



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ

JHONI CASTRO RODRIGUES

CARACTERIZAÇÃO DE POLPA DE MINÉRIO

Marabá-PA

2012

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ

JHONI CASTRO RODRIGUES

CARACTERIZAÇÃO DE POLPA DE MINÉRIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal do Pará, Campus de Marabá como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais. Orientador: Prof. M.Sc Márcio Corrêa de Carvalho.

Marabá-PA

2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA

Rodrigues, Jhoni Castro

Caracterização de polpa de minério / Jhoni Castro Rodrigues;
orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. — 2012.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de
Engenharia de Materiais, Marabá, 2012.

1. Minérios de ouro. 2. Reologia. 3. Viscosidade. 4. Mecânica dos
fluidos. I. Carvalho, Márcio Corrêa de, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 553.41

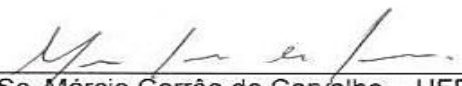
JHONI CASTRO RODRIGUES

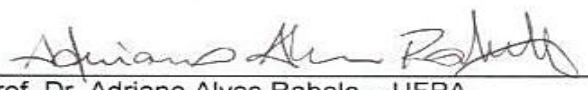
CARACTERIZAÇÃO DE POLPA DE MINÉRIO

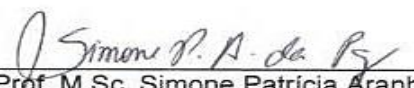
Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal do Pará, Campus de Marabá como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais. Orientador: Prof. M.Sc Márcio Corrêa de Carvalho.

Data de aprovação: 12 de Novembro de 2012

Banca examinadora:

 - Orientador
Prof. M.Sc. Márcio Corrêa de Carvalho – UFPA

 - Membro interno
Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo – UFPA

 - Membro interno
Prof. M.Sc. Simone Patrícia Aranha da Paz – UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo, á Deus por sua proteção, amor incondicional e por me permitir Alcançar meus sonhos.

A minha Saudosa Mãe, Maria Kleuza, que sempre me estimulou a encarar as dificuldades.

Ao professor orientador M.Sc. Márcio Corrêa de Carvalho, pela orientação paciência e compreensão para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Rômulo Ângelo, coordenador do curso de pós-graduação na área de Geociência, pela colaboração e interpretação dos ensaios químico e mineralógico.

Aos meus amigos de trabalho e da faculdade, que fizeram parte da minha vida em diversos momentos, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho.

RESUMO

As características reológicas de uma determinada polpa de minério dependem da sua natureza, ou seja, suas propriedades físicas e químicas. A coesão do material sedimentado tem relevância e está relacionada a determinados fatores, tais como a composição mineralógica da polpa, as propriedades físicas e químicas dos minerais constituintes e a distribuição de tamanhos das partículas. Através do estudo das propriedades da polpa pode-se ter um entendimento de seu comportamento no bombeamento. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é avaliar alguns parâmetros físicos e químicos de uma determinada polpa de minério. A caracterização foi realizada segundo as análises de DRX, FRX, ATD/TG, DTP, MEV, densidade, viscosidade e ensaios de sedimentação. Foi observado na composição mineralógica elevada concentração de quartzo, além de minerais provenientes de rochas sedimentares como o argilomineral clinocloro, e de alta clivagem como a biotita. A polpa possui uma distribuição granulométrica bastante homogênea percorrendo tamanhos de até 22 μm . Por conseguinte a propriedade reológica de uma polpa de minério como a viscosidade é influenciada não somente pela percentual de sólido, mas pela DTP, ASE, composição mineralógica, pH e temperatura.

Palavras-chave: Viscosidade, tamanho de partícula, argila.

ABSTRACT

The rheological characteristics of determined ore pulp depends on their nature, i.e. their physical and chemical properties. The cohesion of the settled material has relevance and is related to certain factors, such as the mineralogical composition of the pulp, the physical and chemical properties of mineral constituents and the distribution of particle size. Through the study of the properties of the pulp you can have an understanding of its behavior in pumping, in this context, the objective of this study is to evaluate some physical and chemical parameters of a given ore pulp. The characterization was performed according to the analyzes of DRX, FRX, ADT/ATG, DTP, MEV, density, viscosity and tests of sedimentation. It was observed in mineralogical composition high concentration of quartz, in addition to minerals from sedimentary rocks as the clay mineral clinocloro, and high cleavage as the biotite. The pulp has a particle size distribution very homogeneous scrolling sizes of up to 22 μm . Therefore the rheological property of a ore pulp as the viscosity is influenced not only by the percentage of solid, but the DTP, ASE, mineralogical composition, ph and temperature.

