

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

ESPESSAMENTO E TRANSPORTE DE PASTA MINERAL

Aluna: Ana Flávia Morais de Lara

Professor Orientador: George Eduardo Sales Valadão

Fevereiro - 2011

DEDICATÓRIA

Ao Edson,

Que está comigo em cada passo, me apoiando, motivando e ensinando a ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu refúgio e força, onde sempre encontrei respostas para os meus problemas.

Aos meus pais, Maria e Flávio, que me guiaram pelos caminhos corretos, me mostraram que a honestidade e o respeito são essenciais à vida, e que devemos sempre lutar pelo que queremos. A eles devo a pessoa que me tornei.

Ao meu irmão Nando, que mesmo distante sempre me incentivou a correr atrás dos meus objetivos, sendo além de irmão amigo,

Aos meus amigos, por tolerar a minha impaciência, que não é pouca.

Ao meu Orientador Professor Valadão, pelo empenho, paciência e credibilidade, obrigada por tudo.

Aos professores do CEERMIN obrigado pelo conhecimento transmitido, e por estarem sempre dispostos a me atender.

Aos colegas de classe, pouco tempo talvez para escrever uma história, mas muito para preencher mais um capítulo importante que compõe minha vida.

RESUMO

A pasta mineral pode ser definida como um sistema coloidal, que se apresenta como um fluido homogêneo, no qual não ocorre segregação granulométrica das partículas, e que ao ser disposto suavemente sobre superfícies estáveis, não mostra drenagem significativa de água. Durante as últimas décadas, a aplicação da tecnologia de espessamento de pasta progrediu para uma tecnologia amplamente aceita. As pressões para reduzir o uso das tradicionais barragens de rejeitos e a ênfase mundial sobre conservação de água contribuíram para o avanço desta tecnologia. Com a evolução da tecnologia de pasta mineral, a demanda se tornou maior em relação aos estudos mais criteriosos de transporte e manuseio de pasta, para tornar esta tecnologia mais acessível e praticável. O trabalho apresentado utilizou análises de laboratório e estudo de viabilidade técnica (operacional e capital) para comparar o armazenamento e o transporte de misturas de minério de ferro (PFF – pellet feed fines) na forma de pasta mineral. O estudo demonstrou que o transporte de pasta é extremamente difícil, tem alto custo de implantação e operação, principalmente para longas distâncias, pois requer mais estações intermediárias de bombeamento, o que reduziria a disponibilidade do sistema. Além das dificuldades técnicas, este sistema tem pouca flexibilidade operacional, quaisquer alterações de vazão e de concentração impactam significativamente na consistência do material. Também existe o agravante da estocagem da pasta, pois não é possível estocar em tanque, sendo necessário considerar caixas de recepção, em cada estação, para transferência do material, minimizando, ainda mais a disponibilidade do sistema.

ABSTRACT

The mineral paste can be defined as a colloidal system, which appears as a homogeneous fluid, in which no particle size segregation occurs, and be disposed the gentle deposition on stable surfaces, shows no significant drainage water. During the last decades, the technology for thickening the paste progressed to a widely accepted technology. The pressures to reduce the use of traditional tailings dams and global emphasis on water conservation have contributed to the advancement of this technology. With the evolution of the technology of mineral paste, increased the demand for more detailed studies of transportation and handling of paste, to make this technology more accessible and feasible. The present work used laboratory analysis and technical feasibility study (operational and capital) to compare the storage and transport of mixtures of iron ore (PFF - pellet feed fines) with the consistency of mineral paste. The study demonstrated that transporting the material thickened into a paste, it is extremely difficult for it has a high cost of implementation and operation, especially for long distances because it would require more intermediate pumping stations, which reduces the availability of the system. Apart from technical difficulties, this system has little operational flexibility and any changes in flow and concentration impact on the consistency of the material. It also has the difficulty of paste storing, for it is not possible to store in tanks and is necessary to consider receiving boxes at each station for the material transfer, minimizing even further the availability of the system.

SUMÁRIO

1	OBJETIVO.....	1
2	RELEVÂNCIA.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Mineração.....	3
3.2	Rejeitos.....	4
3.2.1	Disposição de Rejeitos.....	4
3.2.2	Desaguamento de Rejeitos	6
3.3	Espessamento	6
3.3.1	Sedimentação.....	7
3.3.2	Fatores que Afetam o Espessamento	8
3.3.3	Tipos de Espessadores	10
3.4	Pasta Mineral.....	13
3.5	Mineroduto	14
3.5.1	Comportamento das Polpas.....	16
3.5.2	Tipos de Fluxos	16
3.5.3	Velocidade de Transporte	19
3.5.4	Reologia das Polpas	21
4	METODOLOGIA.....	24
4.1	Histórico das amostras	24
4.2	Rota de Testes	24
4.2.1	Amostra AdoB352.....	24
4.2.2	Amostra AdoB353.....	25
4.2.3	Misturas entre as amostras AdoB352 e AdoB353.....	25
4.2.4	Amostra AdoB354.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1	Densidade de sólidos	27
5.2	Distribuição Granulométrica.....	27
5.3	Reologia	28
5.3.1	Viscosímetro Rotacional.....	28
5.3.2	Teste Vane.....	29
5.3.3	Teste slump	32
5.4	Teste de Penetração	33

5.5	Ângulo de Repouso.....	35
5.6	Teste de Sedimentação.....	36
5.7	Resumo das Análises	39
6	ANÁLISE COMPARATIVA E ESTUDO ECONÔMICO.....	42
6.1	Informações Gerais	42
6.2	Paralelo entre os materiais analisados	43
6.2.1	Distribuição Granulométrica	43
6.2.2	Densidade de Sólidos.....	44
6.2.3	Reologia	44
6.2.4	Concentração de Sólidos.....	45
6.2.5	Velocidade Operacional Mínima de Segurança	46
6.2.6	Taxa de Corrosão / Erosão	47
6.3	Considerações para o Mineroduto	47
6.3.1	Materiais do Mineroduto.....	47
6.3.2	Revestimento da Tubulação da Linha Principal.....	47
6.3.3	Dimensionamento de Tanques	48
6.3.4	Faixa de pH	48
6.3.5	Temperatura	48
6.3.6	Rota e Perfil do Mineroduto.....	48
6.4	Análise Ecomômica	49
6.4.1	Custo de Construção	49
6.4.2	Gráficos comparativos	50
7	CONCLUSÃO.....	55
8	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	56
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
	ANEXO I - Distribuição Granulométrica das Amostras e das Misturas.....	59
	ANEXO II - Reogramas	61
	ANEXO III - Perfis Hipotéticos.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Mineração com Lavra a Céu Aberto	3
Figura 3.2: Barragem de Rejeito Convencional	5
Figura 3.3: Barragem de Rejeito Espessado.....	6
Figura 3.4: Teste de Proveta - Evolução da Decantação com o Tempo	8
Figura 3.5: Espessador Convencional.....	11
Figura 3.6: Espessador de Pasta – Deep Cone	12
Figura 3.7: Pasta Mineral	13
Figura 3.8: Mineroduto (Aéreo)	15
Figura 3.9: Tipos de Escoamento em Função da Velocidade e do Tipo de Polpa	17
Figura 3.10: Correlação de Densidade e Tamanho de Partículas.....	19
Figura 3.11: Modelos Reológicos de Polpa	22
Figura 3.12: Fluxo Newtoniano e de Bigham	23
Figura 4.1: Fluxograma de Testes de Laboratório Realizados	26
Figura 5.1: Curva de Distribuição Granulométrica das Amostras.....	28
Figura 5.2: Viscosidade Reduzida em Função da Porcentagem de Sólidos para a Amostra AdoB352 em pH 11.5	29
Figura 5.3: Variação da Tensão de Cisalhamento da Amostra AdoB352 com o Tempo	30
Figura 5.4: Variação da Tensão de Cisalhamento da Amostra AdoB352 - 10% SF com o Tempo	30
Figura 5.5: Variação da Tensão de Cisalhamento da Amostra AdoB352 - 20% SF com o Tempo	31
Figura 5.6: Variação da Tensão de Cisalhamento da Amostra com a Concentração	31
Figura 5.7: Ensaio de Penetração da Amostra AdoB352 +20 %SF, nas Concentrações de Sólidos 69%, 71,8% e 76%.....	34
Figura 5.8: Amostra AdoB352 20%SF, $C_w = 72,2\%$, Mostrando a Formação de uma Camada de Material Grosso no Fundo da Proveta após Sedimentação.....	35
Figura 5.9: Ângulo de Repouso de 15% - Amostra AdoB352 e Amostra AdoB352+20%SF.....	36
Figura 5.10: Curva de Sedimentação da Amostras AdoB352 - 70,7% de Sólidos.....	38
Figura 5.11: Curva de Sedimentação da Amostras AdoB352 - 20% de SF -72,2% Sólidos.....	38

Figura 5.12: Curva de Sedimentação da Amostras AdoB352 - 20% de SF -77% Sólidos	39
Figura 6.1: Comparação de Tamanhos de Partícula entre PFF e SF	44
Figura 6.2: Comparativo de Custo de Capital para o Caso A	51
Figura 6.3: Comparativo de Custo de Capital para o Caso B	51
Figura 6.4: Comparativo de Custo de Capital para o Caso C	52
Figura 6.5: Comparativo de Custo de Capital para o Caso D	52
Figura 6.6: Comparativo de Custo Operacional para o Caso A	53
Figura 6.7: Comparativo de Custo Operacional para o Caso B	53
Figura 6.8: Comparativo de Custo Operacional para o Caso C	54
Figura 6.9: Comparativo de Custo Operacional para o Caso D	54
Figura AII. 1: Reograma da Amostra AdoB352 – Concentração de sólidos: 68,1% ww	61
Figura AII. 2: Reograma da Amostra AdoB352 – Concentração de sólidos: 73,5% ww	61
Figura AII. 3: Reograma da Amostra AdoB352 – Concentração de sólidos: 70,6% ww	62
Figura AII. 4: Reograma da Amostra AdoB352 – Concentração 71,3% ww	62
Figura AII. 5: Tela do Programa com Ajuste das Curvas dos Parâmetros Reológicos ..	63
Figura AIII. 1: Perfil Hipotético para uma Rota de 5 km	64
Figura AIII. 2: Perfil Hipotético para uma Rota de 25 km	64
Figura AIII. 3: Perfil Hipotético para uma Rota de 100 km	65
Figura AIII. 4: Perfil Hipotético para uma Rota de 200 km	65
Figura AIII. 5: Perfil Hipotético para uma Rota de 400 km	66
Figura AIII. 6: Perfil Hipotético para uma Rota de 600 km	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Identificação das Amostras em Análise	24
Tabela 5-1: Densidade de Sólidos das Misturas das Amostras AdoB352 e AdoB353... 27	
Tabela 5-2: Resultados da Reologia com Viscosímetro Rotacional.....	28
Tabela 5-3: Teste de Slump para as Diversas Misturas	32
Tabela 5-4: Teste de Penetração da Amostra AdoB352	33
Tabela 5-5: Resultados dos Testes de Sedimentação.....	37
Tabela 5-6: Resumo dos Testes Realizados	40
Tabela 5-7: Resumo das Análises dos Testes Realizados	40
Tabela 5-8: Critérios Utilizados para Classificação das Amostras em 68% de Sólidos. 41	
Tabela 6-1: Distribuição Granulométrica – PFF e Material < 1 mm.....	43
Tabela 6-2: Propriedades Reológicas dos Casos A, B e C.....	45
Tabela 6-3: Concentração de Sólidos	46
Tabela 6-4: Velocidades de Operação Adotadas para Cada Caso.....	47
Tabela AI. 1: Distribuição Granulométrica das Amostras e das Misturas – Parte 1	59

1 OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo:

- i. realizar uma revisão bibliográfica relacionada ao espessamento enfocando o transporte de pasta mineral;
- ii. verificar a importância ambiental, econômica e social associada ao mesmo;
- iii. apresentar os resultados de um estudo comparativo, que utilizou análises de laboratório e estudo de viabilidade técnica para comparar o armazenamento e o transporte de misturas de produtos de minério de ferro na forma de pasta mineral.

2 RELEVÂNCIA

As organizações que geram passivos ambientais minerais vêm enfrentando, cada vez mais, os desafios técnicos, financeiros e sociais que devem ser resolvidos para permitir uma exploração sustentável.

Desta forma, as empresas buscam soluções que permitam realizar negócios de forma rentável, que atendam as restrições ambientais e que favoreçam a prosperidade das comunidades.

Durante as últimas décadas, a aplicação da tecnologia de espessamento de pasta progrediu de uma pesquisa, baseada em um conceito, para uma tecnologia amplamente aceita e praticada para o gerenciamento de resíduos minerais.

As pressões para reduzir o uso das tradicionais barragens de rejeitos e a ênfase mundial sobre conservação dos recursos hídricos contribuíram para o avanço da tecnologia de espessamento de polpa, que atualmente está em expansão dentro e fora da indústria de mineração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item será apresentada uma breve revisão da literatura relacionando os assuntos relevantes para a compreensão dos resultados discutidos no decorrer da monografia.

3.1 MINERAÇÃO

Mineração é uma atividade que abrange operações cujos objetivos principais são a extração e beneficiamento de substâncias minerais encontradas na natureza. Podem ser incluídas aqui a extração de petróleo, gás natural e água. A mineração é indispensável para a manutenção do atual nível de vida e avanço das sociedades modernas em que vivemos. Desde os metais aos cerâmicos, dos combustíveis aos plásticos, equipamentos elétricos e eletrônicos, tubos, computadores, cosméticos, passando pelas estradas e outras vias de comunicação e muitos outros produtos e materiais que utilizamos ou de que desfrutamos todos os dias, todos eles têm origem na atividade da mineração. Pode-se, sem qualquer tipo de dúvida, dizer que sem a mineração a civilização atual, tal como a conhecemos, pura e simplesmente não existiria, fato do qual a maioria da sociedade nem sequer se apercebe (INTER PRESS SERVICE, 2006).

A imagem um tanto negativa desta atividade junto da sociedade em geral, sobretudo nas últimas décadas, deve-se, sobretudo aos impactos que ela pode causar ao meio ambiente. A Figura 3.1 ilustra uma mineração a céu aberto.



Figura 3.1: Mineração com Lavra a Céu Aberto (Kahang e Kahango, 2009)

3.2 REJEITOS E LAMAS

Rejeito de mineração é todo o material sem valor econômico resultante de processo de concentração de um minério. O tamanho das partículas de rejeito se encontra tipicamente na faixa de partículas de areias finas. As características químicas dos rejeitos variam de acordo com os tipos de minérios e o processo de beneficiamento empregado (Lozano, 2006).

O material de granulometria mais fina, que é refratário à concentração e é descartado antes da concentração, é chamado comumente de lama.

Os rejeitos possuem usualmente alta permeabilidade e resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade. As lamas, por outro lado, possuem normalmente alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade.

3.2.1 Disposição de Rejeitos

A disposição dos rejeitos tem se tornado um grande problema ambiental na atividade de mineração em função do aproveitamento crescente de jazidas de baixos teores, tendo como consequência o aumento do volume de rejeitos gerados e as exigências de áreas cada vez maiores para sua deposição. Convém ressaltar, que fora o impacto visual na paisagem, com a destinação dos resíduos gerados pela mineração, o principal efeito ecológico pode envolver a poluição das águas (Araujo, 2005).

Os métodos de disposição de rejeitos, como as barragens, foram desenvolvidos a partir de entraves ambientais e mudanças nas práticas de mineração. Nas fases mais iniciais da mineração alguns métodos de descartes de rejeitos incluíam a descarga direta nos rios e córregos, e nos cursos de água ou despejos aleatórios do material diretamente na superfície (Araujo, 2005).

Com o aumento do controle ambiental e a pressão da opinião pública torna-se necessário a elaboração de um projeto de disposição de rejeito designado não apenas para o estágio de operação de mina, mas também para seu abandono. Assim, um sistema de disposição de rejeito deve satisfazer aos requisitos de segurança, controle de contaminação, capacidade de armazenamento e economia (Amorim, 2007).

A elaboração de projetos, operação e manutenção das barragens de rejeitos existentes têm possibilitado o desenvolvimento de soluções para a disposição dos resíduos minerais. Ressalta-se que é economicamente vantajoso situar o armazenamento do rejeito perto da mina, entretanto, esta imposição fica limitada à seleção de locais nas proximidades. A área subjacente á barragem deve ter resistência estrutural e suportar o seu peso próprio (Amorim, 2007).

O descarte dos rejeitos gerados na unidade de beneficiamento das empresas mineradoras pode ser feito na forma sólida (pasta ou granel) ou de polpa.

Nos sistemas de disposição de rejeitos convencionais por meio de barragens, os rejeitos são produzidos na forma de polpa, cujo meio de transporte mais viável e econômico é por via hidráulica. A Figura 3.2 ilustra barragem de rejeito convencional.



Figura 3.2: Barragem de Rejeito Convencional (Pimenta de Ávila, 2008)

A disposição de um rejeito em pasta ou sólido pode ser realizada por um sistema de canhões, uniformemente espaçados, que lançam os rejeitos ao longo da barragem, sem a necessidade de relocar frequentemente o canhão ou desconectar partes da tubulação. A Figura 3.3 ilustra uma disposição de rejeito em consistência de pasta mineral.



Figura 3.3: Barragem de Rejeito Espessado (Pimenta de Ávila, 2008)

O lançamento também pode ser feito por um único canhão, entretanto, esta solução apresenta alguns inconvenientes em virtude da necessidade de deslocamentos ao longo da barragem.

No Brasil, na maioria dos casos, o processo de descarte dos rejeitos se dá na forma líquida, sob a forma de polpa.

3.2.2 Desaguamento de Rejeitos

A polpa contendo rejeitos passa por alguns processos antes de ser encaminhada para o descarte. Nesses processos se recupera água, e se separa parcelas de rejeito com diferentes granulometrias, em função dos métodos de disposição. Esses processos são o espessamento (deslamagem), filtragem e ciclonagem.

3.3 ESPESSAMENTO

É uma operação que tem como objetivo a separação das fases líquida e sólida da polpa, reduzindo o volume de água e aumentando seu teor de matéria sólida. Neste caso, a sedimentação do sólido ocorre pela ação da gravidade, obtendo-se polpa com maior porcentagem de sólidos permitindo a recuperação de água.

A larga utilização industrial dos sedimentadores promove um crescente interesse no conhecimento do dimensionamento e operação desses equipamentos, com a finalidade de melhorar a sua utilização e eficiência no atendimento aos objetivos operacionais.

Na literatura o termo espessador é empregado normalmente quando o produto de interesse é o sólido e clarificador quando o produto de interesse é o líquido.

No beneficiamento mineral, os espessadores são os mais utilizados e operam, geralmente, em regime contínuo. Em linhas gerais, esses espessadores são constituídos por: um tanque; um dispositivo de alimentação da polpa com mínima turbulência; e um mecanismo de retirada do sólido sedimentado. Além disso, para aumentar a eficiência do espessamento (a velocidade da decantação), são utilizados reagentes denominados floculantes cuja principal função é a de agregar as partículas sólidas em suspensão formando flocos que decantam rapidamente.

Esta operação é realizada com as seguintes finalidades: obtenção de polpas de concentrados adequadas a uma determinada operação subsequente, espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando transporte e descarte mais eficazes; recuperação de água para reciclo industrial e recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizados em processos hidrometalúrgicos.

3.3.1 Sedimentação

A sedimentação é baseada em fenômenos de transporte, onde a partícula sólida em suspensão está sujeita à ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento.

Ensaio de sedimentação descontínua, realizados em proveta, podem auxiliar no dimensionamento de equipamentos contínuos. O teste de proveta é baseado no deslocamento da interface superior da suspensão com o tempo. Durante esse teste pode ser observada, após um tempo, a existência de cinco regiões distintas:

- A região de líquido clarificado (Identificada na Figura 3.4 pela letra “A” – Líquido Límpido) → no caso de suspensões que decantam muito rápido esta camada pode ficar turva durante certo tempo por causa das partículas finas que permanecem na suspensão;

- A região de suspensão com a mesma concentração inicial (Identificada na Figura 3.4 pela letra “B” – Concentração Uniforme) → a linha que divide as regiões iniciais onde e que é geralmente nítida;
- A região de zona de transição (Identificada na Figura 3.4 pela letra “C” – Transição) → a concentração da suspensão aumenta gradativamente de cima para baixo nesta zona, variando entre o valor inicial até a concentração da suspensão espessada;
- A região de suspensão espessada na zona de compressão (Identificada na Figura 3.4 pela letra “D” – Zona de Dimensões e Concentração Variáveis) → é a suspensão onde os sólidos decantados sob a forma de flocos se encontram dispostos uns sobre os outros, sem atingirem a máxima compactação, uma vez que ainda existe líquido entre os flocos. A espessura desta zona vai aumentando durante a operação;
- A Região de sólido grosseiro (Identificada na Figura 3.4 pela letra “E” – Sólidos Grossos) → foram sólidos que decantaram logo no início do ensaio. A espessura desta zona praticamente não varia durante o ensaio.

