligar um equipamento.

Finalizada a complementação mecânica o mineroduto é iniciado com água por um período suficiente para avaliação de todo o processo. São verificadas as condições mecânicas, elétricas e hidráulicas do mineroduto comparando os valores de projeto com os encontrados no campo. A Figura 4.14 mostra o gradiente hidráulico de projeto e o real para uma vazão de 480 m³/h.

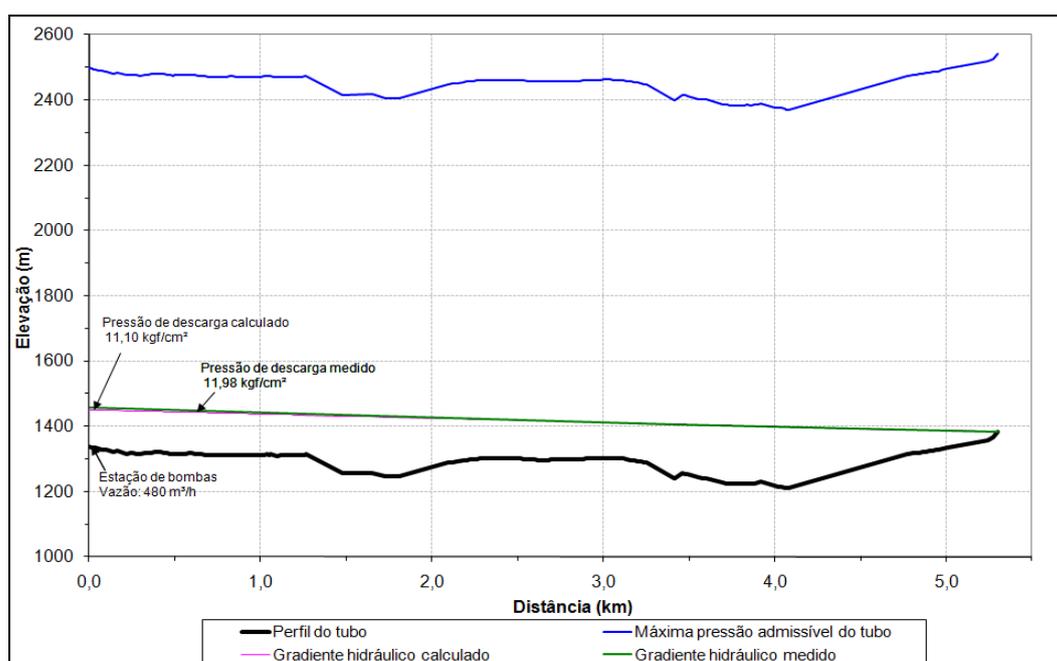


Figura 4.14: Gradiente hidráulico para água.

Observa-se que a diferença de entre o valor da pressão calculada para a medida foi de 8%. Isto indica que o modelo hidráulico utilizado foi bem calibrado no início do projeto.

Visto que não houve problemas com o bombeamento de água e que o modelo hidráulico esta correto para água foi iniciado o mineroduto com polpa.

A seguir são mostrados diferentes perfis e gradientes hidráulicos bombeando polpa na faixa de concentração indicada no projeto.

Os cálculos hidráulicos baseiam-se nos dados de projeto comparados com as pressões medidas.

A perda de carga medida foi de 15% abaixo do modelo teórico.

A Figura 4.15 mostra o gradiente hidráulico para uma vazão de 552,5 m³/h e concentração de sólidos em massa de 62,8%.