Keywords: Viscosity, particle size, Clay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Tipos de comportamento reológico de polpas.....	19
Figura 2.2 - Fluido newtoniano e de Bingham	20
Figura 2.3 - Tipos de fluxos	22
Figura 2.4 - relação densidade versos tamanho de partículas.....	25
Figura 2.5 - Distribuição da concentração de sólidos no perfil da tubulação para polpa transicional (mista).	26
Figura 2.6 - Distribuição da concentração de sólidos no perfil da tubulação para polpa sedimentária.	27
Figura 2.7 - Distribuição da concentração de sólidos no perfil da tubulação para polpa transicional (mista).	27
Figura 2.8 - Comparação dos efeitos relativos de concentração e velocidade de transporte.....	28
Figura 2.9 - Formas das superfícies de partículas.	32
Figura 2.10 - Mecanismo da sedimentação descontínua.....	33
Figura 2.11 - Curva de sedimentação	34
Figura 3 - a) Solução de hexametáfosfato de sódio,b) Ensaio de sedimentação	37
Figura 4.1 - Massa retida em cada peneira.....	41
Figura 4.2 - Massa acumulada em cada peneira.....	41
Figura 4.3 - Curva granulométrica de tamanho de partículas	43
Figura 4.4 - Difrátograma da amostra sólida.....	44
Figura 4.5 - Termograma da amostra sólida	45
Figura 4.6 - Microscopia da polpa de minério com aumento de:(a) x250; (b) x250; (c) x250 e (d) x2000	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Classificação granulométrica por peneiramento.....	40
Tabela 4.2 - Tabela ilustrativa para coleta de dados	42
Tabela 4.3 - Composição semiquantitativa da polpa de minério	44
Tabela 4.4 - Percentual de sólidos e viscosidade dinâmica da Polpa	47
Tabela I.I - Teste de densidade (T = 29 °C)	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

MEV	Análise de microscopia eletrônica de varredura
ATD	Análise térmica diferencial
TGA	Análise Termogravimétrica
ASE	Área superficial específica
S	Área superficial específica da partícula
Cd	Coeficiente de arrasto
ν_p	Coeficiente de viscosidade cinemática da polpa
μ_p	Coeficiente de viscosidade dinâmica da polpa
μ_1	Coeficiente de viscosidade dinâmica do líquido
Cv	Concentração Volumétrica dos sólidos
ρ_s	Densidade da partícula
ρ_2	Densidade real da partícula
ρ_l	Densidade real do fluido
D_t	Densidade real do sólido na temperatura T
d	Diâmetro da partícula
d'	Diâmetro das partículas que contribuem para o meio denso
d	Diâmetro de partícula
d _i	Diâmetro de partícula representativo
d _{máx}	Diâmetro máximo da partícula ("top size")
d ²	Diâmetro médio de partícula
d _{mp}	Diâmetro médio ponderado
d _{repr}	Diâmetro representativo das partículas
DRX	Difração de Raios-X
DTP	Distribuição de tamanho de partícula
K _t	Fator de correção na temperatura T
FRX	Fluorescência de Raios-X
γ_p	Gravidade específica (densidade) da polpa
γ_1	Gravidade específica (densidade) do Líquido ou meio de transporte
γ_s	Gravidade específica (densidade) dos Sólidos
m	Massa da amostra de ensaio que fica retida na peneira 1,18 mm
m _R	Massa das partículas retidas na peneira 1,18 mm, por peneiramento úmido

A_r	Número de Arquimedes
Re	Numero de Reynalds
P_2	Peso do picnômetro mais a amostra
P_4	Peso do picnômetro mais água
P_3	Peso do picnômetro mais amostra, mais água
P_1	Peso do picnômetro vazio e seco
PH	Potencial hidrogênioso
P	Quantidade de torrões de argila e materiais friáveis
d_x	Tamanho médio de partículas
γ	Taxa de cisalhamento
t	Tempo de sedimentação
τ	Tensão de cisalhamento
W_s	Velocidade de decantação
W_s'	Velocidade de decantação retardada
v	Velocidade de queda da partícula
μ	Viscosidade absoluta do fluido
μ_{ap}	Viscosidade aparente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 COMPORTAMENTOS DAS POLPAS	21
2.1.1 Tipos de fluxo de polpas.....	22
2.1.1.1 Polpa homogênea	23
2.1.1.2 Polpa heterogênea	23
2.1.1.3 Fluxo homogêneo.....	23
2.1.1.4 Fluxo heterogêneo	24
2.1.1.5 Fluxo de leito móvel.....	24
2.1.1.6 Fluxo com leito fixo.....	24
2.1.2 Propriedades de interesse referente á polpa.....	25
2.1.3 Caracterização do regime de suspensão/escoamento.....	26
2.1.4 Determinação do tipo de polpa.....	29
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS.....	31
2.2.1 Formas das partículas sólidas.....	31
2.2.2 Medições do tamanho das partículas pelo método de sedimentação	32
3 MATERIAL E MÉTODO.....	35
3.1 MATERIAL	35
3.2 MÉTODO	35
3.2.1 FLUXOGRAMA DE CARACTERIZAÇÃO DA POLPA DE MINÉRIO	35
3.2.2 Análise granulométrica.....	36
3.2.3 Sedimentação	36
3.2.4 Espectrometria de fluorescência de raios-X.....	37

3.2.5 Difração de raios-X.....	38
3.2.6 Análise térmica.....	38
3.2.7 Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	38
3.2.8 Viscosidade	39
3.2.9 Densidade	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	40
4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	43
4.3 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	44
4.4 ANÁLISE TÉRMICA	45
4.4 ANÁLISE DA POLPA PELO MEV.....	46
4.5 VISCOSIDADE.....	47
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
ANEXOS	53
I Cálculo de densidade de sólido.....	53
I.I Correção da densidade relativa em relação a temperatura de ensaio	53
II Cálculo de porcentagem de torrões de argila e materiais friáveis contidos no agregado miúdo de acordo com a fórmula seguinte.	53

1 INTRODUÇÃO

O beneficiamento de partículas finas vem se constituindo num grande desafio para os tratamentistas de minérios uma vez que, com o decréscimo do tamanho das partículas, começa a diminuir a ação das forças de caráter mecânico sobre as mesmas, passando a tornar significativas as forças referentes aos fenômenos eletrostáticos e aquelas devido à descontinuidade do meio (viscosidade). Neste momento, o estudo da reologia torna-se muito importante para o entendimento do comportamento das partículas numa polpa, razão pela qual tem-se verificado nos últimos anos um interesse cada vez maior em diagnosticar os efeitos da viscosidade na fluidodinâmica das polpas, passando-se da fase de observação e constatação para a de estudo, captando das informações obtidas uma base teórico/prática mais desenvolvida. Os estudos têm-se aprofundado graças ao grande avanço tecnológico experimentado pelos instrumentos de medição e de análise para partículas até mesmo de tamanhos coloidais.