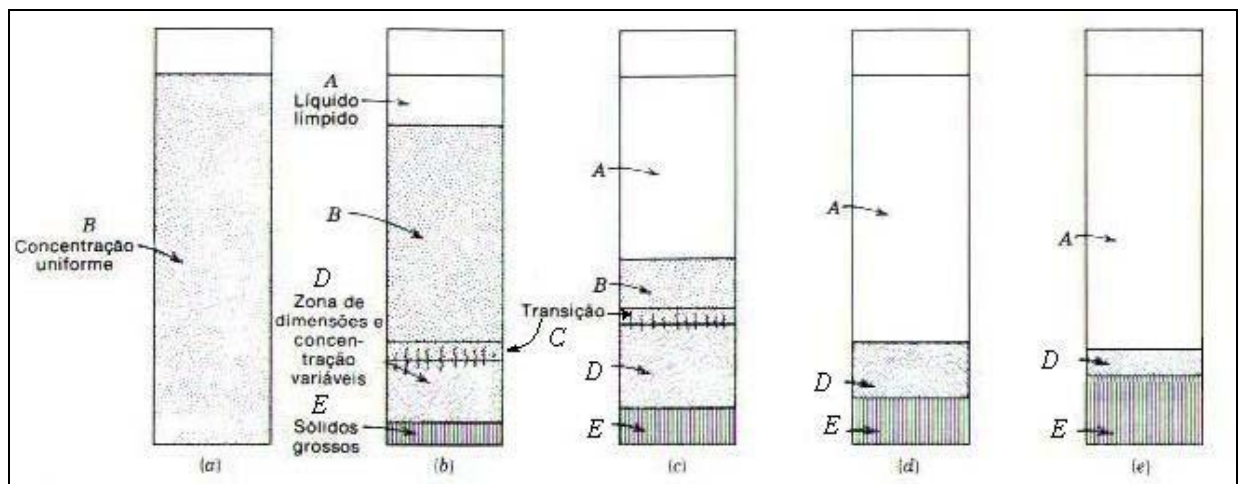


Figura 3.4: Teste de Proveta - Evolução da Decantação com o Tempo (Faust, 1982)

3.3.2 Fatores que Afetam o Espessamento

A eficiência de um espessador é encontrada pela razão de seu espessamento expressos pela unidade de sólidos espessados por área ao dia e pela qualidade dos produtos obtidos, isto é, pela quantidade de sólidos prestes no overflow e no underflow.

A sedimentação de uma suspensão aquosa de partículas ou flocos pode sofrer a influência de fatores tais como: a natureza das partículas, distribuição de tamanhos, forma, densidade específica, propriedades químicas e mineralógicas; a quantidade de sólidos na suspensão; pré-tratamento da suspensão, para auxiliar na sedimentação; dimensões do tanque de sedimentação.

3.3.2.1 Natureza das Partículas

Partículas esféricas ou com forma aproximada à esférica têm uma maior facilidade de sedimentar do que partículas de mesma massa com formato irregular. Comportamento semelhante é observado na sedimentação de partículas de maior diâmetro, diante das muito finas.

Uma alternativa para fazer face às irregularidade e ao pequeno diâmetro de partículas é a floculação, que promove a agregação das partículas resultando em unidades maiores e com forma mais aproximada da esférica, implementando melhorias às características de sedimentação da suspensão.

3.3.2.2 Efeito de Concentração

Suspensões muito concentradas apresentam características de sedimentação bem diferentes das observadas na sedimentação de uma partícula isolada, devido ao efeito da concentração.

Esse efeito origina o fenômeno da sedimentação impedida, fazendo com que a taxa de sedimentação deixe de ser constante para se tornar decrescente.

3.3.2.3 Pré-Tratamento

Suspensões floculadas apresentam diversas características diferentes da suspensão de partículas, uma delas é a taxa de sedimentação consideravelmente maior do que a da suspensão original, devido ao maior tamanho do floculado que acaba tendo uma grande quantidade de água nos seus interstícios.

Características como forma e densidade são muito pouco relacionadas com as características das partículas originais. Para a previsão de novas taxas de sedimentação, o que é extremamente complexo, faz-se necessário o conhecimento de um novo fator de

forma e valor de densidade, que ainda são determinados por métodos empíricos. A grande dificuldade na determinação destas variáveis é a sua dependência não apenas com o tipo de floculante utilizado, mas também com as condições físico-químicas sob as quais ocorreu a floculação.

3.3.2.4 Tanque de Sedimentação

A geometria e as dimensões do tanque têm influência no processo de sedimentação; a existência de paredes ou obstáculos no trajeto da partícula promove a redução da taxa de sedimentação. A altura de suspensão no tanque não altera a taxa de sedimentação nem a concentração de sólidos na lama ao final do teste, porém se a concentração de sólidos é muito alta, é importante que o tanque seja alto o suficiente para que o processo de sedimentação aconteça livremente, sem que as partículas sejam indevidamente desaceleradas devido ao fundo do tanque.

3.3.3 Tipos de Espessadores

A capacidade de uma unidade de espessamento é diretamente proporcional à sua área e é usualmente determinada em função da taxa de sedimentação dos sólidos na suspensão, que independe da altura de líquido.

A polpa, na sedimentação, passa através de zonas de concentração de sólidos variável entre a da alimentação e da descarga final; conseqüentemente, nas zonas intermediárias existentes entre esses limites de concentração, cada partícula encontrará diferentes taxas de sedimentação e a zona que exibir a menor taxa de sedimentação será a responsável pelo dimensionamento da unidade.

A capacidade de uma unidade contínua de espessamento está baseada na sua habilidade em processar suspensões, tanto na função de espessador quanto de clarificador.

A área da unidade controla o tempo necessário para que ocorra a sedimentação dos sólidos através do líquido, a uma dada taxa de alimentação do mesmo e é importante na determinação da capacidade de clarificação do equipamento.

A altura da unidade controla o tempo necessário para o espessamento da polpa para uma dada taxa de alimentação dos sólidos e é importante na determinação da capacidade de espessamento da unidade.

No projeto das unidades de espessamento, a relação entre altura e diâmetro é importante apenas para avaliar se o volume do tanque proporcionará um tempo de sedimentação necessário aos objetivos do equipamento, considerando fatores como eficiência operacional e projeto mecânico.

Os tipos de espessadores variam em função da geometria ou forma de alimentação do equipamento. Basicamente são tanques de concreto equipados com um mecanismo de raspagem, para carrear o material sedimentado até o ponto de retirada, o que corresponde ao maior custo do equipamento. Os braços raspadores são acoplados à estrutura de sustentação do tubo central de alimentação da suspensão e devem ser projetados baseados no torque aplicado ao motor. Devem também ter flexibilidade para suportar diferentes volumes e tipos de cargas impostas.

3.3.3.1 Espessador Contínuo Convencional

O espessador contínuo convencional consiste em um tanque provido de um sistema de alimentação de suspensão e outro de retirada do espessado (raspadores), dispositivos para descarga do overflow e do underflow. Esse tipo de espessador contínuo é o mais utilizado industrialmente. A primeira foto da Figura 3.5 apresenta a montagem de dois espessadores contínuos convencionais e a segunda foto apresenta um espessador em operação.



Figura 3.5: Espessador Convencional (Delkor, 2010)

3.3.3.2 Espessador de Alta Capacidade (Espessador de Pasta)

Esse tipo de espessador é semelhante ao contínuo convencional, porém com alguma modificação estrutural de projeto - seja por meio da inserção de lamelas ou modificação no posicionamento da alimentação da suspensão, entre outras que promove o aumento da capacidade do equipamento. Uma das vantagens desse equipamento, além de aumentar a capacidade, é promover um aumento na área de espessamento, sem que seja aumentando o seu diâmetro. Este fato é muito atraente industrialmente, especialmente no que diz respeito ao espaço necessário para a montagem dos mesmos. A Figura 3.6 apresenta um espessador de alta capacidade.



Figura 3.6: Espessador de Pasta – Deep Cone (Delkor, 2010)

3.3.3.3 Espessador de Lamelas (Espessador de Pasta)

Essa unidade de espessamento, que também é um espessador de alta capacidade, consiste numa série de placas inclinadas (lâminas), dispostas lado a lado, formando canais.

A vantagem dessa configuração é a economia de espaço, uma vez que a capacidade de sedimentação nesses equipamentos é bem maior que no espessador convencional, pois a área efetiva de sedimentação é dada pela soma das áreas projetadas de cada lamela.

Outra vantagem da configuração lamelar está na rápida sedimentação das partículas sólidas: como o tempo de sedimentação é proporcional à altura de queda vertical, este

tempo pode ser reduzido, diminuindo-se o espaçamento entre as lamelas. Nesses espessadores, a suspensão pode ser introduzida diretamente no compartimento de alimentação ou numa câmara de mistura e floculação. Os sólidos sedimentam sobre as lamelas e deslizam até o fundo do equipamento, formando o material espessado, que é, em seguida, bombeado.

3.4 PASTA MINERAL

A pasta mineral pode ser definida como um sistema coloidal, que se apresenta como um fluido homogêneo, no qual não ocorre segregação granulométrica das partículas, e que ao ser disposto suavemente sobre superfícies estáveis, não mostra drenagem significativa de água. (Osório et al, 2008)

Sua conformação e consistência, durante sua disposição, podem ser avaliadas por meio de técnicas tais como: teste de abatimento (slump) e teste de calha (flume). Na Figura 3.7 pode-se visualizar o aspecto de pastas minerais.



Figura 3.7: Pasta Mineral (Osório et al, 2008)

No Brasil, atualmente, os rejeitos do beneficiamento são normalmente dispostos em forma de polpa em barragens (bacias). Em países como Austrália, Canadá, Estados Unidos, África do Sul, há uma tendência para a disposição de rejeitos mais adensados. Esta disposição apresenta vantagens como: maior recuperação/ recirculação de água, maiores ângulos de repouso, menores custos de investimento e de operação, menor impacto ambiental. (Osório et al, 2008)

Algumas propriedades de interesse de uma pasta mineral podem ser destacadas: características reológicas (tensão de escoamento e viscosidade); altura de abatimento (slump); ângulo de repouso; propriedades mecânicas da pasta com adição de ligante (cimento ou outro material). (Osório et all, 2008)

O estudo das propriedades reológicas das pastas minerais tem importância para a mineração do Brasil considerando-se tanto desaguamento quanto o de transporte dos produtos processados. (Osório et all, 2008)

3.5 MINERODUTO

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, que são fatores encarecedores do transporte por rodovia ou ferrovia. (AusencoPSI, 2008)

Minerodutos são sistemas de transporte de suspensões minerais por tubulação, seja por bombeamento hidráulico ou por gravidade. As suspensões minerais podem ser de concentrados, rejeitos, pastas, etc.

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. (AusencoPSI, 2008)

Em sistemas de transporte de minerais, normalmente o fluido transportador é a água, podendo-se também utilizar outro líquido. O material a ser transportado deve estar finamente moído para ser adicionada água para a formação de uma polpa. Obviamente,

este sistema 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 o desaguamento sem alteração de suas propriedades. A Figura 3.8 ilustra um mineroduto.



Figura 3.8: Mineroduto Aéreo (AusencoPSI, 2008)

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

Normalmente, a tubulação opera constantemente cheia com o fluido (na ausência de polpa, com água), sob pressão.

O regime de operação normalmente é minimamente turbulento, de modo que as partículas minerais sejam suspensas e não se depositem no fundo da tubulação, causando o mínimo de desgaste na tubulação.

A maior parte das tubulações de longa distância são enterradas e possuem sistema de proteção catódica para evitar corrosão do solo na tubulação. Se forem aéreas, estão sob suportes (dormentes).

3.5.1 Comportamento das Polpas

As polpas, quando bombeadas, apresentam comportamento bastante diferente dos líquidos. Estes líquidos permitem utilizar uma faixa bastante ampla de velocidades e a natureza do escoamento, laminar ou turbulento, pode ser caracterizadas a partir do conhecimento das propriedades físicas do líquido e das condições da tubulação. Já nas polpas, além das propriedades do líquido, há que considerar as propriedades do sólido presente e a interação entre ambos. Isto acarreta uma faixa de comportamentos particulares, cada polpa específica tendo limitação própria de velocidade e parâmetros reológicos e de escoamento. Ademais, os sólidos têm efeito abrasivo sobre as tubulações.

3.5.2 Tipos de Fluxos

Suspensões coloidais podem manter-se indefinidamente em suspensão estável. Já com as misturas sólido-líquido usuais no tratamento de minérios, isto se constitui exceção, sendo a regra 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.

Os fluxos que podem ser observados na prática são mostrados na Figura 3.9.

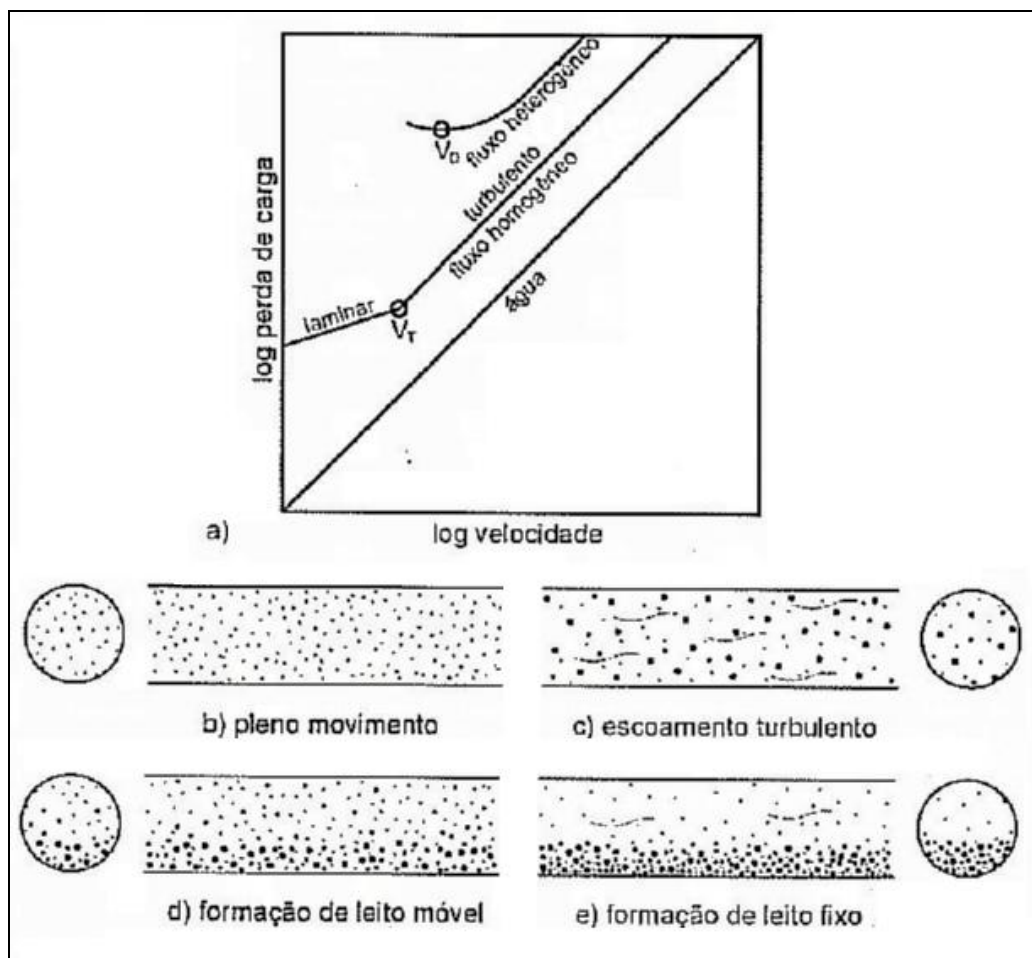


Figura 3.9: Tipos de Escoamento em Função da Velocidade e do Tipo de Polpa
(Chaves, 2002)

Fluxo homogêneo: as partículas sólidas se distribuem de maneira homogênea ao longo de toda a seção da tubulação. Normalmente, partículas menores que $106 \mu\text{m}$, ou partículas de baixa densidade, mesmo um pouco maiores, apresentam este comportamento. É o tipo de escoamento que todo projetista de minerodutos deseja, pois permite trabalhar com porcentagens de sólidos elevadas (superiores a 50% em massa) e com baixas velocidades (inferiores a $1,8 \text{ m/s}$), com reduzido consumo de energia e baixo desgaste por abrasão. Via de regra, estas polpas exibem comportamento não-newtoniano. (Chaves, 2002)

Fluxo heterogêneo: a concentração das partículas sólidas varia ao longo da seção da tubulação é maior no fundo, decrescendo lentamente em direção ao topo. Embora todas as partículas estejam em suspensão, às vezes as partículas mais pesadas descem até o fundo do tubo e rolam sobre ele, ou se movem aos saltos. Esta situação se observa com

sólidos mais grosseiros que no caso anterior, até 10 #, ou com sólidos mais finos, de alta densidade – caso típico dos concentrados de minério de ferro. Esta situação pode ser enfrentada, e o é, em condições em que as restrições do processo não permitem reduzir a granulometria do sólido a ser transportado. É, portanto uma situação freqüente em usinas de beneficiamento bombeando a pequenas e médias distâncias. (Chaves, 2002)

Fluxo com leito móvel: parte dos sólidos se 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. (Chaves, 2002)

Fluxo com leito fixo: os sólidos depositados no fundo da tubulação deixam de se movimentar. Aumentando quantidade de sólidos, a secção útil vai diminuindo progressivamente, até o entupimento da linha. (Chaves, 2002)

Polpa Homogênea: o transporte de polpa é possível mesmo a baixas velocidades, em que o regime é laminar. Ambas aumentam segundo uma determinada lei, até que seja atingido o ponto de transição para o regime turbulento. A partir deste ponto, as perdas de carga são proporcionalmente maiores. Num diagrama log-log, as duas leis são retas de inclinações diferentes. (Chaves, 2002)

Polpa Heterogênea: o transporte de polpa se é possível em regime turbulento, a partir de um valor mínimo de velocidade, capaz de manter as partículas em suspensão parcial (inicialmente há um leito fixo de partículas). Conforme aumenta a velocidade, o leito torna-se móvel, o que acarreta a diminuição da perda de carga. Aumentando mais ainda a velocidade do escoamento, o leito móvel desaparece e a perda de carga começa a aumentar. (Chaves, 2002)

Tem-se, portanto, um ponto notável em cada uma das curvas da figura 3.9:

- na curva das polpas homogêneas, o ponto de transição de um regime para o outro, correspondente a uma velocidade designada pela velocidade de transição (v_t);
- na curva das polpas heterogeneas, o ponto de mínima perda de carga - ou de formação do leito móvel — correspondente a uma velocidade designada por VD (velocidade de deposição).

Tanto o escoamento com a formação do leito móvel como com o leito fixo são indesejáveis. O leito móvel pode evoluir rapidamente para um leito fixo em decorrência de pequenas variáveis na granulometria dos sólidos, de sua densidade, ou mesmo, de flutuações da velocidade de escoamento.

A Figura 3.10 correlaciona densidades e tamanhos da partícula aos fluxos homogêneos, heterogêneo e a uma região de transição entre ambos. Veja na Figura 3.10 como a presença de partículas finas, capazes de formar uma polpa homogênea, que mantém as partículas mais grossa em suspensão (a fase homogênea tem uma determinada densidade e uma dada viscosidade), afeta o comportamento das partículas grosseiras. (Chaves, 2002)

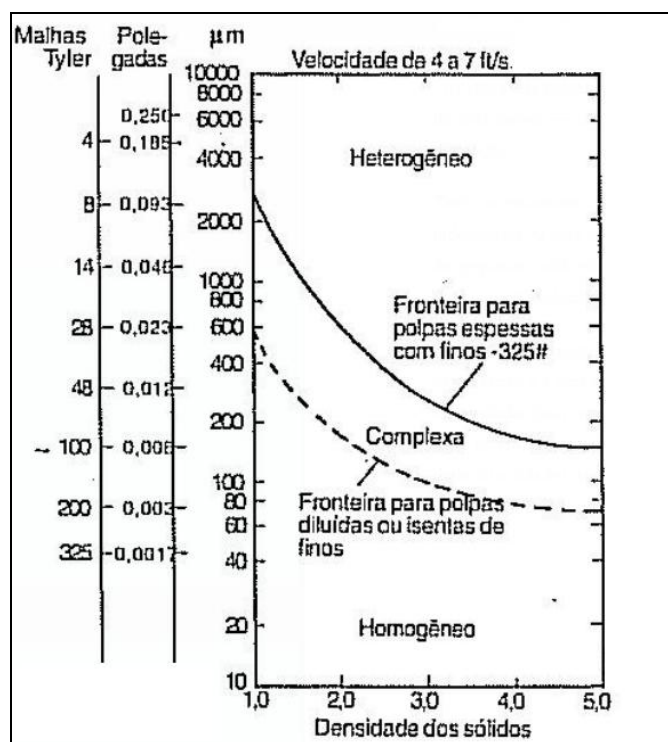


Figura 3.10: Correlação de Densidade e Tamanho de Partículas (Chaves, 2002)

3.5.3 Velocidade de Transporte

A velocidade de bombeamento de uma polpa heterogênea deve atender duas exigências diferentes e independentes:

- Deve ser suficientemente grande para produzir a turbulência necessária para manter os sólidos em suspensão.