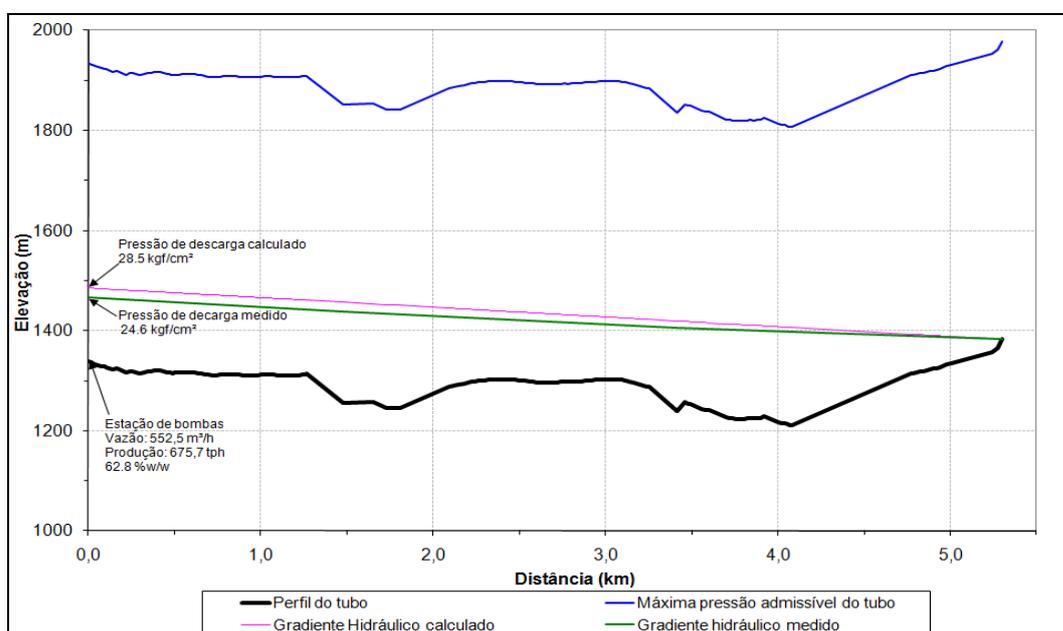


Figura 4.15: Gradiente hidráulico para polpa com 62,8% (Cp).

A Figura 4.16 mostra o gradiente hidráulico para uma vazão de 569,9 m³/h e concentração de sólidos em massa de 66,0%.

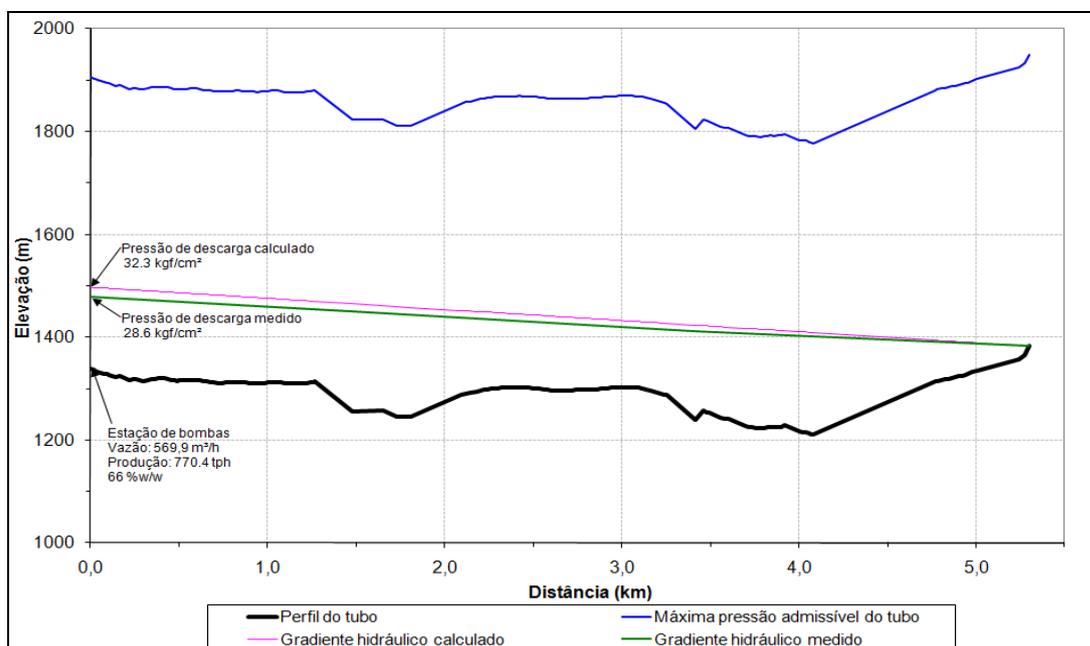


Figura 4.16: Gradiente hidráulico para polpa com 66,0% (Cp).

A Figura 4.17 mostra o gradiente hidráulico para uma vazão de 599,9 m³/h e concentração de sólidos em massa de 67,4%.