Em processamento de minérios trabalha-se com sólidos fragmentados e se possível no seu estado natural, o que se denomina processamento a seco. Isto não significa que tenha que se retirar previamente toda a umidade do minério. Regra geral, a britagem, a estocagem em pilhas, a ensilagem e o peneiramento grosseiro são feitos a seco. Todavia, as demais operações como o peneiramento fino, a moagem, a classificação e as operações de concentração são, geralmente, feitas a úmido. Assim, são adicionadas ao circuito quantidades substanciais de água, dando origem a uma mistura heterogênea denominada polpa, constituída de partículas sólidas em suspensão em um meio aquoso. É em geral mais conveniente trabalhar a úmido do que a seco, pois a água facilita o transporte das partículas sólidas, absorve o excesso de calor gerado e impede a geração de poeiras [1].

É importante prever o comportamento da polpa durante o seu transporte através de dutos por isso se faz necessário um estudo reológico detalhado destas polpas. As polpas de minério podem apresentar um comportamento reológico Newtoniano, quando a viscosidade independe da taxa de cisalhamento, ou não-Newtoniano, quando ela for dependente. No primeiro caso, a viscosidade medida em qualquer ponto do circuito será a mesma, desde que não tenha sido adicionado algum agente modificador. Já no segundo caso, a viscosidade estará sendo modificado

constantemente dependendo do grau de agitação da polpa, numa homogeneização, bombeamento ou no interior de um equipamento.

Conforme [2-3] salientam que a análise teórica da reologia requer um extensivo arranjo de expressões matemáticas onde não são feitas maiores considerações sobre as causas, ficando restritas, em muitos casos, há apenas regiões de comportamento linear da teoria viscoelástica. Para que se possa ter um progresso na solução de problemas práticos, torna-se necessário adotar-se uma abordagem pragmática.

Na caracterização microscópica da reologia de uma polpa [4] consideram importante o balanço de três forças agindo no sistema água-partícula: difusão Browniana; interação hidrodinâmica; e as forças entre partículas. A contribuição específica de cada uma dessas forças depende do tamanho e da forma das partículas, da percentagem de sólidos e das condições físico-químicas da polpa.

Ressalta-se ainda que a polpa associada a cada tipo de minério possui um comportamento reológico diferente, impedindo uma padronização. Isso ocorre porque as propriedades reológicas são afetadas por vários fatores, tais como: forma da partícula, granulometria, temperatura e pressão entre outras características [5].

1.1 JUSTIFICATIVA

O Brasil é um país com grande extensão territorial em que a atividade de mineração se encontra, geralmente, distante dos centros de produção ou de consumo do país. O transporte de minérios pela malha rodoviária ou ferroviária é dispendioso e precisa de infraestrutura adequada, o que torna atrativa a opção do seu transporte sob a forma de polpa via minerodutos.

Para efeito de transporte em dutos, as lamas ou polpas minerais podem ser classificadas quanto a sua tendência à sedimentação. Sabe-se que quando a turbulência difusiva do fluido de transporte (geralmente água) for insuficiente para manter as partículas sólidas não coloidais em suspensão, haverá sedimentação no fundo da tubulação. O fluxo é considerado estratificado quando certa quantidade de sólidos forma um leito granular, que pode ser estacionário ou deslizante. Uma parada eventual no processo de bombeamento de polpas com alto teor de sólidos pode ser especialmente crítica na medida em que o sedimento formado é capaz de obstruir a tubulação e dificultar o retorno da operação de bombeamento. O grau de compactação do sedimento é um parâmetro que deve ser determinado, sendo que testes de penetração podem ser usados para essa finalidade [6]. Entretanto a metodologia aplicada neste estudo desconsidera o efeito de compactação devido à pressão hidrostática, que será relevante quando a altura da coluna de fluido sobre o sedimento for elevada. Contudo, a variação relativa da coesão do sedimento em decorrência de variáveis, tais como o percentual sólido, composição mineralógica, morfologia das partículas, viscosidade pode ser facilmente determinada através do método de caracterização e ensaio reológico. Com isso, pode-se fazer um estudo aplicado ao projeto de bombeamento da polpa de minério, considerando que o bom funcionamento do projeto não se limita apenas a tubulação e o tipo de bomba utilizada, mas também do conhecimento das propriedades do material a ser bombeado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Obter informações peculiares do material estudado, para posterior aplicação dos conhecimentos obtidos de forma a viabilizar a inserção das variáveis encontradas para otimização do processo de bombeamento da polpa de minério.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterização química, mineralógica e textural do minério estudado;
- Avaliar as propriedades térmicas do material em estudo.
- Traçar curva granulométrica da amostra sólida;
- Compor á análise granulométrica através de ensaio de sedimentação pelo método da proveta e obter a velocidade de decantação da polpa de minério;
- Relacionar o percentual de sólido e tamanho de partícula com a viscosidade apresentada pela polpa de minério.
- Determinar a densidade absoluta do material sólido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A influência da reologia não é bem compreendida e raramente incorporada como uma variável em projetos, análise e otimização. Uma das principais razões é a dificuldade de estudar a reologia de suspensões instáveis, como nos processos de beneficiamento de minérios, aliado ao fato da falta de Normas para a medida da viscosidade [7]. Até pouco tempo atrás, quando as frações de partículas finas e ultrafinas eram descartadas dos circuitos de beneficiamento, considerava-se a percentagem de sólidos como a única responsável pela variação da viscosidade na polpa. Com a necessidade de beneficiar partículas finas e ultrafinas intensificaram-se os estudos envolvendo essas frações. Com o auxílio de instrumentos mais modernos de medição de propriedades das partículas, outras variáveis foram creditadas como significativas para a viscosidade da polpa. São elas a distribuição de tamanhos das partículas, o ambiente químico e a temperatura das polpas.