- Deve ser a menor possível para reduzir o atrito com as paredes do tubo e conseqüentemente, reduzir a perda de carga.

Já com as polpas homogêneas, a velocidade pode ser tão baixa quanto conveniente. Velocidades acima do ponto de transição acarretam aumento proporcionalmente maior da perda de carga e por isto são indesejáveis.

Como regra geral:

- polpas homogêneas entram em suspensão em velocidades relativamente baixas, menores que 1,8 m/s . Sugere-se, portanto, para cálculos grosseiros ou preliminares usar 1,5 m/ s. (Chaves, 2002)

- para polpas heterogêneas velocidades de 4,5 m/ s são usuais em areias silicosas e minério de ferro. Em dragas, velocidades de 6 m/ s não são raras. (Chaves, 2002)

Para bombeamentos delicados do ponto de vista operacional ou econômico, a velocidade ideal deve ser determinada experimentalmente.

Note-se que, com as polpas heterogêneas, o leito forma-se em pleno regime turbulento. Esta tendência à formação do leito deve-se a características próprias dos sólidos. Esta velocidade de deposição é a velocidade crítica do escoamento. No projeto de uma linha de polpa, deve-se adotar uma velocidade igual à V_D (velocidade de deposição) somando-se à 0,3 a 0,5 m/ s. Este valor é suficientemente baixo para manter a perda de carga em níveis mínimos e suficiente para manter os sólidos em suspensão. (Chaves, 2002)

Existem fórmulas que permitem estimar com razoável aproximação os valores das velocidades críticas. Para a velocidade critica de deposição, a mais consagrada é a estabelecida por Durand:

$$V_D = FL * \sqrt{2 * g * D * \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)}, \text{ onde}$$

V_D = Velocidade crítica de deposição,

FL = Fator, função da granulometria e da diluição da polpa,

g = aceleração da gravidade, 9,8 m/s,

D = Diâmetro da tubulação,

ρ_S = Massa específica dos sólidos,

ρ_l = Massa específica do líquido de transporte.

3.5.4 Reologia das Polpas

A maioria dos líquidos mais comuns apresenta um comportamento do tipo denominado "newtoniano". Tais fluidos podem ser caracterizados por uma propriedade, a viscosidade, definida como a razão entre a tensão de cisalhamento na parede e o gradiente de velocidades, que se desenvolve no reômetro. (Chaves, 2002)

As polpas apresentam um comportamento mais complexo, sendo denominadas fluidos "não newtonianos" exigindo outros parâmetros além da viscosidade para caracterizar o seu comportamento. A Figura 3.11 mostra um diagrama tensão de cisalhamento em função do 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)

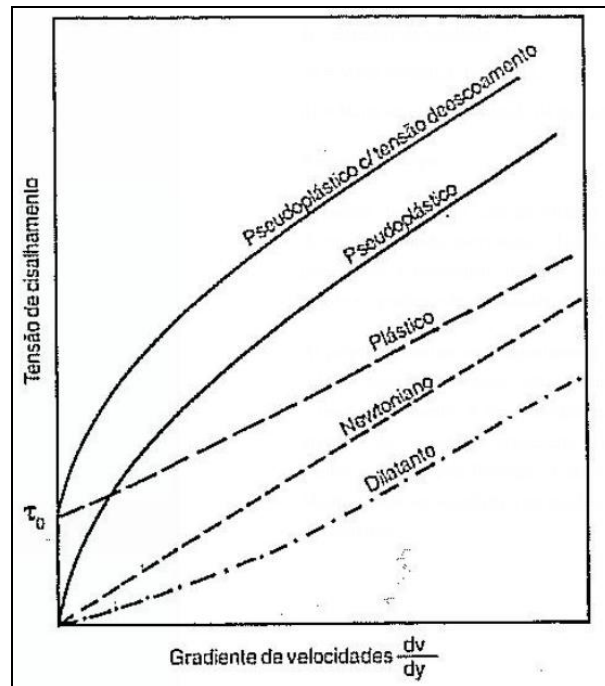


Figura 3.11: Modelos Reológicos de Polpa (Chaves, 2002)

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. Na Figura 3.12, o valor inicial ou tensão de escoamento (ou ainda, tensão de penetração limite) representa o esforço mínimo que deve ser fornecido para iniciar o deslocamento do fluido. O valor da inclinação da reta (correspondente: à viscosidade) é chamado de módulo de rigidez.

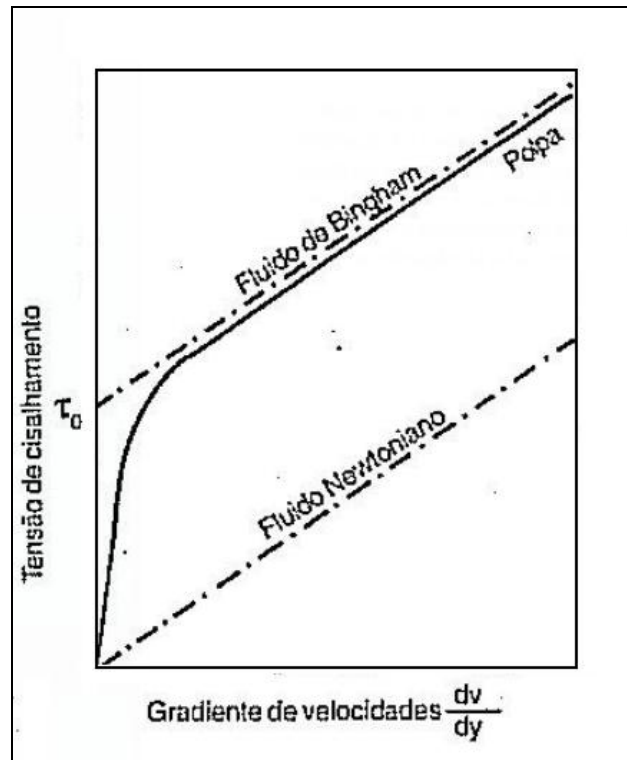


Figura 3.12: Fluxo Newtoniano e de Bingham (Chaves, 2002)

4 METODOLOGIA

Seguem relacionados o histórico de identificação das amostras recebidas e o roteiro de testes aos quais elas foram submetidas.

4.1 HISTÓRICO DAS AMOSTRAS

Os ensaios laboratoriais foram realizados em três amostras distintas: uma amostra de pellet feed, uma de sínter feed e uma amostra de água.

A Tabela 4-1 mostra um resumo das amostras recebidas.

Tabela 4-1: Identificação das Amostras em Análise

Identificação de Origem	Data de Chegada	Identificação
Pellet Feed	08/06/2010	AdoB352
Sínter Feed	08/06/2010	AdoB353
Água de Processo	08/06/2010	AdoB354

4.2 ROTA DE TESTES

As Amostras foram trabalhadas seguindo as seguintes etapas:

4.2.1 Amostra AdoB352

- Quarteamento da amostra, gerando vários lotes;
- Determinação da massa específica utilizando o método de Le Chatelier;
- Determinação da distribuição granulométrica das partículas através de peneiramento a úmido e a seco, utilizando série ASTM, ISO 3310/1;
- Análises granulométricas da fração abaixo de 38 μm , por difração a laser utilizando o aparelho Cilas modelo 1064L;
- Testes reológicos em diferentes percentagens de sólidos, utilizando viscosímetro Haake VT 550;

- Testes de slump, em diferentes percentagens de sólidos, utilizando um tubo de PVC com diâmetro e altura de 99 mm e 98 mm, respectivamente;
- Testes de Vane, em diferentes percentagens de sólidos;
- Testes de sedimentação, penetração e ângulo de repouso (15%).

4.2.2 Amostra AdoB353

- Quarteamento da amostra AdoB353, gerando vários lotes;
- Determinação da massa específica utilizando o método de Le Chatelier;
- Determinação da distribuição granulométrica das partículas através de peneiramento a úmido e a seco, utilizando série ASTM, ISO 3310/1.

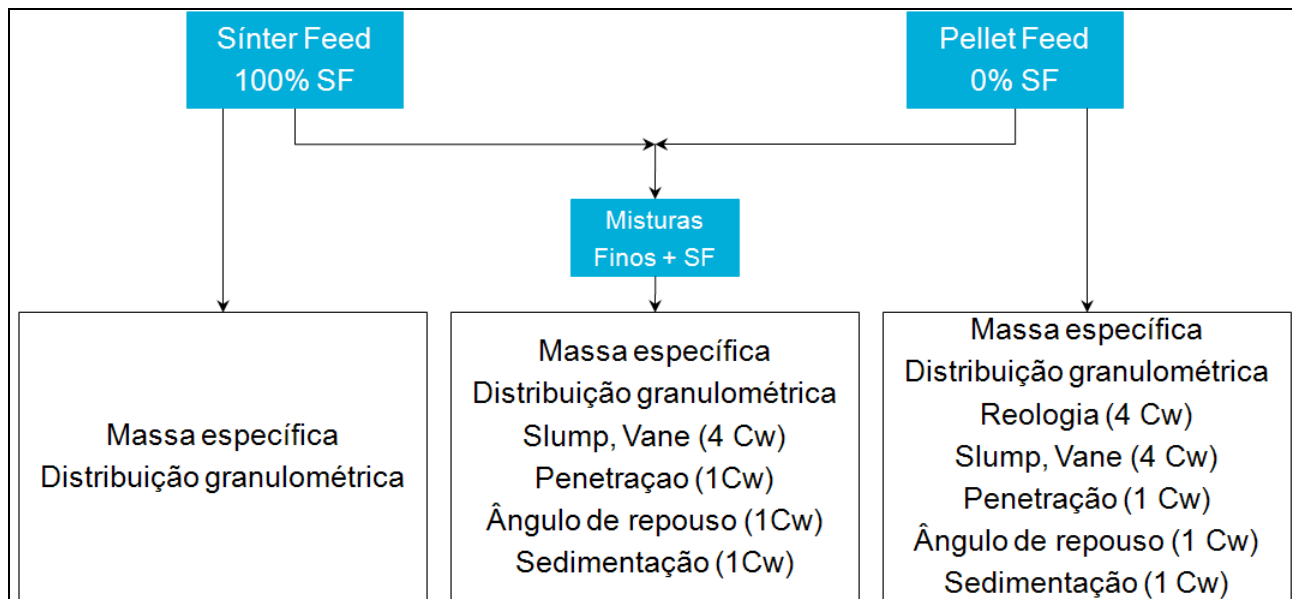
4.2.3 Misturas entre as amostras AdoB352 e AdoB353

- Misturas de materiais entre a amostra AdoB352 e AdoB353 nas proporções de 5, 10 e 20% de AdoB353;
- Determinação da massa específica utilizando o método de Le Chatelier;
- Determinação da distribuição granulométrica das partículas através de peneiramento a úmido e a seco, utilizando série ASTM, ISO 3310/1.
- Testes de slump, em diferentes percentagens de sólidos, utilizando um tubo de PVC com diâmetro e altura de 99 mm e 98 mm, respectivamente;
- Testes de Vane, em diferentes percentagens de sólidos;
- Testes de sedimentação, penetração e ângulo de repouso (15%).

4.2.4 Amostra AdoB354

- A amostra AdoB354 foi utilizada apenas para os ajustes de concentração requeridos para os testes das amostras AdoB352, AdoB353 e de suas misturas.

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma esquemático dos ensaios realizados nas amostras AdoB352, AdoB353 e suas misturas.



O termo Cw:refere-se à concetração em peso

Figura 4.1: Fluxograma de Testes de Laboratório Realizados

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes obtidos em laboratório de polpa.

5.1 DENSIDADE DE SÓLIDOS

Os valores de densidade de sólidos obtidos em laboratório foram:

- 5,18 g/cm³ para a amostra AdoB352;
- 4,67 g/cm³ para a amostra AdoB353.

As diferentes misturas de finos com sínter feed também tiveram a sua densidade medida e os valores obtidos para cada mistura estão descritos na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Densidade de Sólidos das Misturas das Amostras AdoB352 e AdoB353

Mistura	Proporção de Sínter	SG Sólidos
1	5%	5,15
2	10%	5,13
3	20%	5,08

5.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A Figura 5.1 apresenta as curvas de distribuição granulométrica das amostras AdoB352, AdoB353 e de suas misturas. Os dados obtidos podem ser analisados na Tabela AI. 1 apresentada no Anexo I.

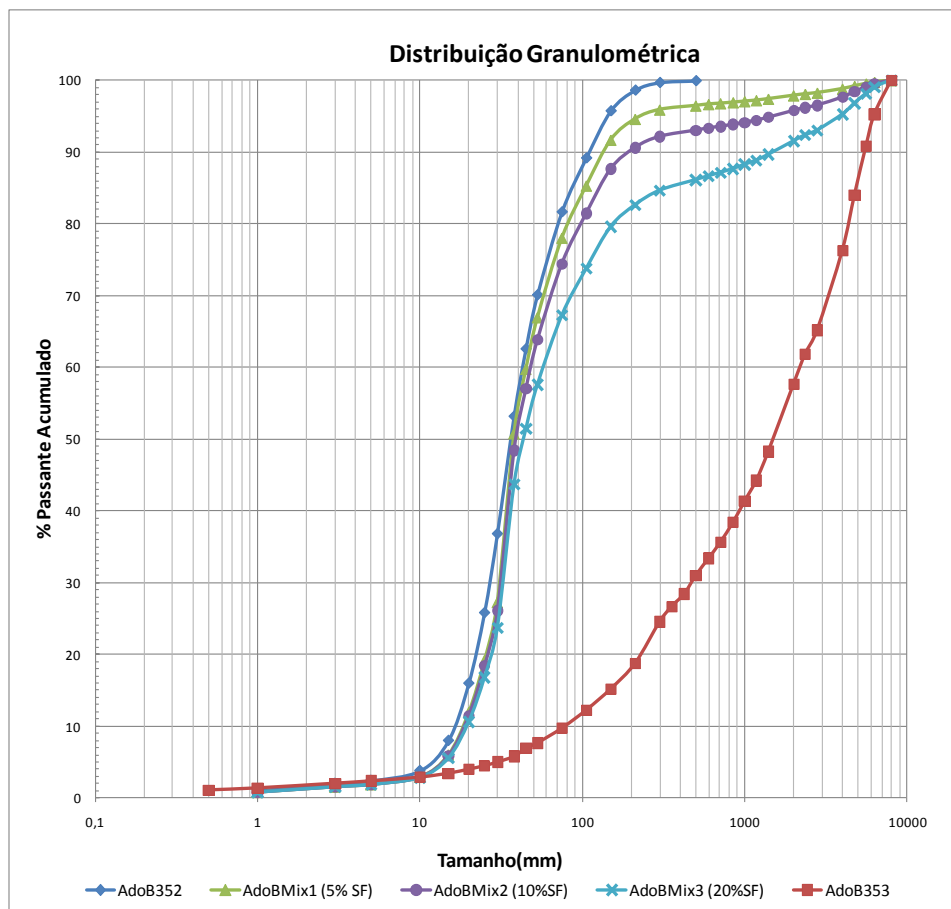


Figura 5.1: Curva de Distribuição Granulométrica das Amostras

5.3 REOLOGIA

5.3.1 Viscosímetro Rotacional

A Tabela 5-2 apresenta os resultados reológicos da amostra AdoB352 em 4 diferentes concentrações utilizando um viscosímetro rotacional.

Tabela 5-2: Resultados da Reologia com Viscosímetro Rotacional

C_w	ϕ_s	V_{r_s}	$\eta(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 25° C	η/μ	τ_y [Pa]
68,10%	0,30	0,43	10,64	11,84	4,91
70,60%	0,32	0,48	15,38	17,20	12,93
71,33%	0,33	0,50	19,28	21,65	18,88
73,53%	0,36	0,55	28,14	31,60	48,14

Onde:

- C_w = Concentração de sólido por massa.
- ϕ_s = Fração volumétrica.
- V_r = Razão volumétrica.
- τ_y = Tensão de escoamento em (Pa).
- η = Viscosidade da polpa (mPa.s)
- η/μ = Viscosidade da polpa na temperatura medida (mPa.s)

A Figura 5.2 apresenta as viscosidades reduzidas, em função da concentração de sólidos, para polpas da amostra AdoB352. Observou-se um aumento exponencial da viscosidade reduzida, com aumento da porcentagem de sólido. O modelo de Bingham se ajustou bem às leituras feitas no reômetro, conforme pode ser visto no Anexo II.

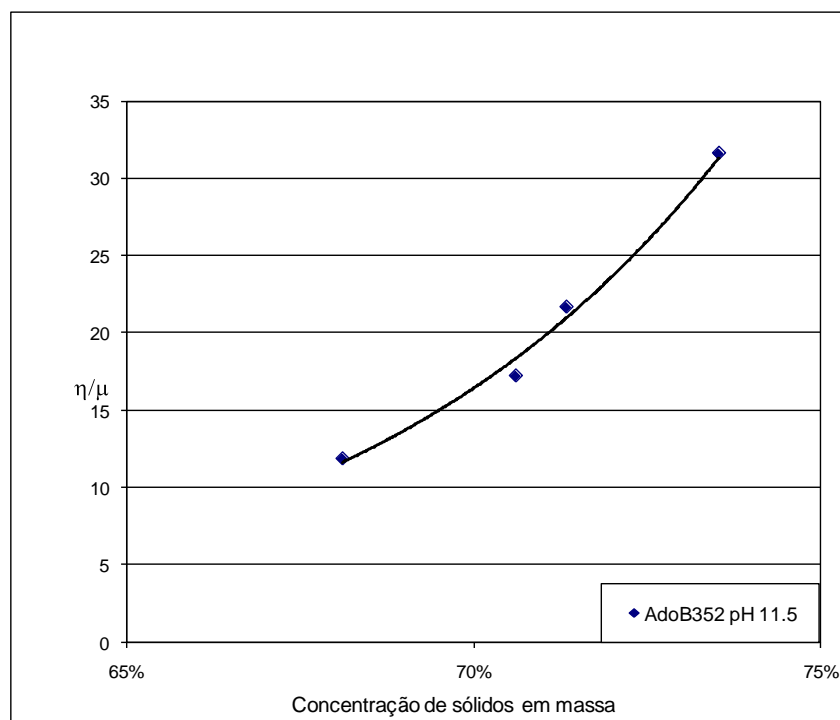


Figura 5.2: Viscosidade Reduzida em Função da Porcentagem de Sólidos para a Amostra AdoB352 em pH 11.5

5.3.2 Teste Vane

Nesse teste, considera-se que o pico do torque aplicado seja a tensão de escoamento.

Pelas Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5, é possível verificar que quanto maior a concentração de sólidos da amostra, maior a tensão de cisalhamento. Através de

comparações entre as figuras, observa-se que a tensão de cisalhamento cai com o aumento do percentual de SF nos finos. A presença do SF atua como uma diluição do veículo de transporte, que é a água contendo finos, portanto leva ao mesmo efeito que a diminuição da concentração de sólidos.