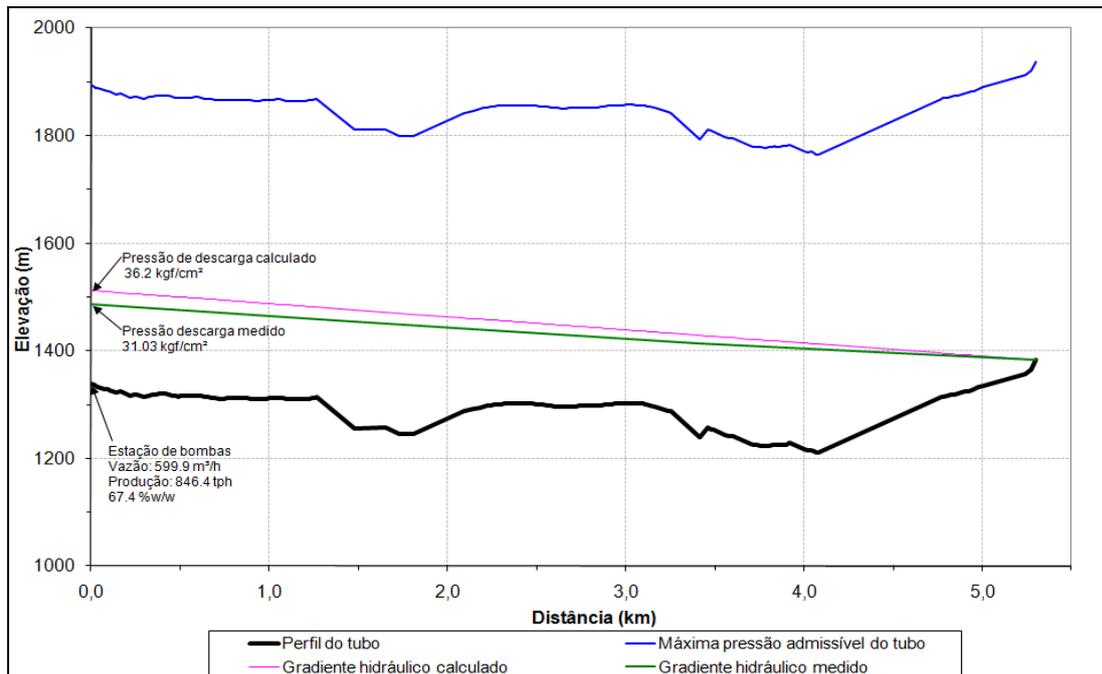


Figura 4.17: Gradiente hidráulico para polpa com 66,0% (Cp).

Ambos os trens de bombas foram selecionados para a capacidade de limpeza completa do mineroduto. Por esta razão não foram considerados no projeto bombas de água para fazer a limpeza do mineroduto. Cada bomba centrífuga foi dimensionada para uma altura manométrica de 80 mcl e um motor de 400 HP.

A Figura 4.18 mostra o gradiente hidráulico durante a limpeza do mineroduto.

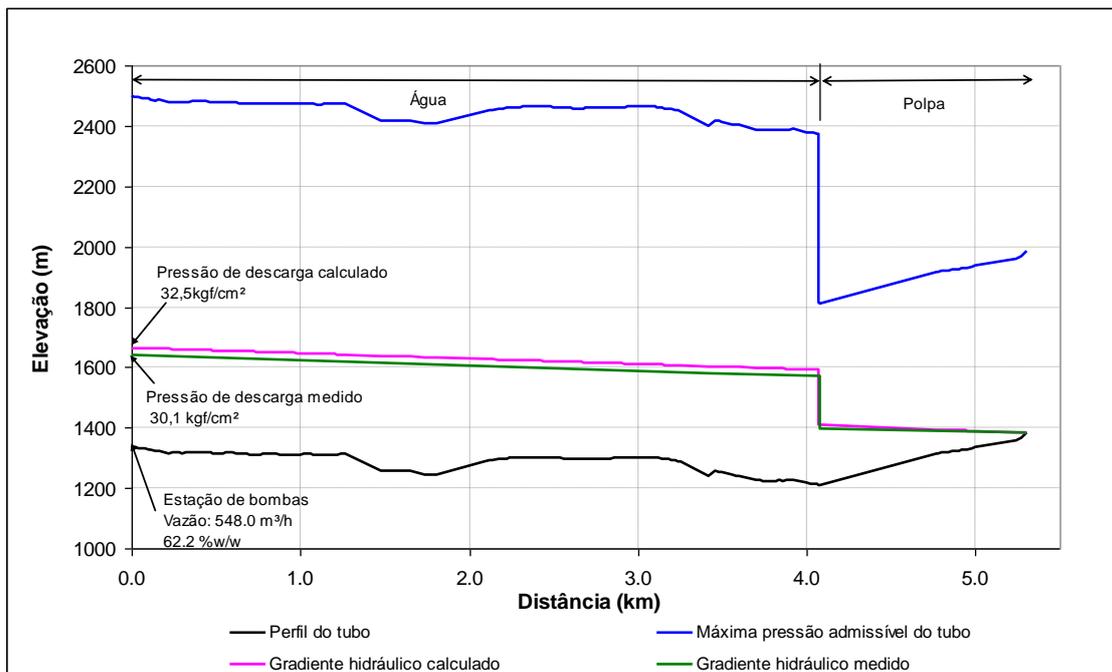


Figura 4.18: Gradiente hidráulico durante a limpeza do mineroduto.