Em um estudo muito interessante, [8] descreveram o comportamento de polpas de pigmento de dióxido de titânio com diferentes percentagens de sólidos em massa (45, 50 e 55%), a uma mesma taxa de cisalhamento (50 1/s), sob a ação de dispersante (silicato de sódio) em diferentes valores de pH. A maior viscosidade, para as três diferentes percentagens de sólidos, foi alcançada em pH 8,5, sendo decrescentes em direção a valores maiores e menores de pH. Quanto à influência da percentagem de sólidos somente, como era esperado, as maiores viscosidades foram observadas nas polpas com maiores percentagem de sólidos. Segundo [9] somente polpas com baixa percentagem de sólidos 3-5% por volume podem, normalmente, apresentar um comportamento de fluido Newtoniano, embora [10] tenham observado este comportamento com polpas de até 30% de sólidos por volume.

Descrevendo o comportamento de polpas (minério sulfetado de cobre-chumbo-zinco) com diferentes percentagens de sólidos por volume (15, 30 e 45%) e diferentes concentrações de partículas passante em 38 μm (20, 50 e 95%) constataram que a reologia das mesmas apresentava três tipos de comportamento: dilatante, pseudoplástico e plástico de Bingham [11].

No trabalho de [12] foi apresentado um exemplo da influência do tamanho de partículas na viscosidade de uma polpa. Esta, contendo 100% de partículas menores que 10 μm e com 10% de sólidos por volume, equivale a uma polpa

contendo 30% de sólidos por volume, mas com 100% de partículas maiores que 10 μm .

Uma outra consideração que merece destaque, diz respeito a viscosidade da polpa nos modelos matemáticos. Alguns avaliam seus efeitos de forma indireta, através da percentagem de sólidos. Tal procedimento poderá levar a erros significativos uma vez que a viscosidade da polpa não depende somente da percentagem de sólidos. Este efeito da viscosidade em muitos casos poderá perder seu significado físico por estar oculto nos parâmetros (k) dos modelos, após terem sido estimadas por procedimentos matemáticos. Este procedimento só é válido para polpas com comportamento Newtoniano, pois a viscosidade da polpa em qualquer ponto de seu percurso será constante. Por outro lado, se ela apresentar um comportamento não-Newtoniano e forem verificadas altas taxas de cisalhamento, a viscosidade será diferente daquela medida em outro ponto do circuito.

Em um fluido Newtoniano a viscosidade absoluta (μ) é o coeficiente angular da reta mostrada na Figura 2.1. A viscosidade medida em qualquer ponto do circuito será a mesma, desde que não se adicione algum reagente químico modificador. Para os fluidos não-Newtonianos, a viscosidade poderá ser modificada constantemente em função do grau de agitação da polpa. A resistência oferecida ao escoamento é medida pela viscosidade aparente (μ_{ap}) cujo valor é o coeficiente angular da reta que passa pela origem e pelo ponto de interesse na curva (tensão por taxa de cisalhamento). Ela corresponde à viscosidade de um fluido Newtoniano que exibe a mesma tensão de cisalhamento para uma dada taxa de cisalhamento [13]. Os fluidos não-Newtonianos são classificados em: pseudoplásticos com tensão de escoamento, plástico de Bingham, pseudoplásticos e dilatante. Todos estes tipos de escoamento são independentes do tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante. Para fluídos newtonianos a equação que expressa a viscosidade absoluta ou dinâmica μ é dada por:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.1)$$