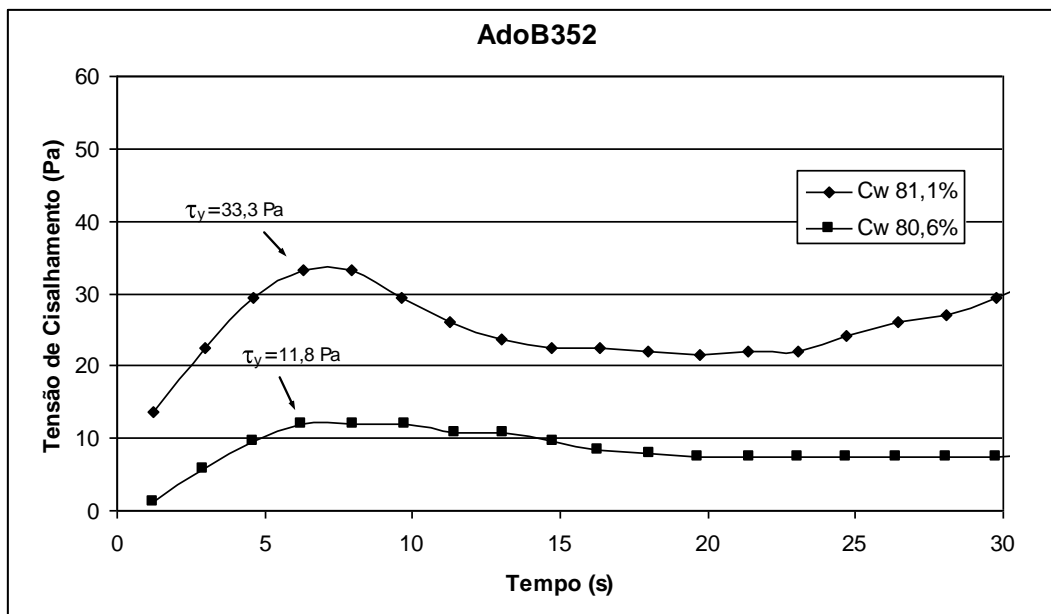


Figura 5.3: Variação da Tensão de Cisalhamento da Amostra AdoB352 com o Tempo

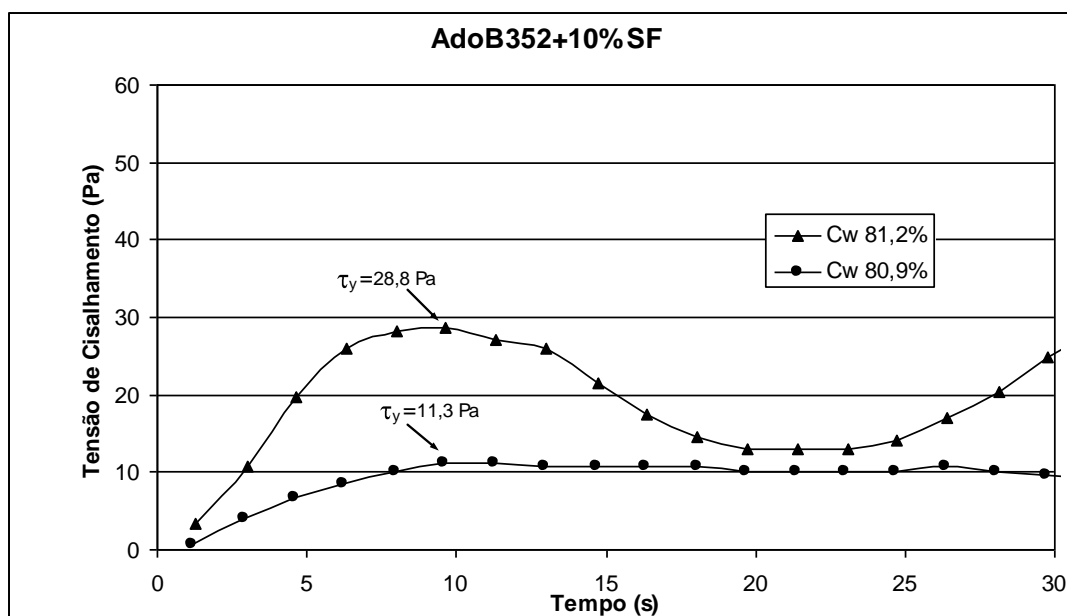


Figura 5.4: Variação da Tensão de Cisalhamento da Amostra AdoB352 - 10% SF com o Tempo

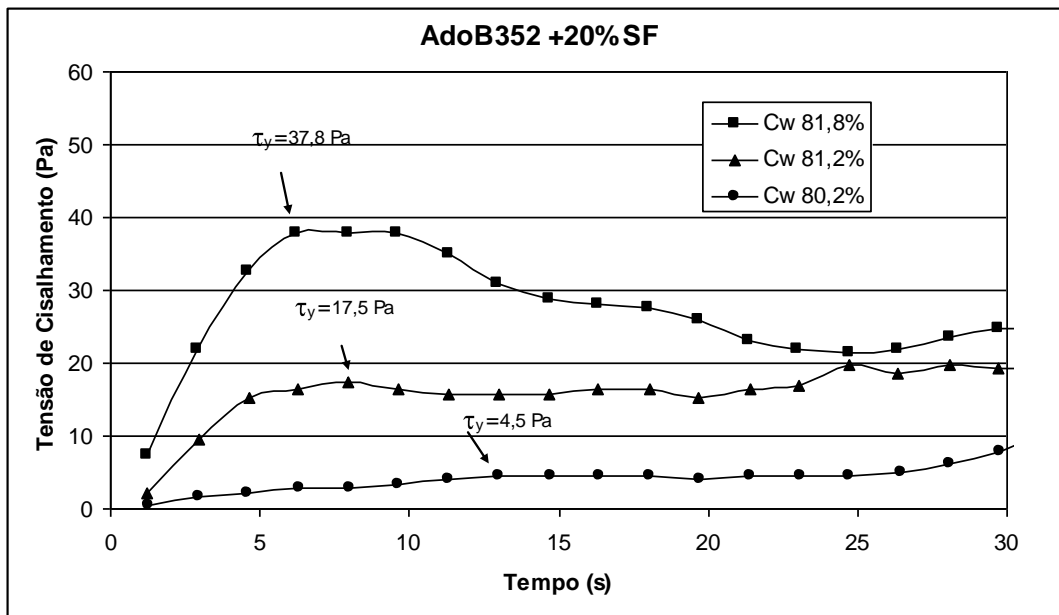


Figura 5.5: Variação da Tensão de Cisalhamento da Amostra AdoB352 - 20% SF com o Tempo

Como pode ser observado na Figura 5.6, a tensão de escoamento aumenta significativamente após certa concentração, exceto para a amostra contendo 20% de SF, que resulta em uma curva ascendente mais amena.

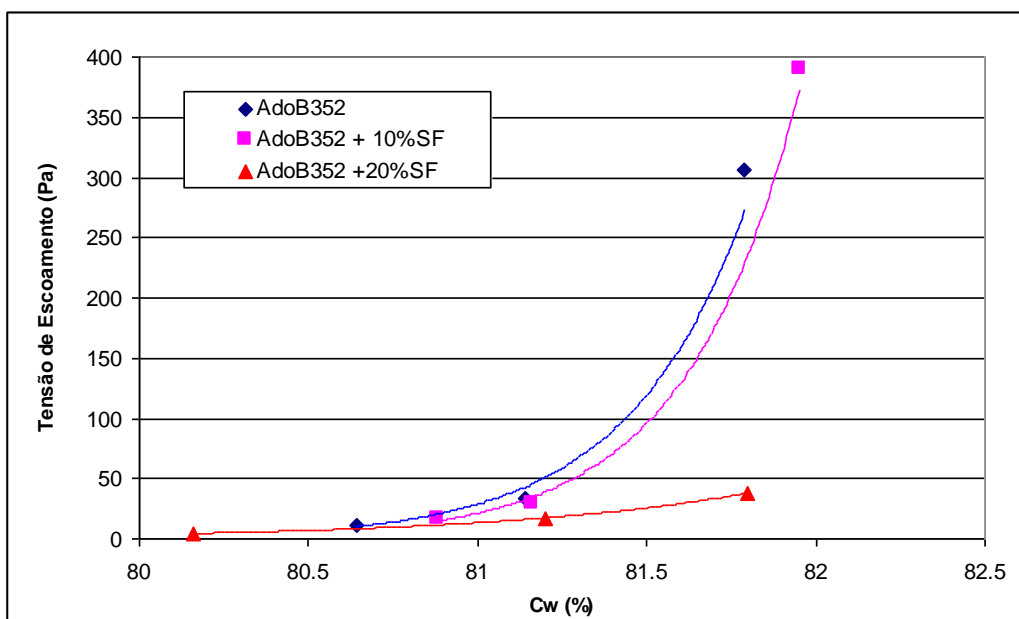















Figura 5.6: Variação da Tensão de Cisalhamento da Amostra com a Concentração

5.3.3 Teste slump

Os resultados dos testes slump ou ensaio de abatimento é um dos métodos mais utilizados para determinar a consistência da polpa e é usado em diferentes concentrações de sólidos estão apresentados na Tabela 5-3. Pode-se observar que mesmo uma pequena alteração no valor da concentração da polpa pode alterar as propriedades físicas da amostra. Também se pode observar que a presença de partículas grossas (SF) diminui a tensão de escoamento do material, pois a altura da polpa no teste foi significativamente menor quanto maior a concentração de SF na mistura.





Tabela 5-3: Teste de Slump para as Diversas Misturas

AdoB352			AdoB352 + 5%SF		
Cw	Altura (cm)	Foto	Cw	Altura (cm)	Foto
82,3	8,8		82,1	7,8	
81,8	7,8		81,6	6,4	
81,1	4,6		80,6	2,8	
80,3	2,5		-	-	-
AdoB352 + 10%SF			AdoB352 + 20%SF		
Cw	Altura (cm)	Foto	Cw	Altura (cm)	Foto
82,3	8,0		82,3	7,4	
81,9	5,5		81,8	3,7	
80,8	3,1		80,6	1,4	

5.4 TESTE DE PENETRAÇÃO

Os resultados dos testes de penetração para a amostra AdoB352 estão na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Teste de Penetração da Amostra AdoB352

Modificador de pH	Penetração (massa em g)	pH	Foto
Nenhum (Branco)	> 50	8,2	
HNO ₃	30	5,0	
Coagulante	30	8,2	
Ca(OH) ₂	20	11,5	

O sólido sedimentado da amostra AdoB352 apresentou média resistência a penetração, sendo que, a massa necessária para o penetrômetro atingir o fundo do béquer em um único movimento foi de 20 gramas para uma concentração de sólidos de 68% e pH 11,5.

Como o melhor resultado para esse teste foi em um pH de 11,5, uma faixa de pH mais elevada, a maior parte dos testes foi realizada nesse pH.

Também foram realizados ensaios de penetração na amostra AdoB352 + 20% SF, em 3 diferentes concentrações, utilizando uma massa de 30 gramas, para garantir que o penetrômetro atravessasse toda a camada de sólidos da amostra AdoB352, a um pH de 11,5. O objetivo foi determinar a existência da formação de uma camada de partículas mais grossas, no fundo do béquer, após agitação, esta camada não é penetrável.

Conforme pode ser observado na Figura 5.7, foi detectado, por meio do penetrômetro, a formação de uma camada de material grosso nas concentrações mais diluídas, 69% e 71,8% de sólidos em massa, entretanto, na concentração de 76% não foi observado esta camada, indicando que as partículas mais grossas estão dispersas na camada sedimentada.

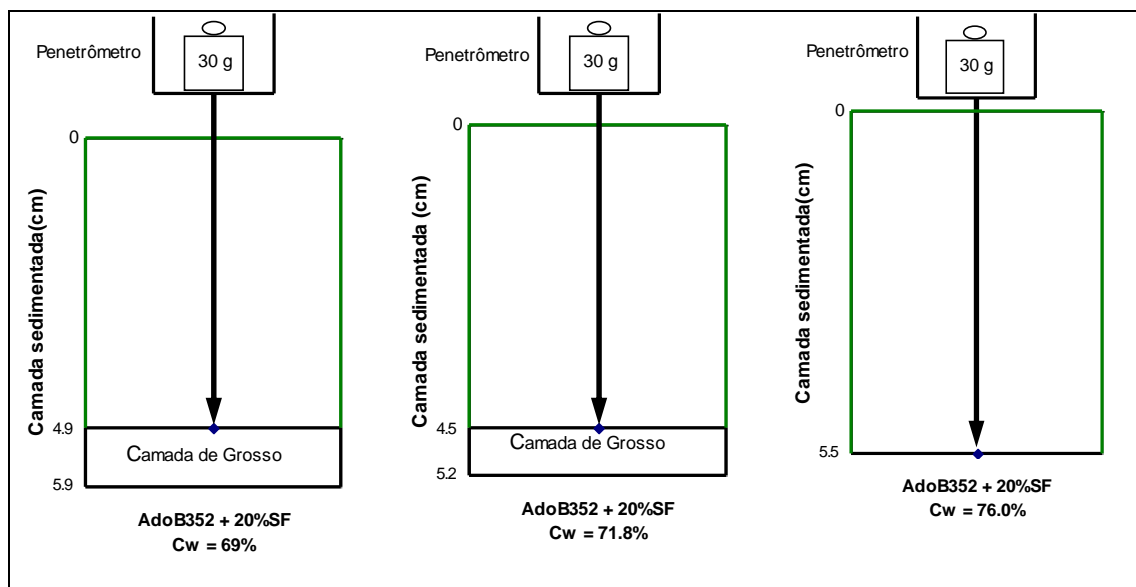


Figura 5.7: Ensaio de Penetração da Amostra AdoB352 +20 %SF, nas Concentrações de Sólidos 69%, 71,8% e 76%.

No teste de sedimentação da amostra AdoB352 + 20%SF, com 72,2% de sólidos foi observada a formação de camada de grossos no fundo da proveta, conforme pode ser observado na Figura 5.8.



Figura 5.8: Amostra AdoB352 20%SF, $C_w = 72,2\%$, Mostrando a Formação de uma Camada de Material Grosso no Fundo da Proveta após Sedimentação

5.5 ÂNGULO DE REPOUSO

O objetivo deste teste é simular, qualitativamente, o comportamento da polpa durante a parada do mineroduto. A Figura 5.9 apresenta os resultados de ângulo de repouso de 15% para a amostra AdoB352 com 70,1% de sólidos e para a amostra AdoB352+ 20% de SF com 70,2% de sólidos. Observou-se que não houve formação de plug (denominação dada à obstrução da seção do mineroduto pela sedimentação do minério durante uma parada, seja para manutenção ou em situações de emergência) nas amostras estudadas.

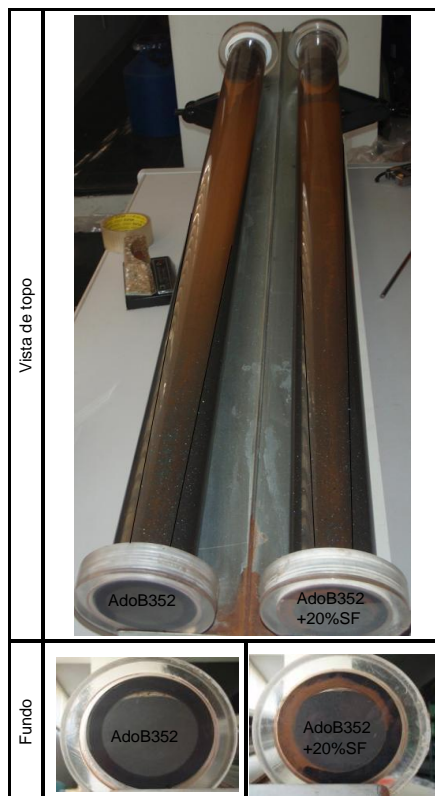


Figura 5.9: Ângulo de Repouso de 15% - Amostra AdoB352 e Amostra AdoB352+20%SF

5.6 TESTE DE SEDIMENTAÇÃO

A Tabela 5-5 mostra os resultados dos testes de sedimentação da amostra AdoB352 com 70,7% de sólidos em massa e sua mistura com 20% sínter, nas concentrações de sólidos de 72,2% e 77,0% em massa.

Tabela 5-5: Resultados dos Testes de Sedimentação

AdoB352 - 70,7%		AdoB352 20%SF - 72,2%		AdoB352 20% SF - 77,0%	
t (min)	H _{INTERFACE} (cm)	t (min)	H _{INTERFACE} (cm)	t (min)	H _{INTERFACE} (cm)
0,00	35,3	0,00	35,7	0,00	34,4
0,92	34,4	0,88	34,6	0,67	34,0
1,33	34,0	1,23	34,2	1,27	33,7
2,08	33,3	1,93	33,5	2,23	32,9
2,83	32,6	2,67	32,8	3,30	32,2
3,70	31,9	3,42	32,0	4,33	31,5
4,10	31,5	3,83	31,7	4,83	31,1
4,97	30,8	4,60	30,9	6,00	30,4
5,38	30,4	5,10	30,6	6,50	30,0
6,53	29,3	6,22	29,5	10,80	29,2
7,10	29,0	6,62	29,1	25,00	29,2
7,55	28,6	7,00	28,8	-	-
8,37	27,9	7,97	27,7	-	-
8,75	27,5	8,28	27,3	-	-
9,25	27,2	9,63	26,6	-	-
11,50	26,8	25,00	26,4	-	-
25,00	26,8	-	-	-	-

As curvas de sedimentação das polpas nas diferentes concentrações de sólidos estão mostradas nas Figura 5.10 à Figura 5.12, onde foi observada segregação da polpa.

Pode-se perceber que a velocidade de sedimentação aumentou com a adição de SF na amostra AdoB352, mesmo com concentração de sólidos mais elevada. A velocidade de sedimentação caiu ao aumentar a concentração de 72,2% para 77,0%.

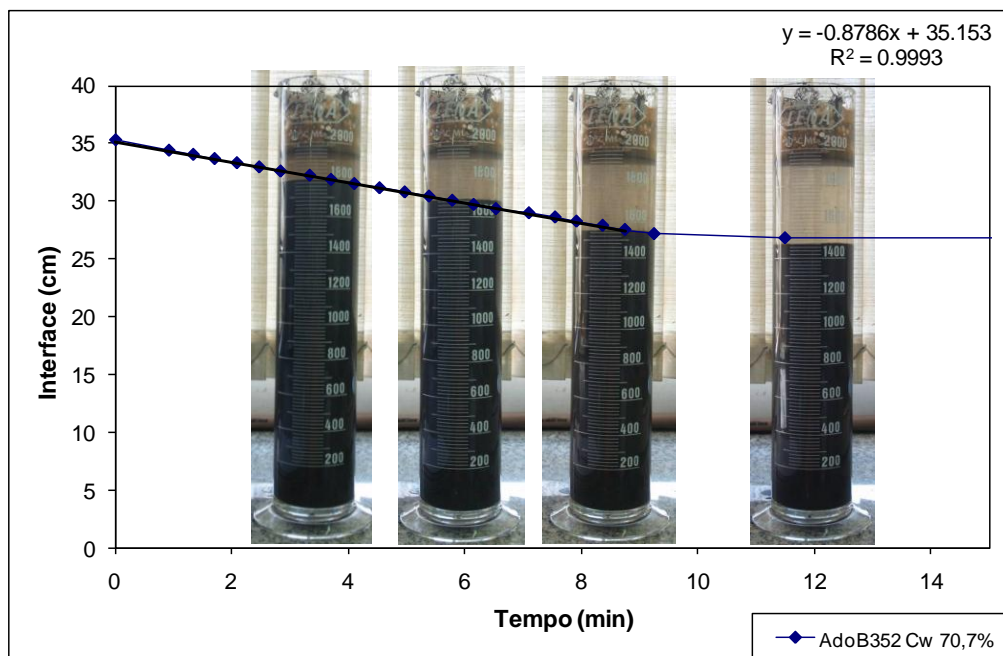


Figura 5.10: Curva de Sedimentação da Amostras AdoB352 - 70,7% de Sólidos

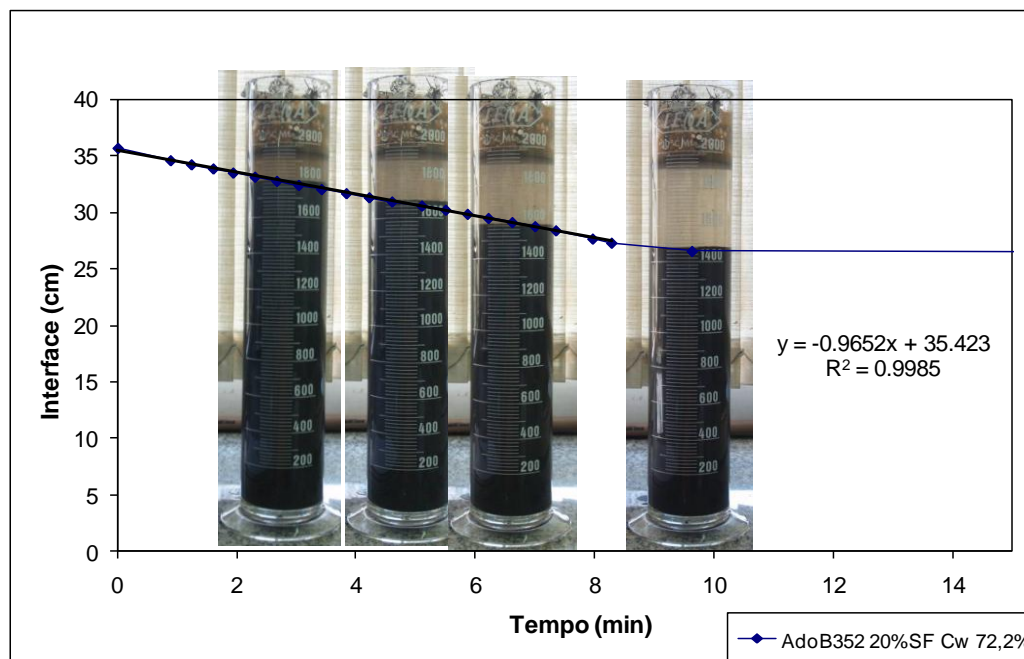


Figura 5.11: Curva de Sedimentação da Amostras AdoB352 - 20% de SF -72,2% Sólidos