4.6.2 Evento de transiente

No projeto foi considerada uma válvula esfera que deveria servir como retenção a fim de proteção contra o fenômeno de transientes. Esta válvula fecha-se automaticamente 10 segundos após uma falha no bombeamento.

No período do comissionamento o bombeamento foi interrompido bruscamente devido à queda de energia na planta, ocorrendo vários transientes no mineroduto. A Figura 4.19 mostra um transiente em uma destas falhas.

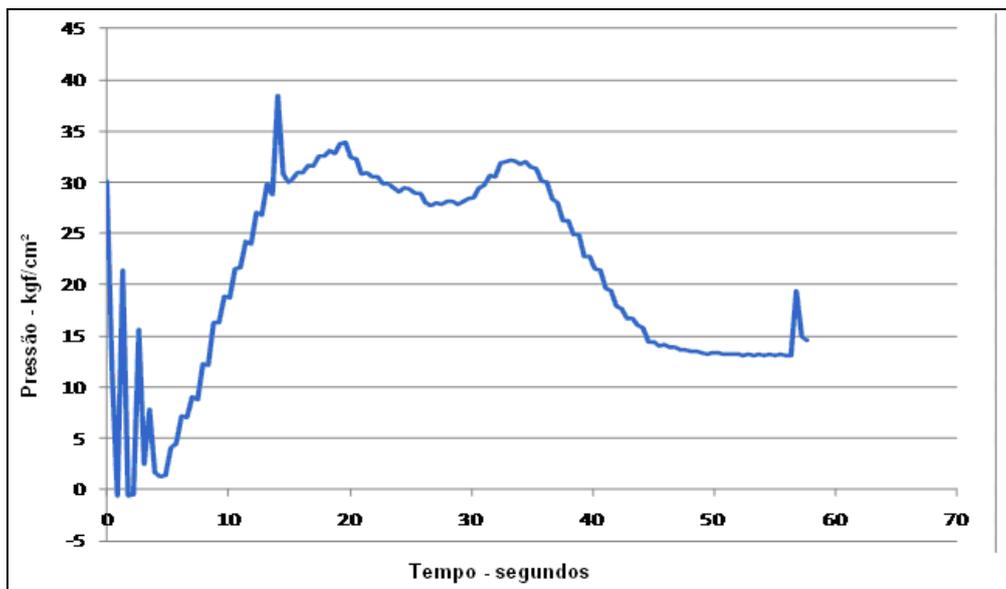


Figura 4.19: Evento de transiente durante queda de energia das bombas.

4.6.3 Longa parada com polpa

Houve uma parada do bombeamento durante 8 h com o mineroduto completamente cheio de polpa com densidade $2,13 \text{ t/m}^3$. O reinício do bombeamento só foi possível através das bombas selagem de água que são do tipo deslocamento positivo. Este procedimento foi o mais adequado e durante uma hora, água foi bombeada em uma baixa vazão de $30 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo a máxima vazão das bombas de selagem, entretanto, o medidor de vazão no terminal registrava fluxo zero, indicando um possível entupimento, visto que na entrada do mineroduto registrava $30 \text{ m}^3/\text{h}$ e na saída $0 \text{ m}^3/\text{h}$.

Após o período de uma hora o medidor de vazão registrou o aumento da vazão no terminal, onde foi iniciado o trem de bombas de polpa sendo possível aumentar a vazão do sistema ($500 \text{ m}^3/\text{h}$) até a velocidade crítica para total suspensão dos sólidos. Durante todo o procedimento de reinício a pressão permaneceu sob os limites do projeto e foi visto no medidor de densidade no terminal o aumento da densidade devido à sedimentação da polpa no intervalo de parada de 8 horas. Picos de densidade igual a 2.61 t/m^3 foram registrados.

A Figura 4.20 mostra a curva de densidade registrada no medidor localizado no terminal do mineroduto.