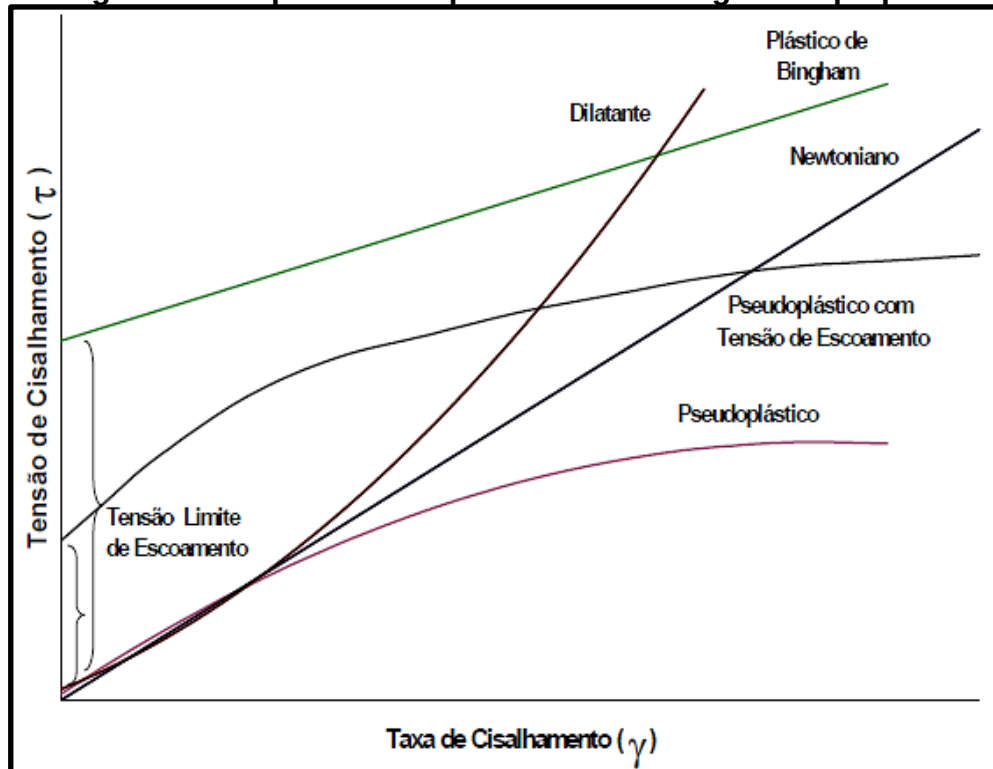
Onde:

μ =Viscosidade absoluta ou dinâmica (Pa.s);

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

γ = taxa de cisalhamento (1/s).

Figura 2.1 - Tipos de comportamento reológico de polpas.



Fonte: [14].

1) Fluidos que possuem uma força de cisalhamento e que em qualquer ponto dependem apenas da taxa de cisalhamento e são independentes do tempo. Estes incluem:

- Os fluidos que são conhecidos como Plásticos de Bingham, materiais que requerem uma força de cisalhamento mínima antes de se deformarem;
- Fluidos pseudoplásticos sendo aqueles em que a força de cisalhamento diminui com a taxa de cisalhamento;
- Fluidos dilatantes, aqueles em que a força de cisalhamento aumenta com a taxa de cisalhamento.

2) Fluidos em que a razão força de cisalhamento/ taxa de cisalhamento têm um comportamento dependente do tempo. Estes caem em uma das categorias:

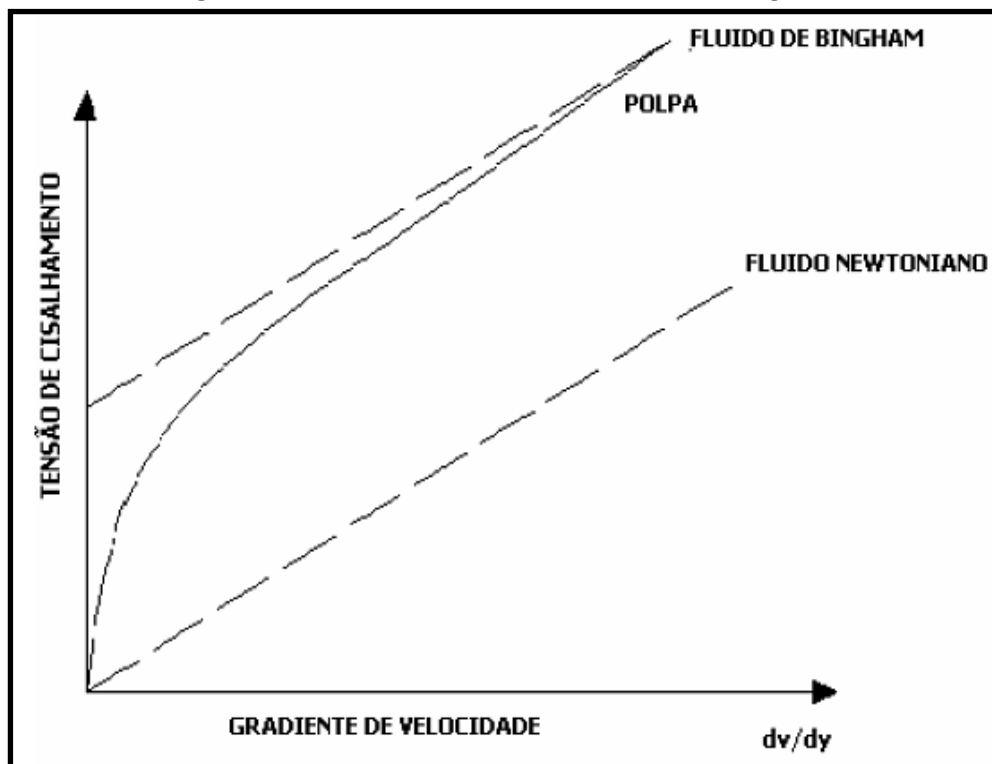
- Nos fluidos tixotrópicos, a microestrutura do fluido progressivamente se rompe e a viscosidade diminui.
- Em fluidos reopéticos, a força aplicada promove uma formação gradual de uma estrutura local e a viscosidade aparente aumenta.

3) Materiais viscoelásticos que apresentam um comportamento em algum lugar entre um sólido e um líquido.

Os fluidos denominados plásticos de Bingham e pseudoplástico com tensão de escoamento distinguem-se dos outros fluidos por requererem uma tensão inicial (τ_0) denominada de tensão limite de escoamento, para que o fluido comece a escoar. De acordo com [15], a maioria das polpas em tratamento de minérios apresenta o comportamento de plástico de Bingham.