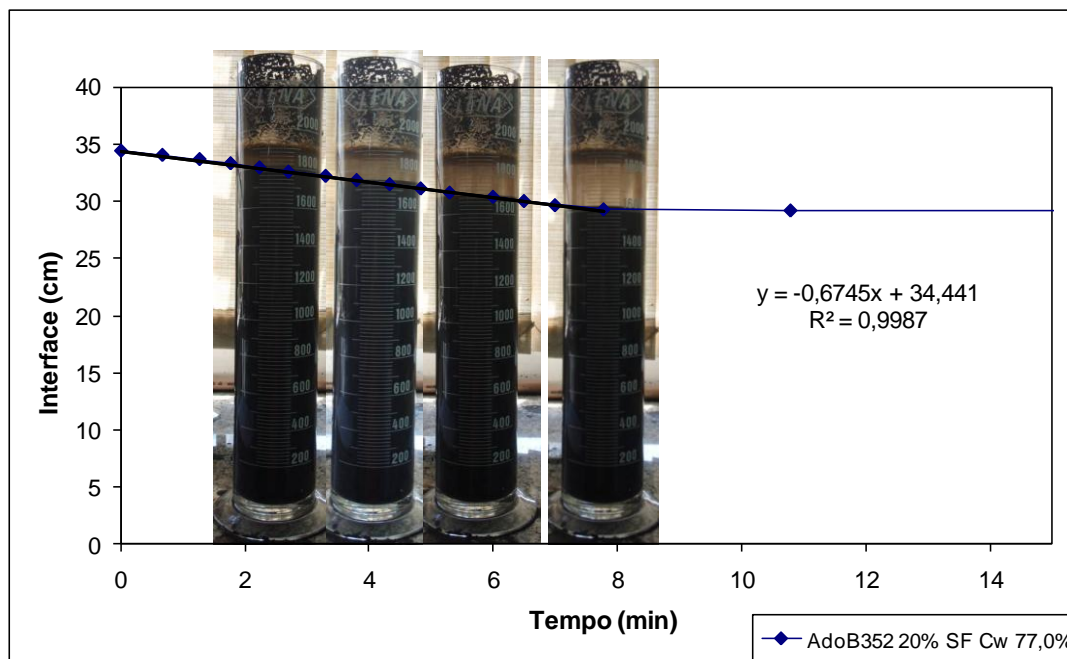


Figura 5.12: Curva de Sedimentação da Amostras AdoB352 - 20% de SF - 77% Sólidos

5.7 RESUMO DAS ANÁLISES

O programa de ensaios não foi o mesmo para todas as amostras. Isso ocorreu porque as diferentes características de cada amostra requerem diferentes ensaios para sua caracterização.

As análises realizadas fornecem resultados que podem ser divididos em características dos sólidos e características da polpa. A Tabela 5-6 apresenta um resumo dessas características para as amostras AdoB352, AdoB353 e AdoB352 contendo 20% de AdoB353.

Tabela 5-6: Resumo dos Testes Realizados

	Amostra	AdoB352	AdoB353	AdoB352 + 20% SF
Características dos Sólidos	Massa Específica	5,18	4,67	5,08
	d ₉₀ (µm)	106	5600	1400
	d ₈₅ (µm)	90	4750	300
	d ₅₀ (µm)	38	1400	45
	d ₁₀ (µm)	18	75	20
Características da Polpa	pH	11,5	11,5	11,5
	Viscosidade (mPa.s) 25° C	10,64	NA*	NA*
	Tensão de Escoamento (Pa)	81,1% - 33,3 80,6% - 11,8	NA*	81,8% - 37,8 81,2% - 17,5 80,2% - 4,5
	Velocidade de sedimentação (mm/min)	70,7% - 0,88	NA*	72,2% - 0,97 77,0% - 0,67

*NA: teste não aplicável.

A Tabela 5-7 mostra um resumo das análises dos testes realizados. Os critérios utilizados estão mostrados na Tabela 5-8.

Tabela 5-7: Resumo das Análises dos Testes Realizados

Amostra	pH	Reologia	Penetração (g)	Plug
AdoB352	8,5	Média	Alta	Média
	11,5	Média	Média	Baixa
AdoB353	11,5	Baixa	Alta	Baixa
AdoB352 + 20% SF	11,5	Média	Média*	Média

*Em concentração igual ou maior que 76% de sólidos em massa.

Tabela 5-8: Critérios Utilizados para Classificação das Amostras em 68% de Sólidos

Parâmetro	Baixa	Média	Alta
Reologia	$1,5 \leq B' \leq 2,0$	$2,0 < B' \leq 2,3$	$B' > 2,30$
Penetração	$P < 20g$	$20g \leq P < 50g$	$P \geq 50g$
Potencial de Plug	Sem Plug	Presença de uma película de sobrenadante no fundo do tubo	Plug total. Sem presença de sobrenadante no fundo do tubo

6 ANÁLISE COMPARATIVA E ESTUDO ECONÔMICO

Neste capítulo serão comparados os resultados obtidos em laboratório para a pasta mineral analisada (Capítulo 5) com os dados de algumas polpas de minério de ferro, bem como fornecidos parâmetros para o cálculo hidráulico, que será utilizado como base na análise econômica de diversos casos de transporte de concentrado de ferro, considerando-se consistência de polpa inclusive a de pasta para transporte por mineroduto.

6.1 INFORMAÇÕES GERAIS

O estudo analisou diversos cenários para minerodutos de concentrado de ferro, com diferentes combinações de rota, produção e tipo de polpa, e na análise em laboratório de polpa contendo sínter, apresentado no item anterior. Os cenários foram divididos em 4 casos diferentes, com a finalidade de realizar uma avaliação econômica.

Os casos ficaram divididos da seguinte forma:

- A. Transporte de finos (pellet feed fines – PFF) em rotas maiores que 200 km, para produções de 10, 20, 30, 40 e 50 MTA (Milhões de Toneladas por Ano em Base Seca);
- B. Cenários para o transporte de PFF em rotas menores que 100 km, para produções de 5, 10 e 50 MTA;
- C. Transporte de material até 1 mm em rotas de 5, 25 e 100 km, para produções de 5, 10 e 50 MTA;
- D. Transporte de 3 misturas entre finos e sínter (5, 10 e 20% de sínter até 9 mm) em rotas de 5, 25 e 100 km, para produções de 5, 10 e 50 MTA.

O item anterior apresentou as análises de laboratório do material em consistência de pasta, referente ao material do caso D.

Para os demais cenários foi utilizado o banco de dados da AusencoPSI, que possui vasta experiência no transporte de polpa.

Os resultados da análise econômica estão apresentados na forma de gráficos comparativos de custos para cada caso.

6.2 PARALELO ENTRE OS MATERIAIS ANALISADOS

Para o Pellet Feed Fines (PFF) e o material menor que 1 mm, não foram realizados ensaios de laboratório. Portanto, para os casos A, B e C, as distribuições granulométricas utilizadas para os estudos hidráulicos foram estimadas pela AusencoPSI de acordo com a sua experiência em projetos similares. Essa seção traça um paralelo entre essas propriedades estimadas e, também, contém alguns resultados de testes de laboratório realizados para o material do caso D. Detalhes das análises de laboratório se encontram no Capítulo 5.

6.2.1 Distribuição Granulométrica

Para o PFF e o material menor que 1 mm, as distribuições granulométricas utilizadas estão apresentadas na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Distribuição Granulométrica – PFF e Material < 1 mm

Tamanho de partícula (µm)	% Passante Acumulado PFF	Tamanho de partícula (µm)	% Passante Acumulado <1 mm
300	100	1000	100
150	99	500	95
106	98	212	80
75	97	150	70
53	95	106	55
45	92	75	45

O PFF referente à Tabela 6-1 é um material remoído, ao contrário do material que vai até 1 mm. O processo de remoagem é um requisito indispensável para o PFF, uma vez que ele geralmente é transportado por distâncias muito longas (como sugere o esquema hipotético apresentado no item 6.1, caso A: 200 a 600 km).

A distribuição granulométrica do sinter (caso D) e a dos finos que serão seu veículo de transporte foram medidas em laboratório, assim como a de todas as misturas entre eles. O resultado dessas análises é mostrado na Tabela AI. 1, no Anexo I.

Para melhor demonstrar a diferença entre as granulometrias do material tipicamente transportado por mineroduto (PFF) e o sínter feed, a Figura 6.1 é um diagrama ampliado, em escala, do tamanho das partículas.

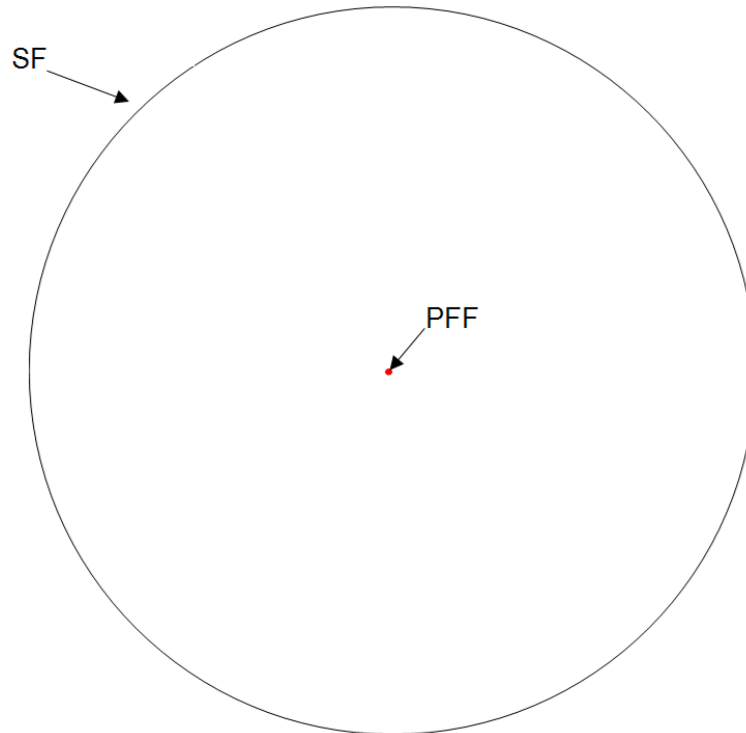


Figura 6.1: Comparação de Tamanhos de Partícula entre PFF e SF
(maior tamanho de partícula)

6.2.2 Densidade de Sólidos

Para os casos A à C, foi considerado um valor de densidade de 4,98 g/cm³.

Para o caso D, os resultados obtidos em laboratório foram:

- 4,67 g/cm³ para o material abaixo de 9 mm (sínter);
- 5,18 g/cm³ para os finos que serão misturados ao sínter.

As diferentes misturas de finos com sínter também tiveram a sua densidade medida em laboratório e os valores obtidos para cada mistura estão descritos na Tabela 5-1.

6.2.3 Reologia

Os dados de reologia estimados a partir da experiência da AusencoPSI em projetos similares para o PFF e o material abaixo de 1 mm estão apresentados na Tabela 6-2.

Tabela 6-2: Propriedades Reológicas dos Casos A, B e C

Viscosidade Exponencial	Exponencial da Tensão Escoamento	
B'	A	B
2,04	37 445	5,798

Para o caso D, uma vez que as partículas são maiores, não é possível medir a reologia usando procedimentos padrão. Por isso, outros parâmetros foram medidos.

O teste de laboratório realizado para obter os dados de tensão de escoamento foi o teste de slump. Esse teste consiste na inserção da polpa homogeneizada em um cilindro sem fundo e da retirada desse cilindro para medição da redução da altura da polpa. Os resultados estão descritos na Tabela 5-3.

Como a mistura que apresentou os melhores resultados das análises de laboratório foi a de 20% de síter e essa é a mais interessante para o estudo comparativo, dado à maior disponibilidade para transportar síter, os estudos foram focados nessa mistura.

6.2.4 Concentração de Sólidos

A concentração de sólidos utilizada em cada caso variou entre os cenários, de acordo com os requerimentos do perfil e da produção.

Os valores usados para os estudos hidráulicos estão descritos na Tabela 6-3.

A concentração escolhida para o caso D foi para transporte de pasta, uma vez que esse é o tipo de transporte recomendado para materiais mais grossos, a fim de evitar a sua sedimentação no fundo da tubulação e conseqüente degradação do tubo.

Tabela 6-3: Concentração de Sólidos

Caso	% Sólidos (m massa)
A	64-72
B	68-72
C	64-68
D	81,8

6.2.5 Velocidade Operacional Mínima de Segurança

A velocidade operacional mínima de segurança é determinada a fim de manter um comportamento pseudo-homogêneo de fluxo de forma a minimizar o desgaste da base interna da tubulação.

A velocidade mínima excede de maneira conservadora a velocidade de deposição crítica ou a velocidade de transição de fluxo laminar.

Como foram analisados diversos casos, a velocidade mínima varia de acordo com a concentração de sólidos da polpa e com o diâmetro da tubulação. A faixa de velocidade mínima aumenta do menor para o maior diâmetro.

Para o caso D, que tem a forma de pasta, a velocidade de deposição é desprezível, e o transporte é realizado em regime laminar, então não há uma velocidade operacional mínima de segurança. Como normalmente o diâmetro da tubulação é definido de acordo com a velocidade mínima; então foi definida uma faixa de velocidade de operação economicamente favorável para esse caso.

As faixas de velocidades mínimas para cada caso estão resumidas na Tabela 6-4.

Tabela 6-4: Velocidades de Operação Adotadas para Cada Caso

Caso	Faixa de velocidades
A	1,65 a 1,8 m/s
B	1,65 a 1,8 m/s
C	2,8 a 3 m/s
D	0,5 a 1,0 m/s

6.2.6 Taxa de Corrosão / Erosão

Para os casos A e B, assumiu-se uma taxa de corrosão/erosão de 0,127 mm/ano (5 milésimos de polegada por ano - mpy) nos primeiros 20 km da tubulação (pre-supondo que nesta região ainda existe a presença de oxigênio (O₂), que propicia a corrosão) e 0,102 mm/ano (4 mpy) para o restante.

Para os casos C e D, não foi considerada corrosão, pois foi considerado transporte em tubo revestido com poliuretano ou borracha, pois o material é muito abrasivo.

Para os casos de A à D, a taxa de corrosão para os cálculos da parede dos tanques foi de 0,203 mm/ano (8 mpy).

6.3 CONSIDERAÇÕES PARA O MINERODUTO

6.3.1 Materiais do Mineroduto

Tubo em aço, com classe de acordo com a máxima pressão do cenário, portanto resistência dos Tubos ao Escoamento varia de acordo com o cenário.

6.3.2 Revestimento da Tubulação da Linha Principal

Para todos os casos analisados foram considerados que os tubos são enterrados. Casos A, B e C, foram projetados com um revestimento externo de fábrica com três camadas:

uma camada interna de pintura epóxi em pó; uma camada de adesivo extrudado e a terceira camada de polietileno extrudado.

Não foi previsto revestimento interno da tubulação para o transporte do PFF, nos casos A e B. Mas foi considerado revestimento interno de poliuretano para os casos C e D.

6.3.3 Dimensionamento de Tanques

O critério utilizado para dimensionamento dos tanques foi um volume útil que equivalesse aproximadamente ao tempo de residência de 12 horas para a operação com vazão de projeto.

Para o caso D com o material transportado em forma de pasta, não é possível estocar a polpa na concentração de transporte (81,8% de sólidos em massa) em tanques, como normalmente é feito. Por isso, foram consideradas caixas de recepção pequenas em cada estação para transferência do material. Com isso, haverá uma menor flexibilidade de operação, pois a falta de tanques não fornece a folga habitual que permite a operação de segmentos do mineroduto sem depender da chegada de material

6.3.4 Faixa de pH

Para os casos A e B a faixa de pH da polpa foi considerada como sendo ente 10,0 e 11,5.

Nos casos C e D, como os tubos são revestidos, não há necessidade do pH ser tão elevado. O material poderá ser transportado no pH original da polpa.

6.3.5 Temperatura

A temperatura média da polpa considerada para projeto foi de 25°C.

6.3.6 Rota e Perfil do Mineroduto

Foram utilizados perfis típicos, porém hipotéticos. As notas foram consideradas como sendo novas, sendo necessário incluir custos de terraplenagem. Os perfis selecionados estão apresentados no Anexo III.

6.4 ANÁLISE ECOMÔMICA

O presente trabalho apresentou as propriedades das polpas de minério de ferro, oriundas do banco de dados da AusencoPSI e analisou em laboratório amostra de pasta mineral. Neste item será apresentado o estudo econômico comparativo entre transporte de polpa e de pasta através de minerodutos.

Para este estudo foram considerados os custos de implantação, chamados CAPEX, e os custos de operação, denominados OPEX.

Para estimar estes custos, além das propriedades apresentadas é necessário ter em mãos os estudos hidráulicos para ter os dados reagentes à pressão consumida, potência dissipada, o diâmetro do tubo, a espessura, etc.

O estudo hidráulico foi realizado pela AusencoPSI estudos comparativos apresentados são suficientes para atingir o objetivo deste trabalho.

6.4.1 Custo de Construção

Os custos de cada cenário foram obtidos por banco de dados de projetos similares para os principais equipamentos e tubulações e valores fatorados para as instalações e os demais itens.

Para os custos de EPCM (Engineering, Procurement, Construction, Management – Engenharia, Aquisição, Construção e Gestão) os percentuais adotados sobre o custo direto total foram:

- Engenharia (4%);
- Gerenciamento (6%);
- Custos dos proprietários (2%);
- Meio Ambiente (1,5%);
- Taxa de Lei Federal 9.985 (0,5%).

Foi adotado para contingências o percentual único de 15% sobre o custo total (direto e indireto).

As taxas cambiais de €1,00 = US\$1,45 e US\$1,00 = R\$1,80 foram consideradas

O estudo contemplou vida útil de 20 anos.

Para o custo de operação foi considerada uma tabela de custos de mão de obra e custo de energia de um projeto recentemente (novembro de 2010) desenvolvido na AusencoPSI, para a Região Sudeste.

6.4.2 Gráficos comparativos

Foram feitos dois gráficos comparativos de custos para cada caso, um para o custo de capital e outro para o custo operacional. Nos gráficos de custo de capital, foi utilizada a unidade de custo US\$/t anual, que equivale à divisão do valor total pela produção anual média, sem fator de segurança. Para o custo operacional, foi utilizada a unidade US\$/t, que é a divisão do custo operacional anual pela produção média anual, sem fator de segurança.

Os gráficos comparativos de custo obtidos por esse estudo são mostrados na Figura 6.2 a 6.9.