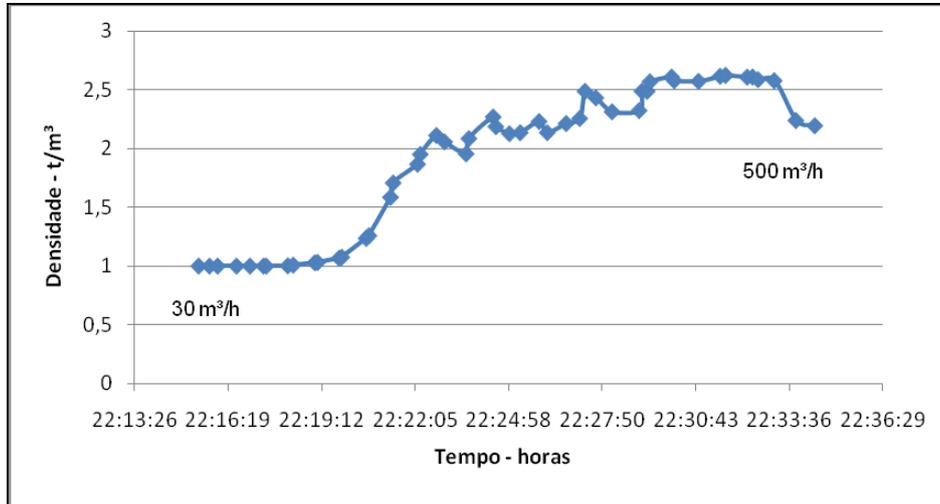


Figura 4.20: Curva de densidade no terminal.

5 CONCLUSÃO

Muitas empresas precisam quebrar o paradigma de que o transporte de polpas minerais através de mineroduto é inviável, visto que em alguns casos é a melhor opção econômica e técnica como foi mostrado neste trabalho. Muitas pessoas acreditam que o mineroduto é um sistema complexo e inseguro, mas foi possível demonstrar neste trabalho que existem procedimentos bem rigorosos quanto ao projeto e operação, desde que seja feito por uma empresa especializada no processo. Nos itens do capítulo 4 são vistos os rígidos testes que são executados antes do início do projeto a fim de obter todos os resultados para eventuais problemas que possam ocorrer na operação do mineroduto.

A tecnologia do transporte de polpa é complexa e dominada por poucas pessoas no mundo e felizmente no Brasil esta tecnologia está sendo desenvolvida com extrema competência e responsabilidade.

O mineroduto apresentado neste trabalho está em operação há aproximadamente 3 anos com grande sucesso, com a total satisfação do cliente.

Quanto ao custo operacional o mineroduto é disparado o tipo de transporte mais econômico com valores de OPEX bem reduzidos.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de continuidade deste trabalho é necessário abordar alguns tópicos que aqui não foram muito aprofundados e que seriam de grande valia para projetos de minerodutos. Abaixo alguns tópicos recomendados para trabalhos futuros:

- desenvolvimento de equações que calculam com mais exatidão as velocidades críticas, sejam elas de transição ou deposição;
- estudos dos desgastes por corrosão e abrasão nas tubulações não revestidas com borracha natural;
- comparativo criterioso entre os vários tipos de transporte de polpa seja por caminhão e ferrovia.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASPEN TECHNOLOGY. (2003). *Wear in Slurry Systems*.

AUSENCOPSI. (2006 a). *Testes de Laboratórios*.

AUSENCOPSI. (2006 b). *Relatório fotográfico de obra*.

AUSENCOPSI. (2007). *Treinamento em minerodutos*. Belo Horizonte.

CHAPMAN, J. P., VIDAL, A. M., PINTO, D., & LIMA, R. (2009). *Slurry Pipeline Technology - An Overview*. Rio Pipeline Conference and Exposition 2009. Rio de Janeiro.

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

CHAVES, A. P. (2002 b). *Gerenciamento de Projetos de Mineração*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GEHO, P. S. (2011). (WEIR Minerals) Acesso em 15 de Junho de 2011, disponível em <http://www.weirminerals.com>:
http://www.weirminerals.com/products__services/piston_diaphragm_pumps/piston_diaphragm_pumps/tzpm_pump.aspx

HANKS, R. W., & DADIA, B. H. (1971). *Theoretical Analysis of the Turbulent Flow of Non-Newtonian Slurries ins Pipes*. AIChE Journal .

LAROCK, B. E., JEPPSON, R. W., & WATTERS, G. Z. (2000). *Hydraulics of Pipeline System*. Washington: CRC Press.

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

MME, M. d. (2011). <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 30 de 06 de 2011

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