A Figura 2.2 mostra um diagrama da tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade, comumente designado por reograma e os vários tipos de fluidos estudados pela reologia. A grande maioria das polpas usadas em tratamento de minérios está associada a um modelo denominado “fluido de Bingham” ou fluido visco-plástico.

Figura 2.2 – Fluido newtoniano e de Bingham



Fonte: [16].

Nos fluidos pseudoplásticos, a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Este comportamento pode ser encontrado em sistemas coloidais onde as partículas assimétricas, com orientação ao acaso, ficam inicialmente emaranhadas, formando uma rede, dificultando o escoamento. Com o aumento da taxa de cisalhamento esta rede se rompe e o escoamento é facilitado, diminuindo a viscosidade.

Nos fluidos dilatantes, tem-se um aumento da viscosidade aparente com aumento da taxa de cisalhamento. De acordo com [17], este comportamento deve-se ao efeito da dilatação da polpa, com a água sendo suficiente apenas para preencher os vazios. Com o aumento da taxa de cisalhamento é gerada uma instabilidade na polpa fazendo com que as partículas se movam umas em relação às outras, expandindo a polpa. A água sendo insuficiente para preencher os novos vazios gerados dá lugar ao aparecimento de forças de tensão superficial. Pode ser observada também nos fluidos dilatantes, uma tensão limite de escoamento (yield stress).

As propriedades reológicas, em termos macroscópicos, serão influenciadas pelas interações, em nível microscópico, devido a transferências de energia nessas interações. Os efeitos são: movimento Browniano, hidrodinâmicos, de empacotamento, coloidal e efeito de inércia [18].

É sabido que vários fatores podem influenciar o comportamento reológico de polpas. Estes incluem: porcentagem de sólidos, granulometria e as propriedades químicas das superfícies das partículas. Forças interpartículas, as quais surgem na interface química sólido-solução, cada vez mais domina as interações entre as partículas vizinhas enquanto os tamanhos das partículas da polpa diminuem. Assim, manipulando a química da superfície das partículas pode-se alterar o comportamento reológico da polpa. Uma descrição do comportamento reológico da polpa é importante para identificar as condições ótimas de transporte hidráulico. Por exemplo, a energia requerida para bombear uma polpa pode ser prevista através do “yield stress” e da viscosidade da polpa. Como bombeamento é um processo energeticamente intenso, há, obviamente, um ganho financeiro se a energia requerida para transportar partículas de polpa for reduzida [19].

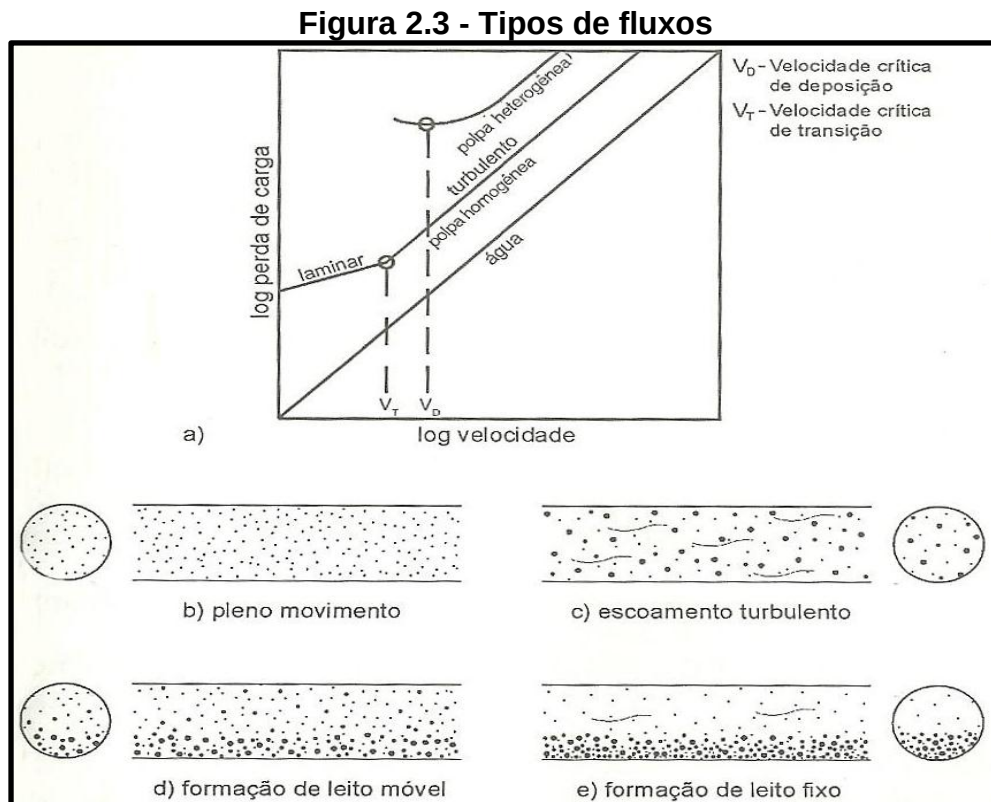
2.1 COMPORTAMENTOS DAS POLPAS

As polpas, quando bombeadas, apresentam comportamento bastante diferente dos líquidos. Estes permitem utilizar uma faixa bastante ampla de velocidade e a natureza do escoamento (laminar ou turbulento) pode ser caracterizada a partir dos conhecimentos 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 limitações próprias de velocidades e parâmetros reológicos e de escoamento.