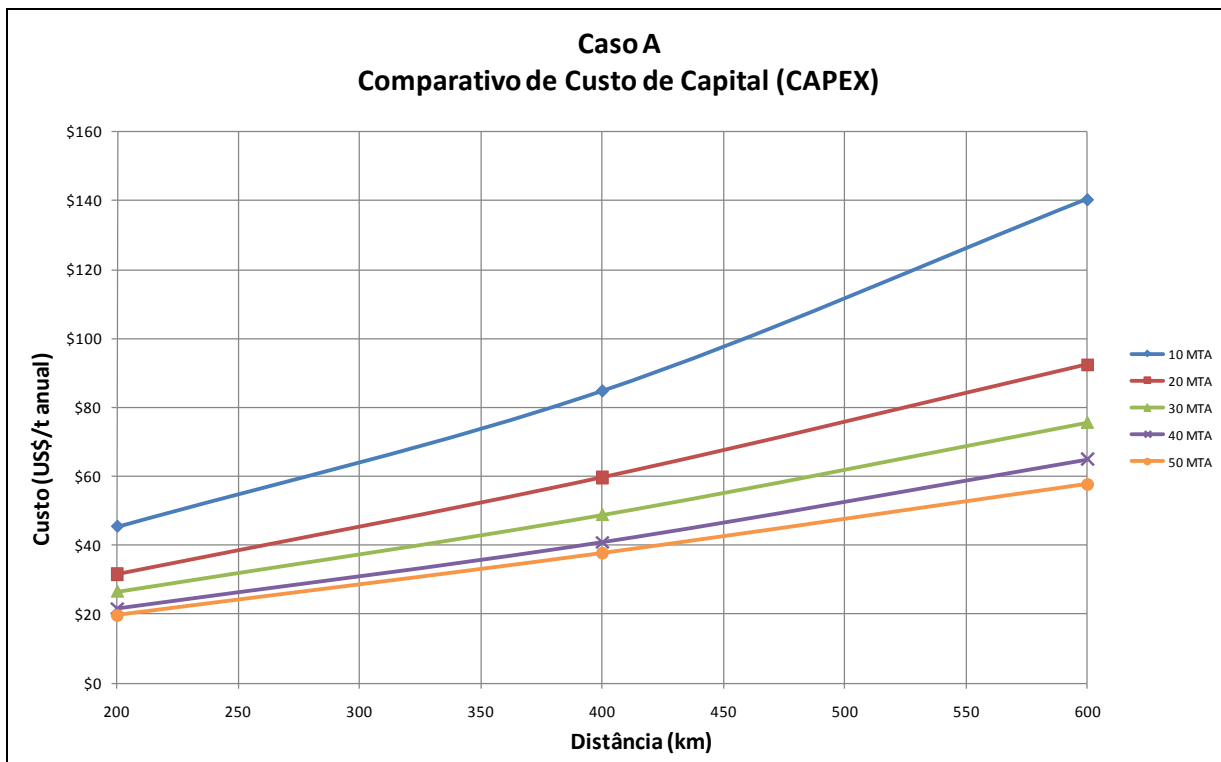


Figura 6.2: Comparativo de Custo de Capital para o Caso A

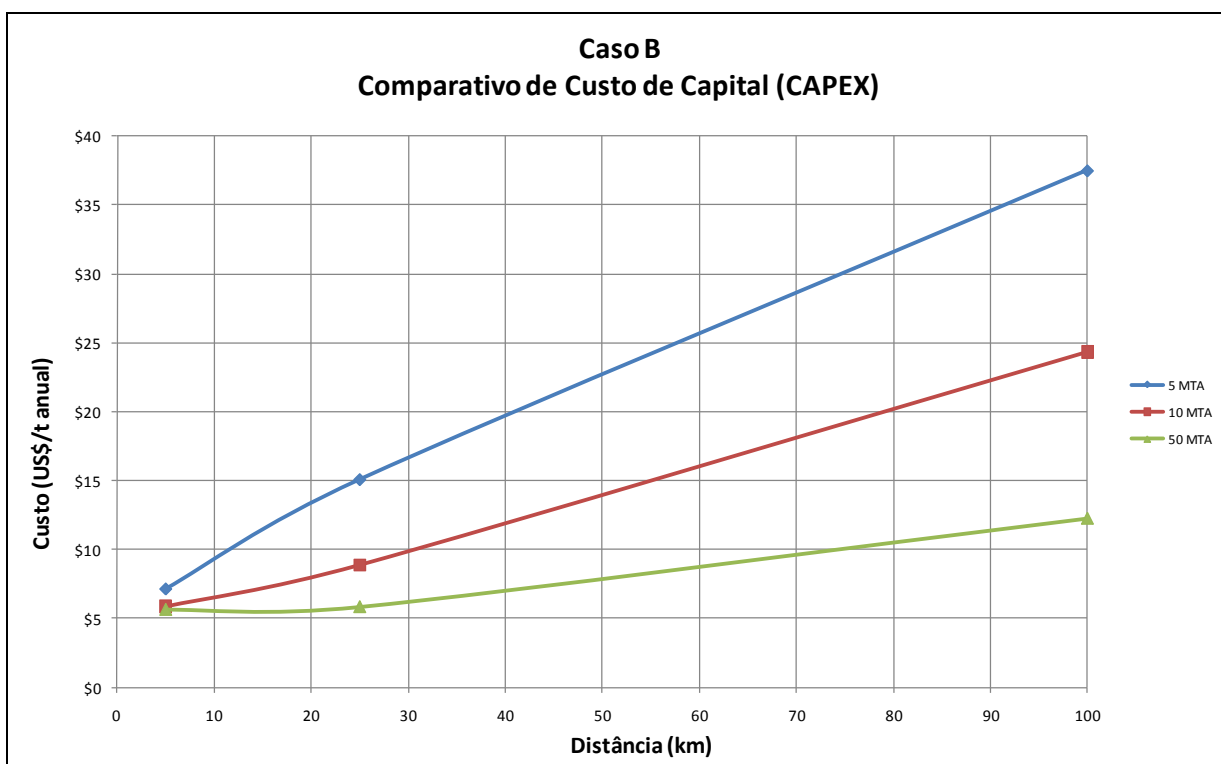


Figura 6.3: Comparativo de Custo de Capital para o Caso B

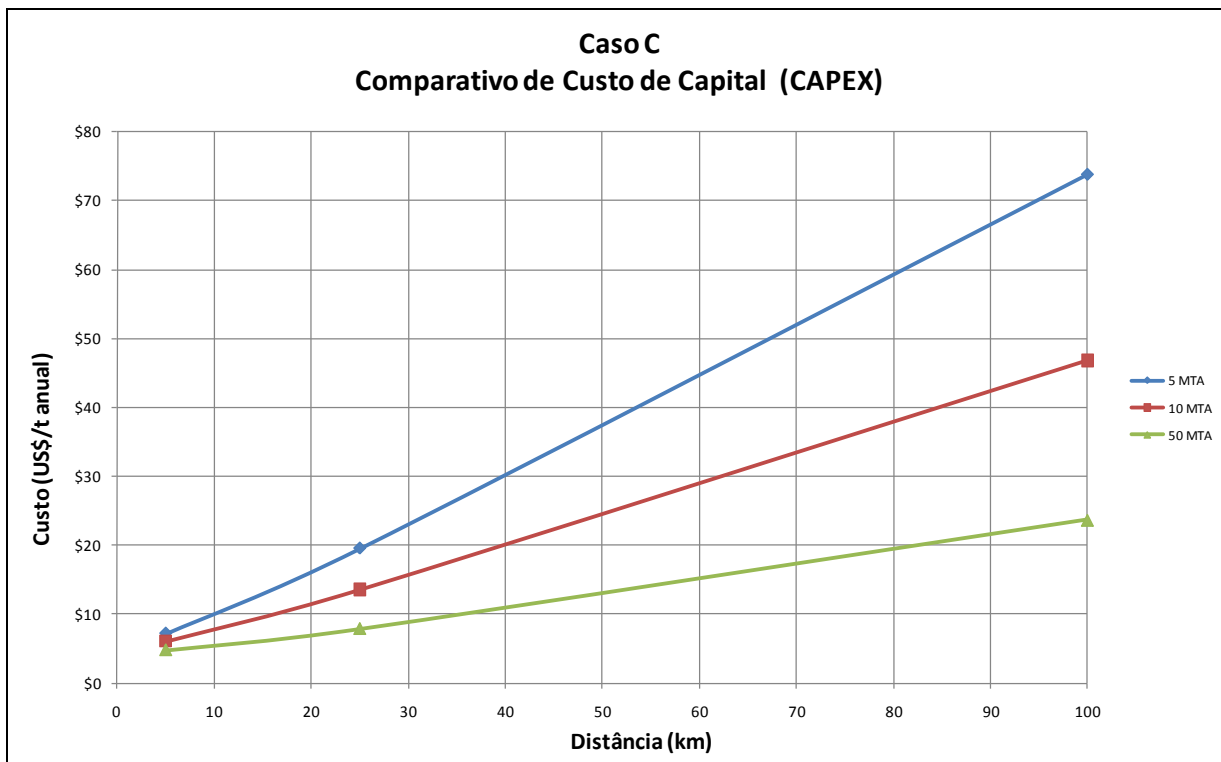


Figura 6.4: Comparativo de Custo de Capital para o Caso C

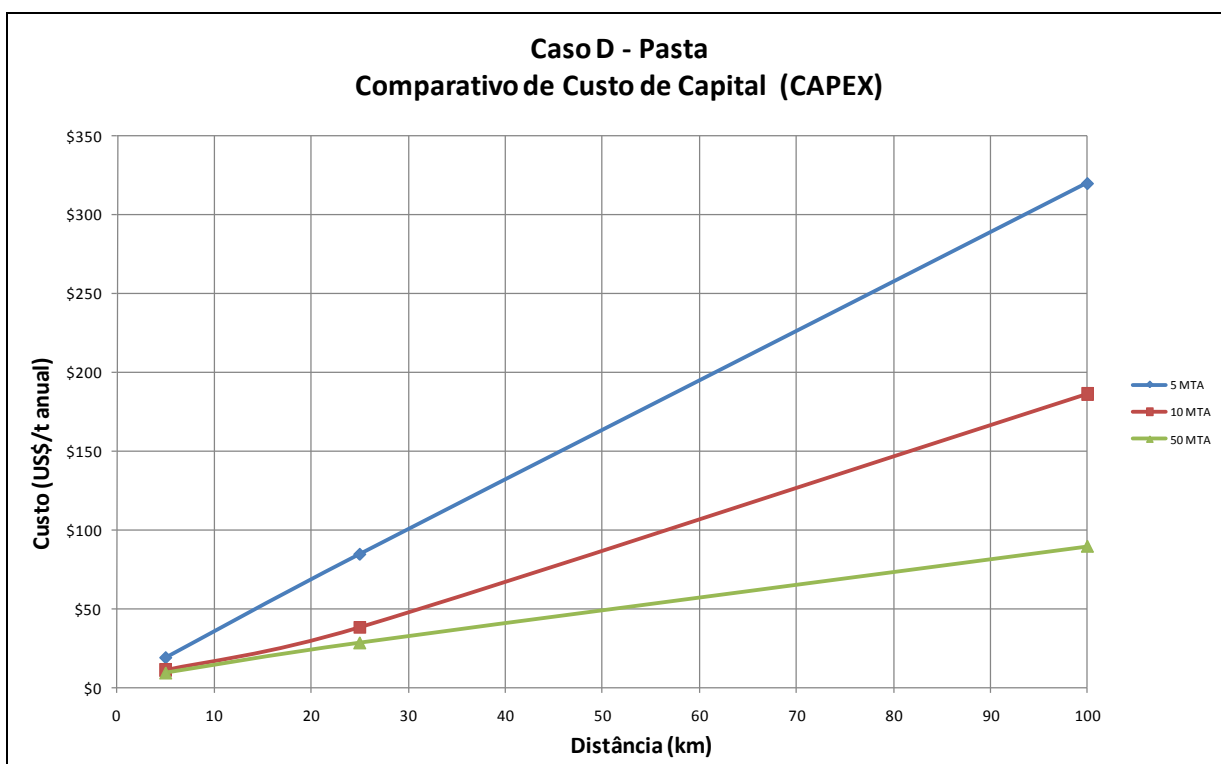


Figura 6.5: Comparativo de Custo de Capital para o Caso D

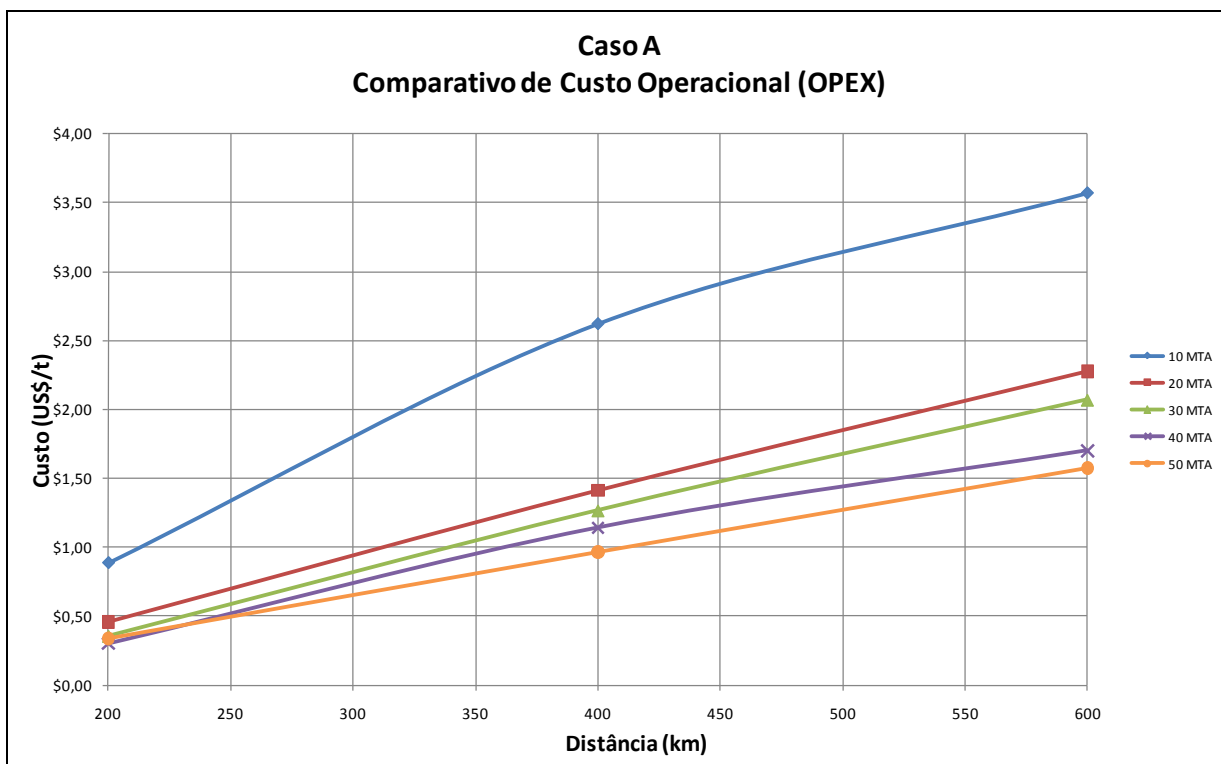


Figura 6.6: Comparativo de Custo Operacional para o Caso A

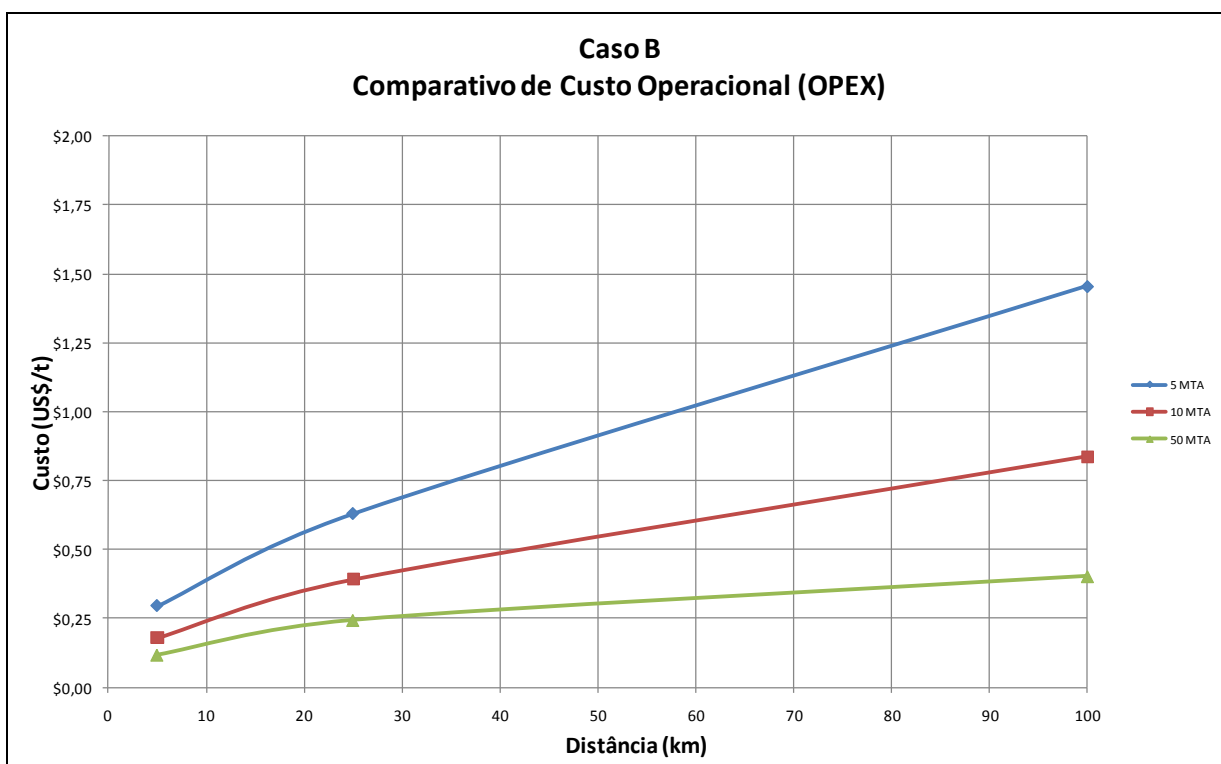


Figura 6.7: Comparativo de Custo Operacional para o Caso B

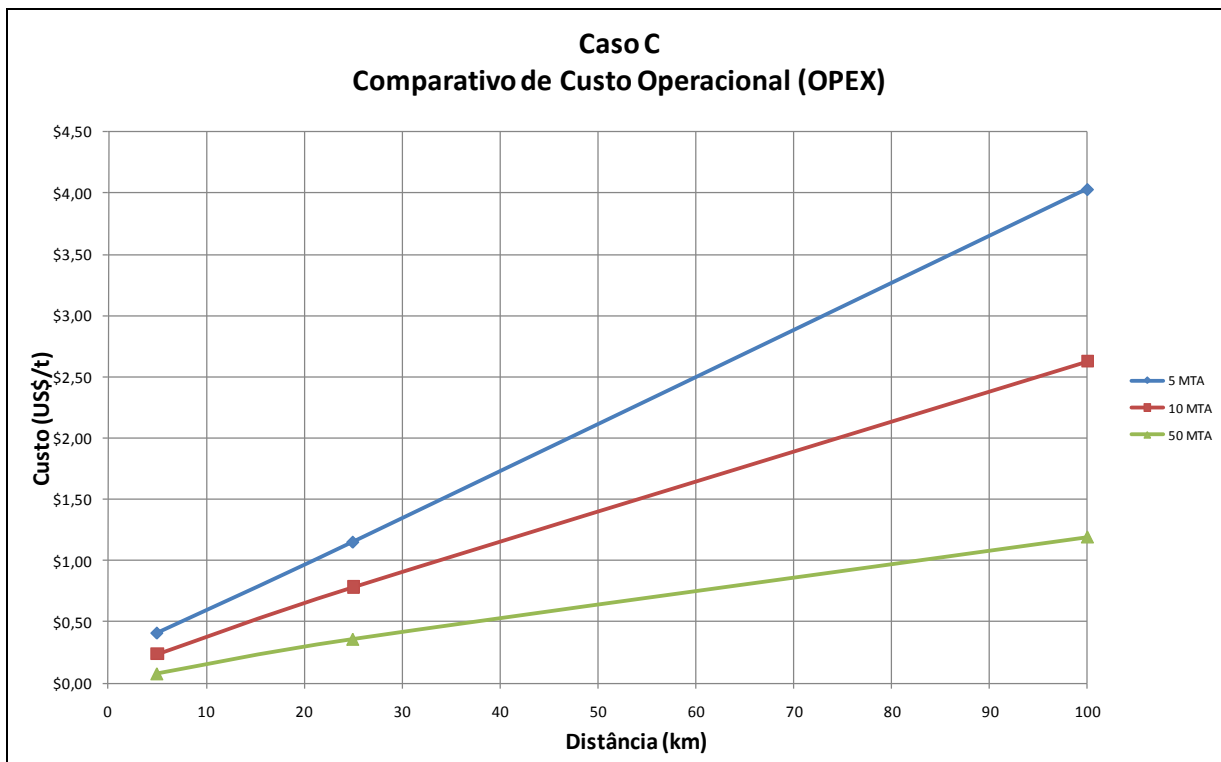


Figura 6.8: Comparativo de Custo Operacional para o Caso C

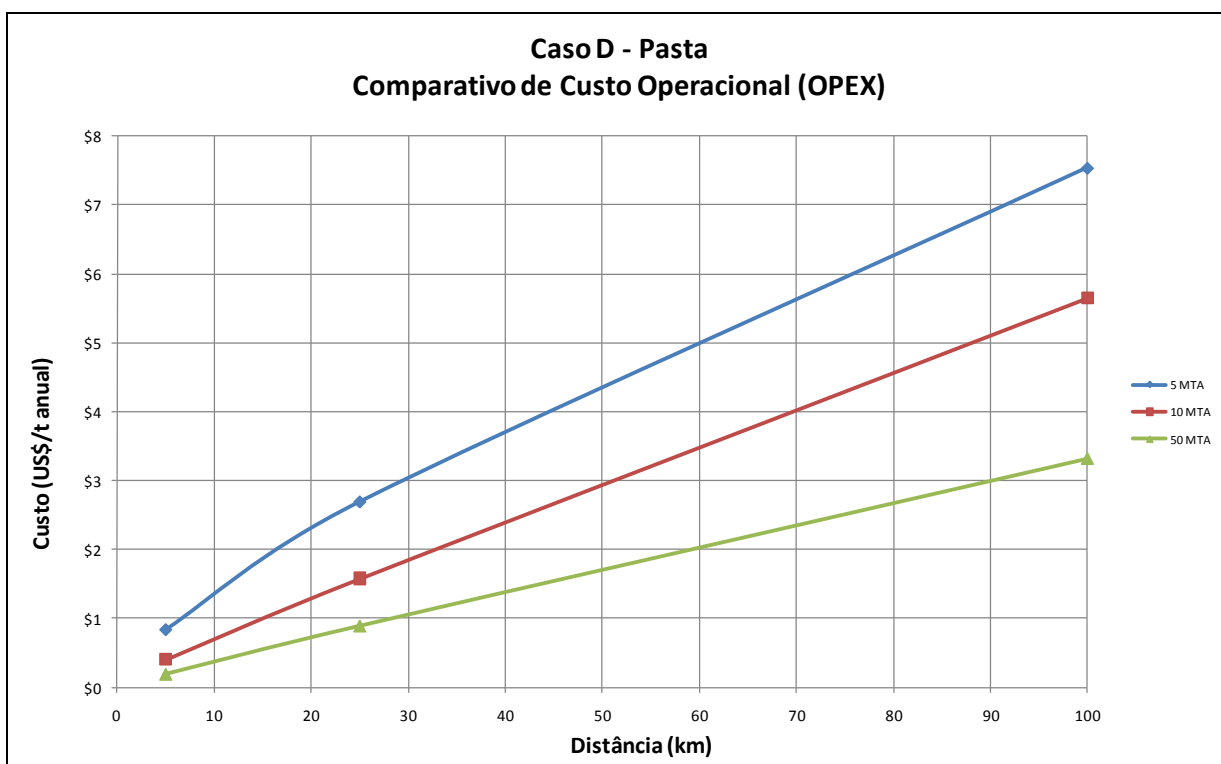


Figura 6.9: Comparativo de Custo Operacional para o Caso D

7 CONCLUSÃO

As curvas geradas por esse estudo podem ser utilizadas em estimativas preliminares de custo de investimento e de operação para transporte por minerodutos. Para o transporte de material fino, remuído, deve-se fazer referência às curvas do caso A para comprimentos maiores que 200 km e às curvas do caso B para comprimentos menores que 100 km. Se o comprimento for entre 100 e 200, deve-se obter o valor a partir da interpolação das curvas de acordo com a rota. Para rotas mais planas, deve-se usar o caso B e para rotas que tem grande diferença de altura, sendo uma descida, deve-se usar o caso A. O caso C deve ser utilizado em estimativas que envolvam o transporte de material não remuído, que requer o uso de revestimento interno da tubulação.

O caso D é completamente diferente do restante. Ele envolve o transporte de um material fora dos padrões normais de transporte de polpa por mineroduto para longa distância. Esse caso foi avaliado com uma abordagem de transporte na forma de pasta.

O transporte do material do caso D é extremamente difícil, tanto para o investimento quanto para a operação independente da produção, principalmente para distâncias maiores (25 e 100 km). Também há o requerimento de várias estações de bombeamento intermediárias para a maioria dos casos, o que reduz significativamente a disponibilidade do sistema. Além do custo elevado, há dificuldades técnicas desse tipo de operação, pois possivelmente as estações intermediárias serão em locais de difícil acesso tanto para a mão-de-obra quanto para energia elétrica e outras necessidades. O manuseio desse material na forma de pasta é outro complicador. Como pode ser visto no Capítulo 5, alterações de até 0,5% da concentração de sólidos em massa podem alterar significativamente a consistência do material. Para as condições de operação normais de uma planta, o controle da variação da faixa de concentração dentro desse limite não é usualmente obtido, na prática.

8 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de aprofundar ou dar continuidade a alguns aspectos não abordados ou citados de forma superficial no presente trabalho de pesquisa, alguns temas para trabalhos futuros são sugeridos.

- Realizar um estudo comparativo de viabilidade técnica e econômica entre espessar a polpa na planta de beneficiamento e bombear para a barragem e bombear a polpa e espessá-la próximo a barragem de rejeitos;
- Estudar um mecanismo seguro para armazenamento de pasta, melhorando a disponibilidade do sistema;
- Realizar um estudo meticuloso de transporte de pasta para curtas distâncias, já que o presente estudo concluiu que para longas distâncias o transporte de pasta se torna economicamente inviável;

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Ê. F. (2007). Efeito do Processo de Deposição no Comportamento de Brasília.

ARAUJO, C. B. (2005). Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de São Paulo.

AUSENCOPSI. (2008). Treinamento de Sistema de Transporte de Tubulação por Polpa. Belo Horizonte: AusencoPSI.

ÁVILA, P. (2008). www.pimentaavila.com.br.

BARBOSA, L. S., & BRAGA, E. M. (2010). Deparação Sólido-Líquido. Belém: Universidade Federal do Pará.