2.1.1 Tipos de fluxo de polpas

Suspensões coloidais podem manter-se indefinidamente em suspensão estável. Já com as misturas sólidas-líquido usuais no tratamento de minérios, isto constitui-se exceção, a regra sendo as partículas sedimentarem quando em repouso. Para o transporte é necessário que o escoamento tenha certo grau de turbulência, capaz de manter as partículas sólidas em suspensão. Os diversos tipos de fluxo que podem se observados na prática são os seguintes, mostrado na Figura 2.3.



A Figura 2.3a mostra como evolui a perda de carga com a velocidade, em cada um destes escoamentos.

2.1.1.1 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 atingindo o ponto de transição para regime turbulento. A partir deste ponto, as perdas de cargas são proporcionalmente maiores. Em um diagrama log-log, as duas leis são retas de inclinação diferentes.

2.1.1.2 Polpa heterogênea

O transporte de polpa só 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 velocidade do escoamento, o leito móvel desaparece e a perda de carga começa a aumentar.

Temos portanto, um ponto crítico em cada uma das curvas:

Na curva das polpas homogêneas, o ponto de transição de um regime para outro, correspondente a uma velocidade designada V_T (velocidade de transição);

Na curva de polpas heterogêneas, o ponto mínimo perda de carga ou de formação do leito móvel, corresponde a uma velocidade designada V_D (velocidade de deposição).

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

2.1.1.3 Fluxo homogêneo

As partículas sólidas se distribuem de maneira homogênea ao longo de toda a secção da tubulação. Veja na Figura 2.3b e c. Normalmente, partículas menores que 100 μm , 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 percentagens de sólidos elevadas superior a

50% em peso e consumo de energia e baixo desgaste por abrasão. Exemplo típico são as polpas de caulim. Via de regra, estas polpas exibem comportamento não – newtoniano. Também polpas que não estas podem escoar em escoamento homogêneo, desde que a turbulência seja suficiente para manter as partículas em suspensão, como na Figura 2.3c.

2.1.1.4 Fluxo heterogêneo

A concentração das partículas sólidas varia ao longo da secção da tubulação, ela 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 # (1,651mm), ou com sólidos mais finos, de alta densidade, caso típico dos concentrados de minério de ferro. Esta situação pode ser enfrentada, em condições em que as restrições de processo não permitem reduzir a granulometria do sólido a ser transportado. É, portanto uma situação frequente em usinas de beneficiamento bombeamento a pequenas de médias distâncias.

2.1.1.5 Fluxo de 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 saltitação como é verificado na Figura 2.3d.

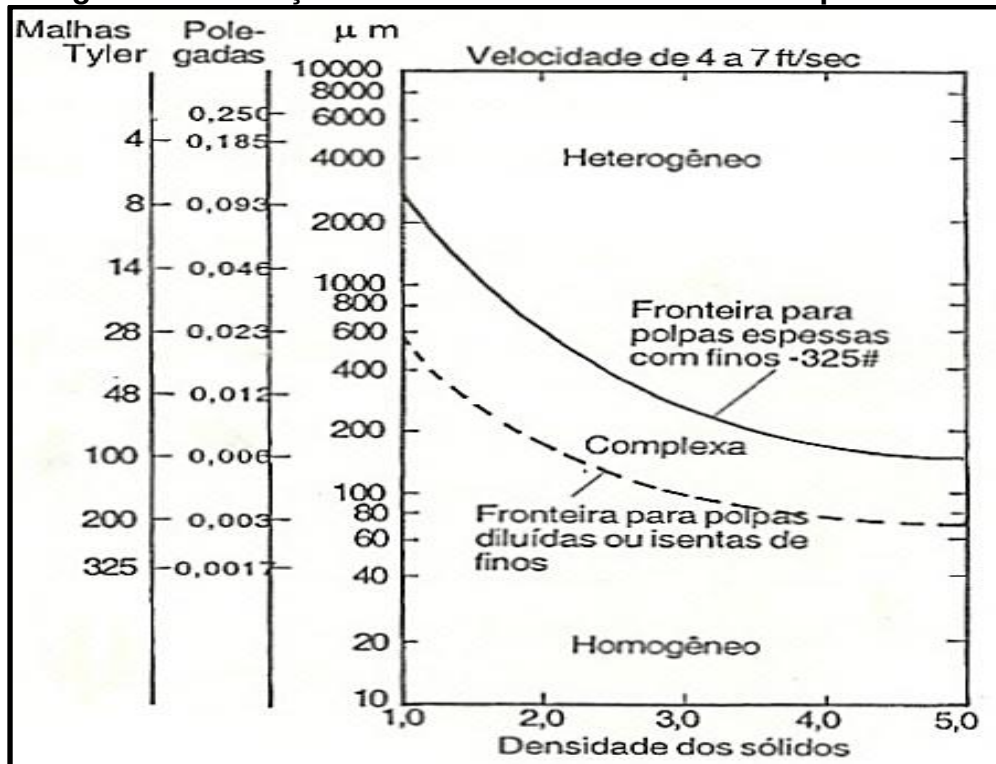
2.1.1.6 Fluxo com leito fixo

Os sólidos depositados no fundo da tubulação deixam de se movimentar aumentando a sua quantidade, a secção útil vai diminuindo progressivamente até o entupimento da linha, Figura 2.3e.

A Figura 2.4 correlaciona densidades e tamanhos de partículas aos fluxos homogêneos e heterogêneos e a uma região de transição entre ambos. Veja nesta figura como a presença de partículas finas, capazes de formar uma polpa homogênea, que mantém as partículas mais grossas em suspensões, a fase

homogênea tem uma determinada densidade e uma dada viscosidade que afeta o comportamento das partículas grosseiras.