BASTES, J. (2003). Parâmetros no Projeto de Pilhas e Barragens. São Paulo: Signus.

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

CHAVES, A. P. (2004). Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Volume 2. São Paulo: Signus.

CHAVES, A. P., & PERES, A. E. (2003). Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Volume 3. São Paulo: Signus.

Espósito, T. J. (2000). Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeitos Construídas por Aterros Hidráulicos. Brasília: Universidade de Brasília.

FALCUCCI, A., & ARAUJO, A. C. (2007). A Influência de Floculantes Poliméricos na Formação de Pastas Mineraias (2 ed.). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.

FAUST, A. S. (1982). Princípios das Operações Unitárias. Rio de Janeiro: LTC.

INTER PRESS SERVICE. (2006). <http://educarbrasil.org.br>. (INTER PRESS SERVICE) Acesso em 18 de 10 de 2010, disponível em Educa Brasil: <http://educarbrasil.org.br/UserFiles/P0001%5CFile%5CA%20minera%C3%A7%C3%A3o%20e%20o%20mundo.pdf>

JEWELL, R., FOURIER, A., & LORD, T. (2007). Paste and Thickened Tailings - A Guide . Australia: Australian Centre for Geomechanics .

KAHANG, & KAHANGO, Z. (2009 de janeiro de 2009). www.africa-ata.org/images. Acesso em 26 de novembro de 2010, disponível em Africa-Ata.

LOZANO, F. A. (2006). Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierarquico. São Paulo: USP.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., & ALMEIDA, S. L. (2004). Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM-MCT.

OSÓRIO, C. A., ARAUJO, A. C., & VALADÃO, G. E. (2008). Estudo de Característica de Algumas Pastas Mineraiis. Tecnologia em Metalurgia e Materiais , São Paulo, v.4, n.3, p. 50-55.

ANEXO I - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS E DAS MISTURAS

Tabela AI. 1: Distribuição Granulométrica das Amostras e das Misturas – Parte 1

Peneira Tamanho (mm)	AdoB352 (Finos)		AdoB353 (SF)		AdoB352 - 5% SF	
	% Ret.*	% Pas.*	% Ret.*	% Pas.*	% Ret.*	% Pas.*
8000	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
6300	0,0	100,0	4,7	95,3	0,2	99,8
5600	0,0	100,0	9,2	90,9	0,5	99,5
4750	0,0	100,0	16,0	84,0	0,8	99,2
4000	0,0	100,0	23,7	76,3	1,2	98,8
2800	0,0	100,0	34,8	65,2	1,7	98,3
2360	0,0	100,0	38,2	61,9	1,9	98,1
2000	0,0	100,0	42,4	57,6	2,1	97,9
1400	0,0	100,0	51,7	48,3	2,6	97,4
1180	0,0	100,0	55,8	44,2	2,8	97,2
1000	0,0	100,0	58,7	41,3	2,9	97,1
850	0,0	100,0	61,6	38,4	3,1	96,9
710	0,0	100,0	64,4	35,6	3,2	96,8
600	0,0	100,0	66,6	33,4	3,3	96,7
500	0,1	99,9	69,0	31,0	3,5	96,5
300	0,3	99,7	75,5	24,6	4,1	95,9
212	1,4	98,6	81,2	18,8	5,4	94,6
150	4,3	95,7	84,8	15,2	8,3	91,7
106	10,8	89,2	87,8	12,2	14,7	85,3
75	18,4	81,6	90,3	9,7	22,0	78,1
53	29,9	70,1	92,4	7,7	33,0	67,0
45	37,5	62,6	93,1	6,9	40,2	59,8
38	46,9	53,2	94,2	5,8	49,2	50,8
30	71,6	28,4	95,2	4,8	72,8	27,3
25	80,1	19,9	95,7	4,3	80,9	19,2
20	87,7	12,3	96,3	3,7	88,1	11,9
15	93,8	6,2	97,0	3,0	94,0	6,0
10	97,1	2,9	97,6	2,4	97,1	2,9
5	98,1	1,9	98,2	1,8	98,2	1,9
3	98,5	1,5	98,6	1,4	98,5	1,5
1	99,2	0,8	99,4	0,6	99,2	0,8

* % Ret. = % Retido Acumulado

** % Pas. = % Passante Acumulado

Tabela AI. 1: Distribuição Granulométrica das Amostras e das Misturas – Parte II

Peneira Tamanho (mm)	AdoB352 - 10% SF		AdoB352 - 20% SF	
	% Ret.*	% Pas.*	% Ret.*	% Pas.*
8000	0,0	100,0	0,0	100,0
6300	0,5	99,5	1,0	99,1
5600	0,9	99,1	1,8	98,2
4750	1,6	98,4	3,2	96,8
4000	2,4	97,6	4,7	95,3
2800	3,5	96,5	7,0	93,0
2360	3,8	96,2	7,6	92,4
2000	4,2	95,8	8,5	91,5
1400	5,2	94,8	10,4	89,7
1180	5,6	94,4	11,2	88,8
1000	5,9	94,1	11,7	88,3
850	6,2	93,8	12,3	87,7
710	6,4	93,6	12,9	87,1
600	6,7	93,3	13,3	86,7
500	7,0	93,0	13,9	86,1
300	7,9	92,2	15,4	84,6
212	9,4	90,6	17,4	82,6
150	12,3	87,7	20,4	79,6
106	18,5	81,5	26,2	73,8
75	25,6	74,5	32,7	67,3
53	36,2	63,8	42,4	57,6
45	43,0	57,0	48,6	51,4
38	51,6	48,4	56,3	43,7
30	73,9	26,1	76,3	23,7
25	81,6	18,4	83,2	16,8
20	88,5	11,5	89,4	10,6
15	94,2	5,9	94,5	5,5
10	97,1	2,9	97,2	2,8
5	98,2	1,9	98,2	1,8
3	98,5	1,5	98,5	1,5
1	99,2	0,8	99,2	0,8

* % Ret. = % Retido Acumulado

** % Pas. = % Passante Acumulado

ANEXO II - REOGRAMAS

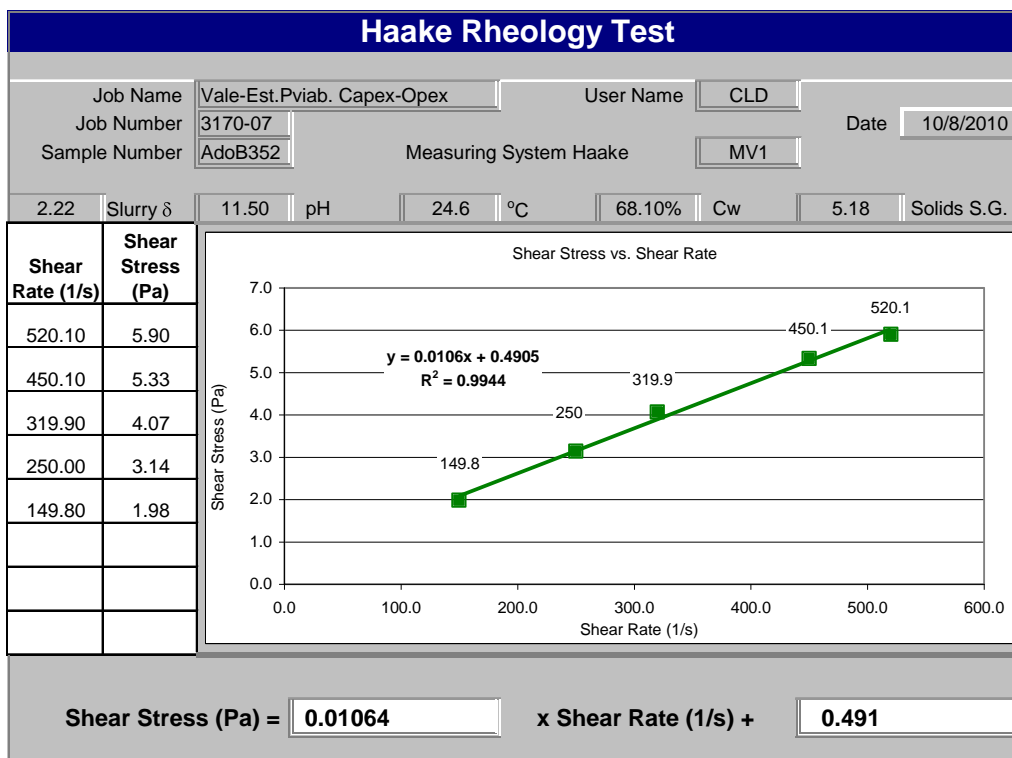


Figura AII. 1: Reograma da Amostra AdoB352 – Concentração de sólidos: 68,1% ww

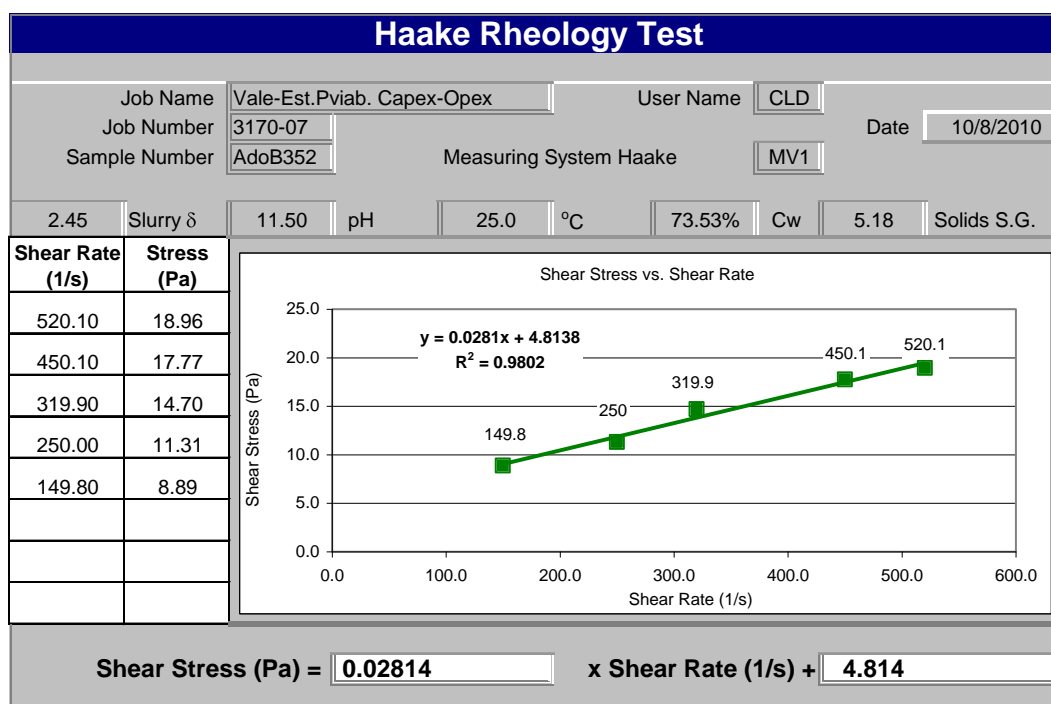


Figura AII. 2: Reograma da Amostra AdoB352 – Concentração de sólidos: 73,5% ww

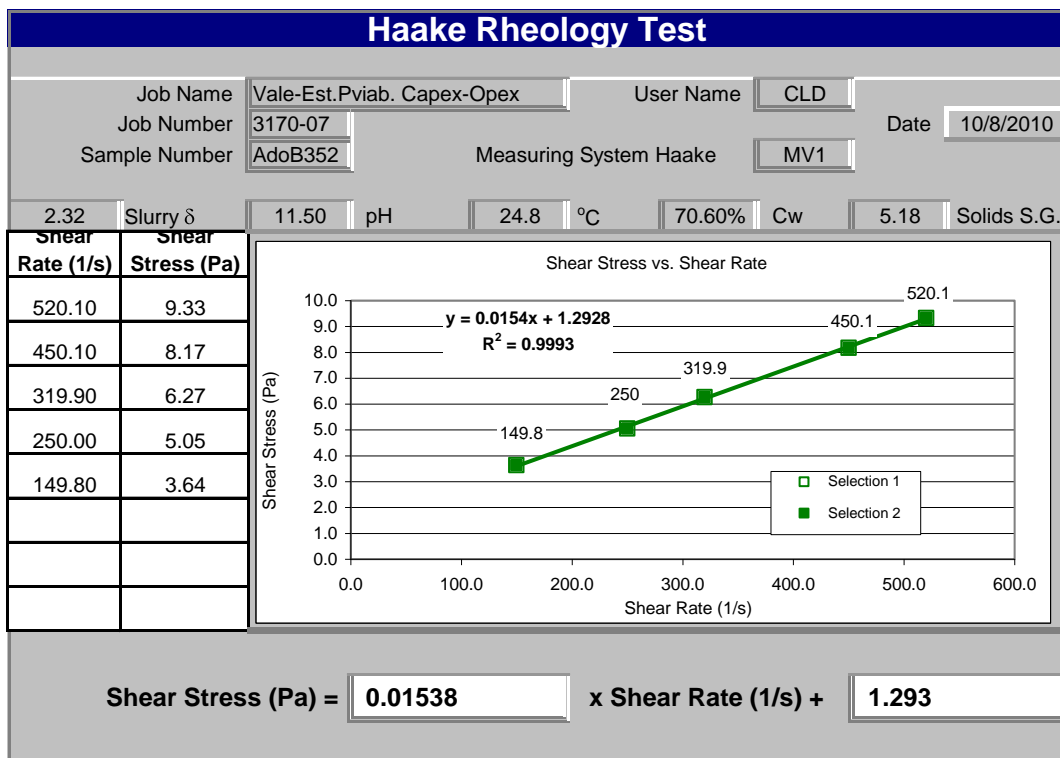


Figura AII. 3: Reograma da Amostra AdoB352 – Concentração de sólidos: 70,6% ww

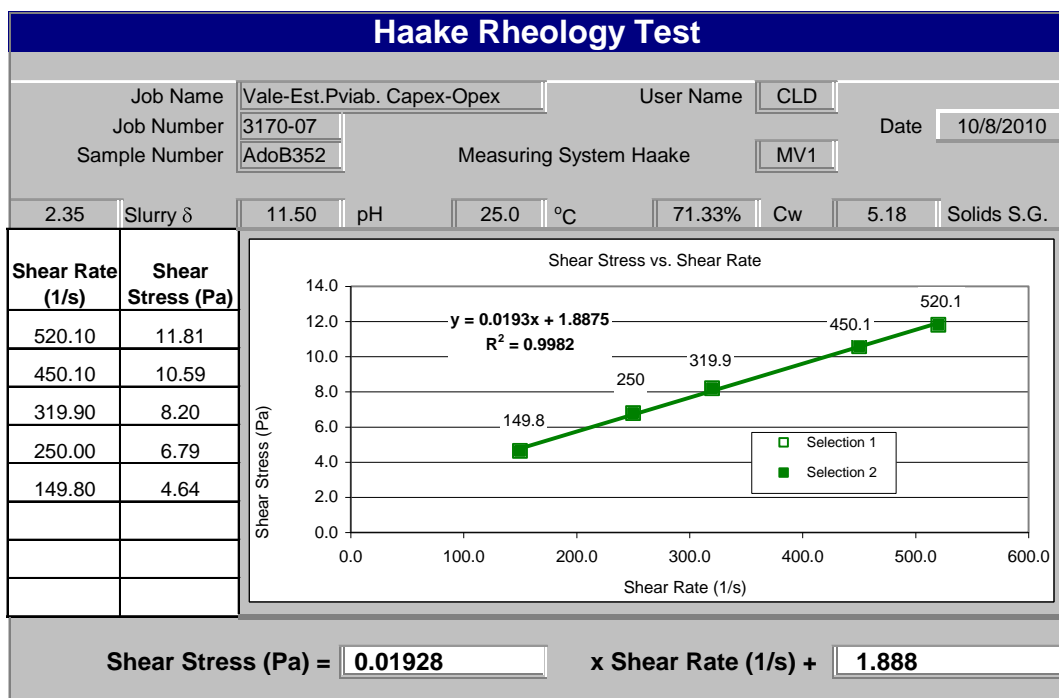


Figura AII. 4: Reograma da Amostra AdoB352 – Concentração 71,3% ww

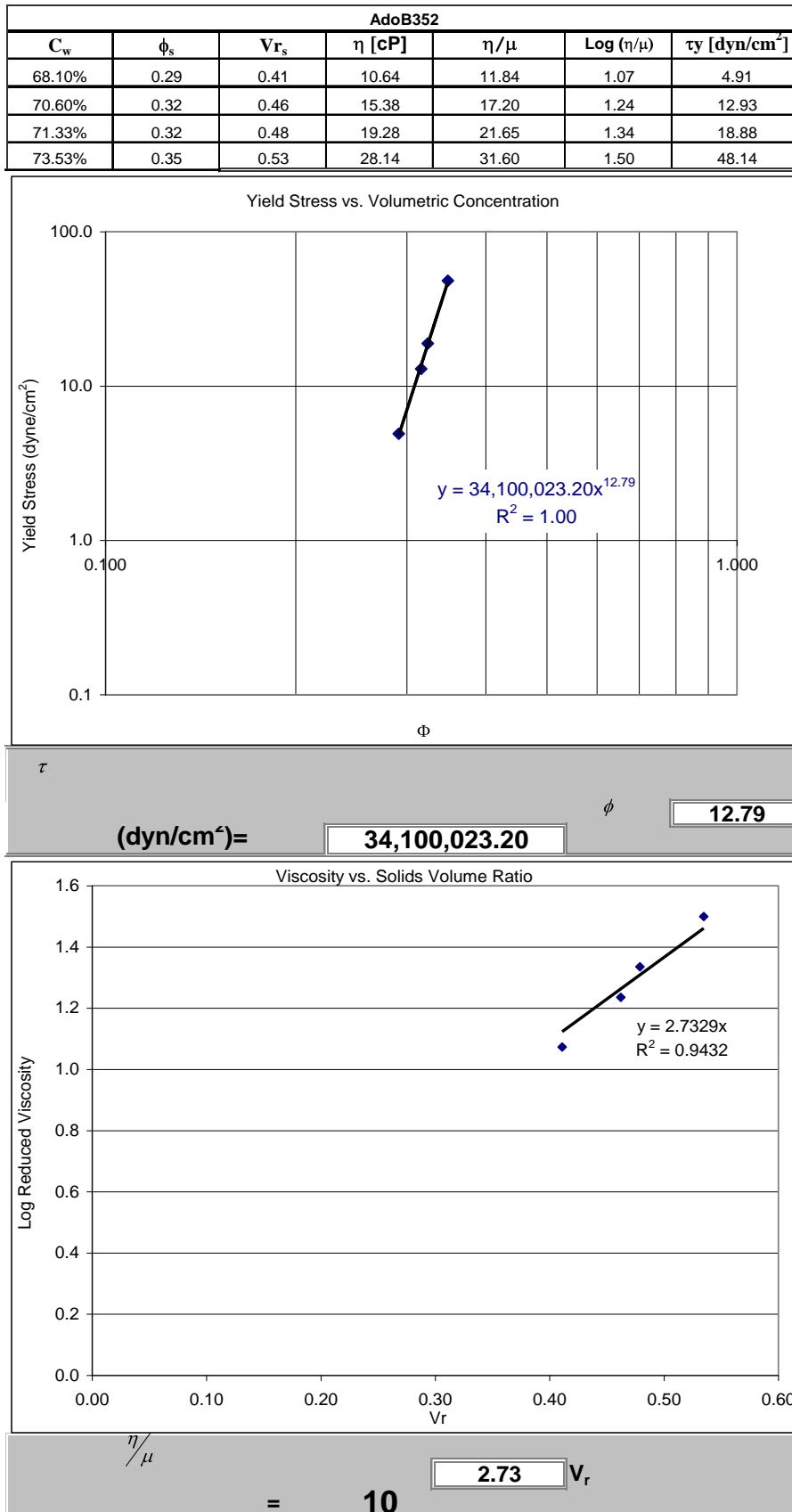


Figura AII. 5: Tela do Programa com Ajuste das Curvas dos Parâmetros Reológicos

ANEXO III - PERFIS HIPOTÉTICOS

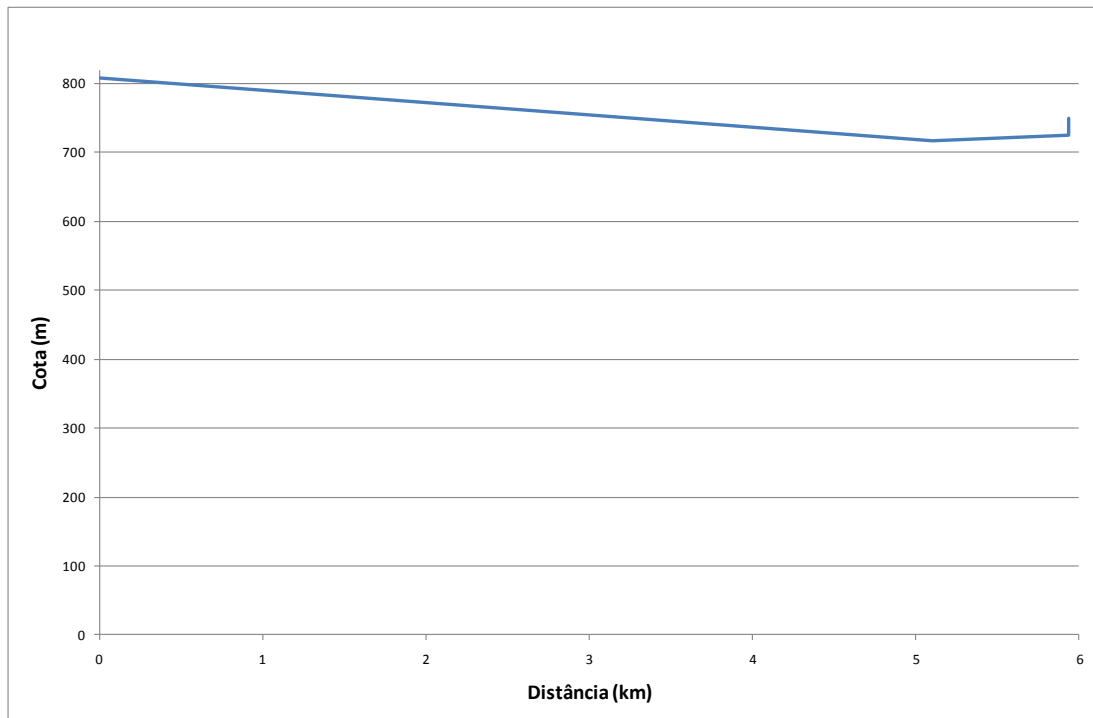


Figura AIII. 1: Perfil Hipotético para uma Rota de 5 km

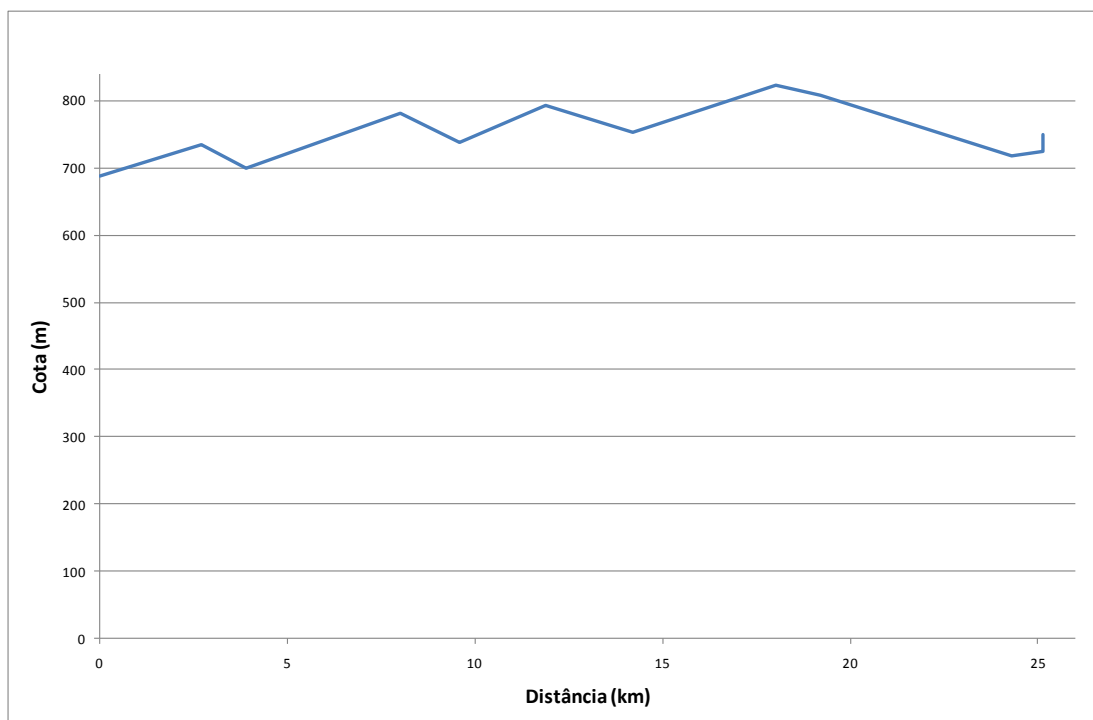


Figura AIII. 2: Perfil Hipotético para uma Rota de 25 km

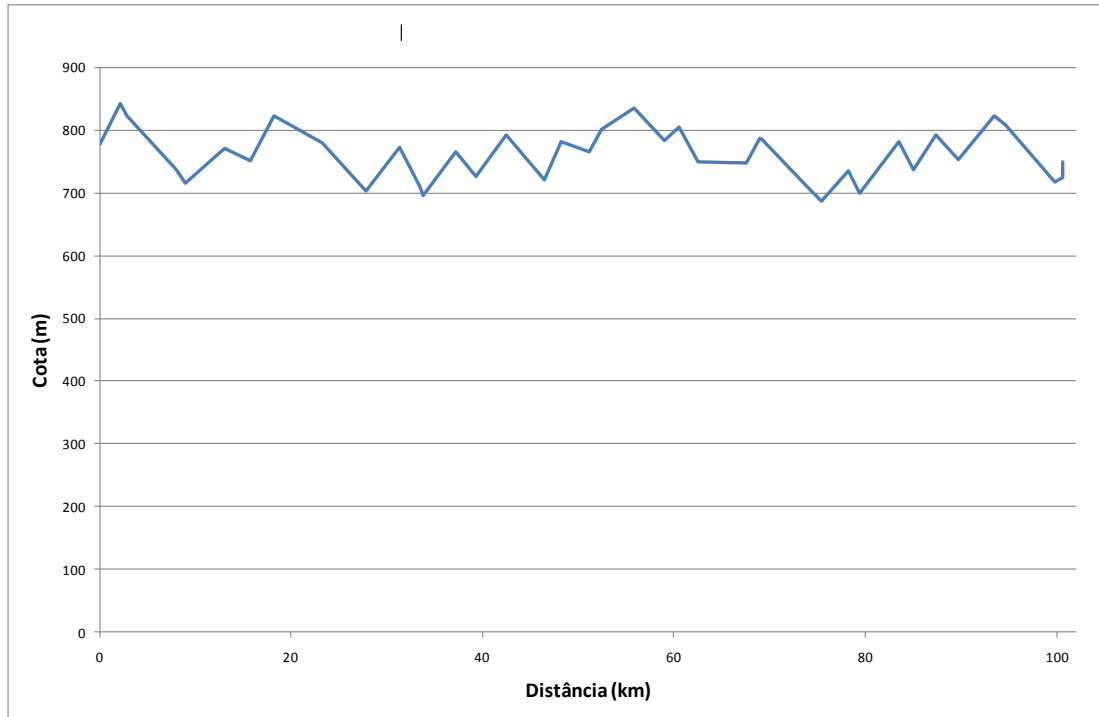


Figura AIII. 3: Perfil Hipotético para uma Rota de 100 km

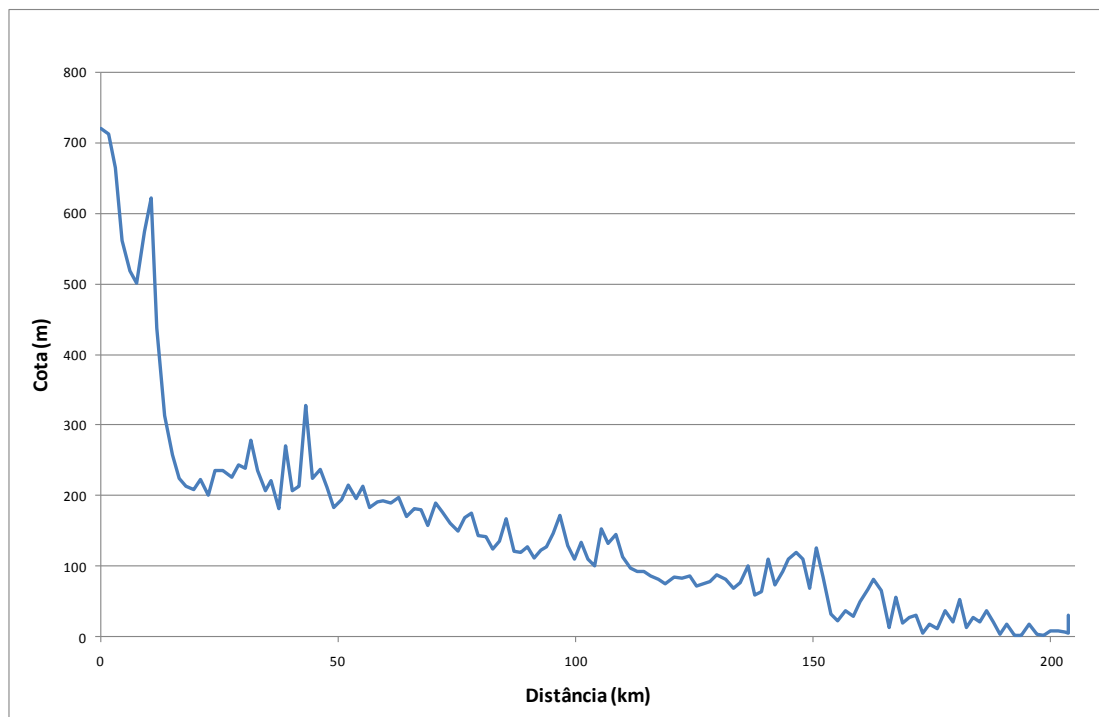


Figura AIII. 4: Perfil Hipotético para uma Rota de 200 km

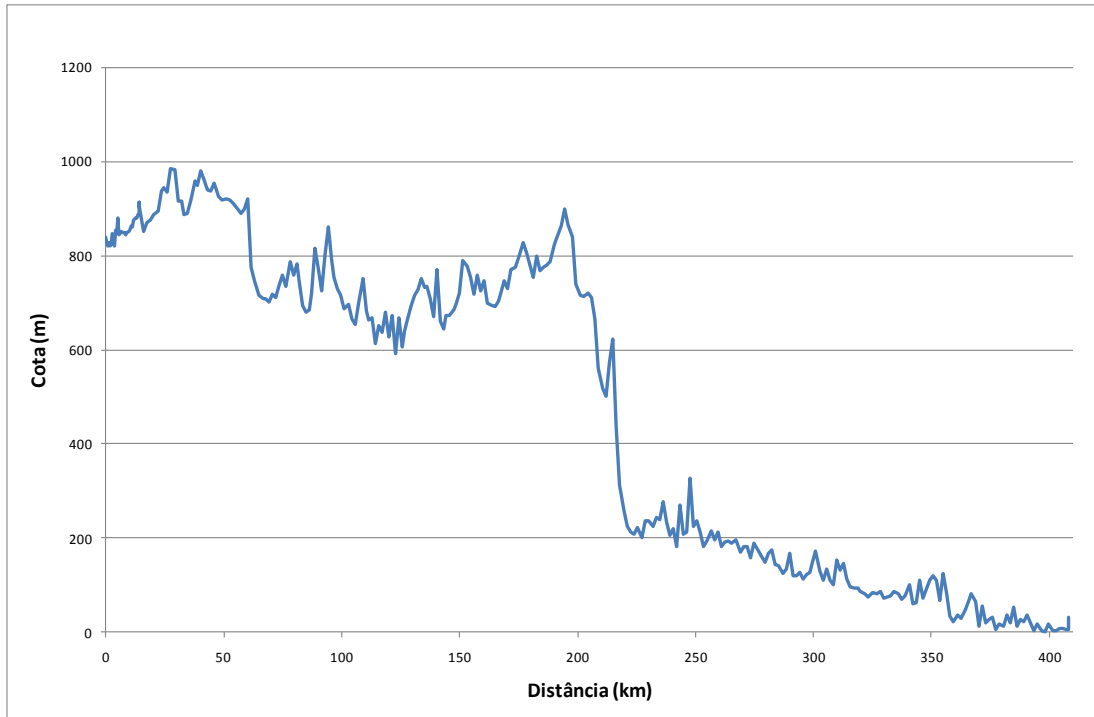


Figura AIII. 5: Perfil Hipotético para uma Rota de 400 km

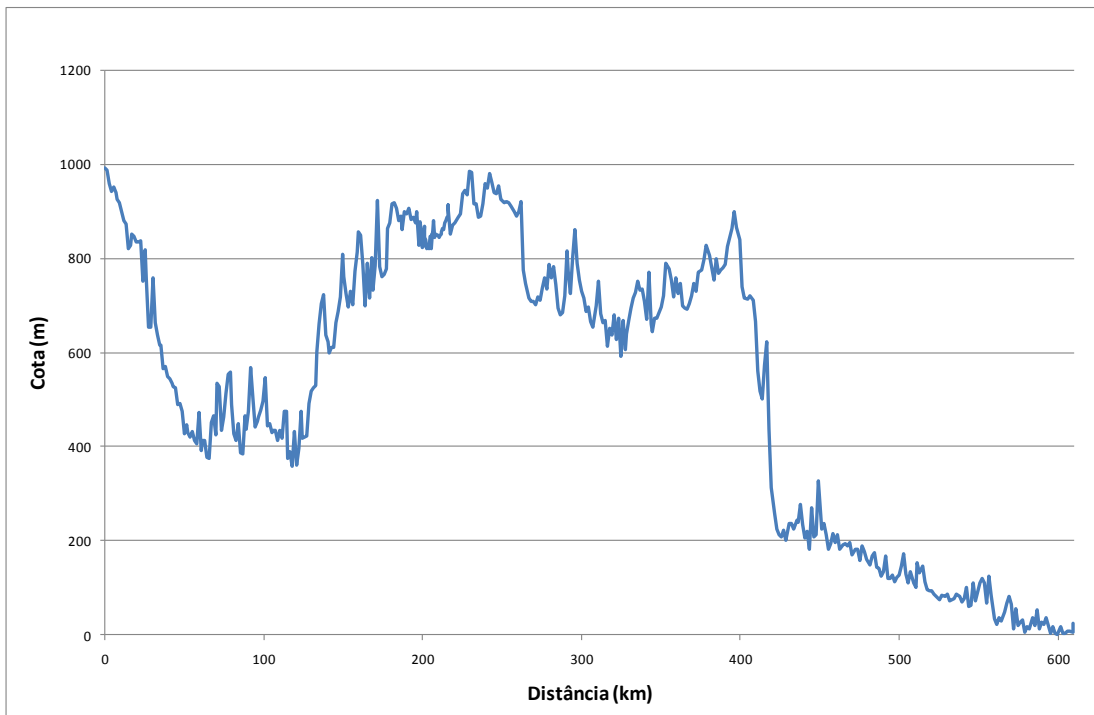


Figura AIII. 6: Perfil Hipotético para uma Rota de 600 km