Figura 2.4 – relação densidade versus tamanho de partículas



Fonte: [21].

2.1.2 Propriedades de interesse referente á polpa

a) Peso específico (γ_p)

Valor computado a partir do peso específico dos sólidos (γ_s) e sua concentração (C_v).

$$\gamma_p = C_v(\gamma_s - \gamma_1) + \gamma_1 \quad (2.2)$$

b) Viscosidade dinâmica (μ_p) ou Viscosidade cinemática (ν_p)

$$\mu_p = 1,10 \mu_1 (1 + 2,5C_v + 10,05 C_v^2 + 0,00273e^{16,6C_v}) \quad (2.3)$$

Onde,

μ_p = coeficiente de viscosidade dinâmica da polpa

μ_1 = coeficiente de viscosidade dinâmica do líquido (água)

$$\nu_p = 0,0098(\mu_p/\gamma_p) \quad (2.4)$$

Onde,

ν_p = coeficiente de viscosidade cinemática da polpa.

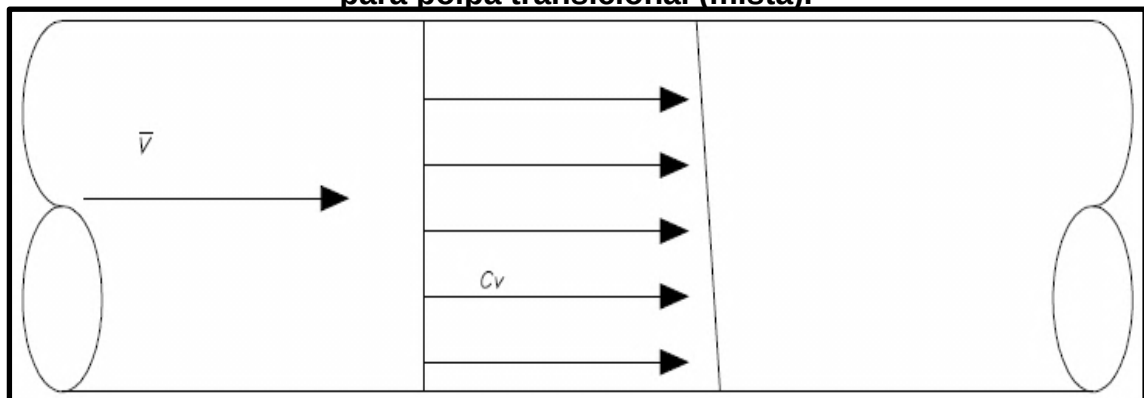
2.1.3 Caracterização do regime de suspensão/escoamento

Conforme defende [22], a polpa poderá apresentar os seguintes regimes de escoamento:

Polpa não-sedimentária: são compostas por partículas mais finas e exibem uma distribuição quase uniforme de concentração no perfil da tubulação, conforme a Figura 2.5. Experiências práticas e testes de laboratórios têm demonstrado que os sólidos das polpas não-sedimentárias possuem velocidades de decantação inferiores ou entre 0,06 a 0,15 cm/s. O comportamento reológico real de uma mistura não-sedimentar pode ser mais bem determinado por ensaios com um viscosímetro rotacional.

Polpas com esse comportamento demandam apenas condições de turbulência branda para efetuar o seu transporte, e via de regra aceitam suspensão dos sólidos mesmo após paradas demoradas.

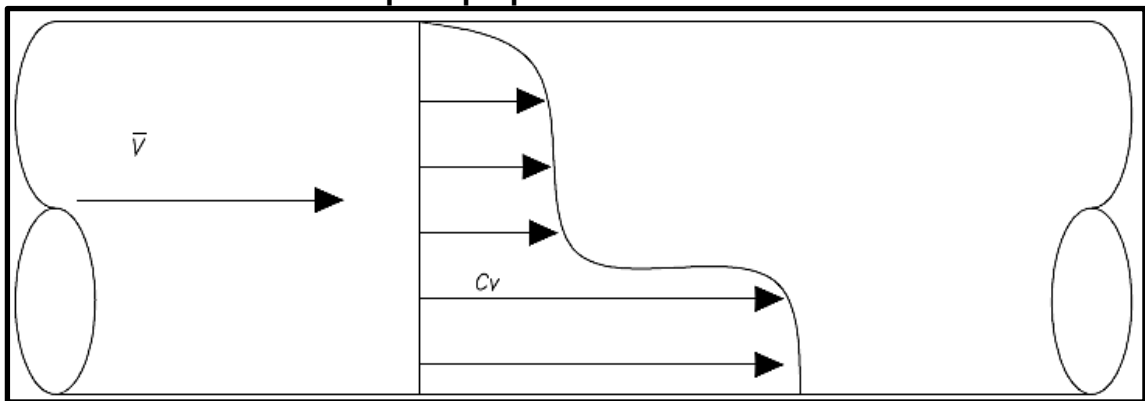
Figura 2.5 - Distribuição da concentração de sólidos no perfil da tubulação para polpa transicional (mista).



Fonte: [22].

Polpa sedimentária: são compostas por partículas sólidas maiores e/ou peso específico maior que não contribuem para as propriedades do meio líquido. A distribuição da concentração dos sólidos no perfil é bastante assimétrica, conforme Figura 2.6. Os sólidos destas polpas têm velocidades de decantação bem superiores a 0,15 cm/s. Estas polpas dependem de altas velocidades de transporte e, portanto, alta turbulência para manter os sólidos em suspensão.

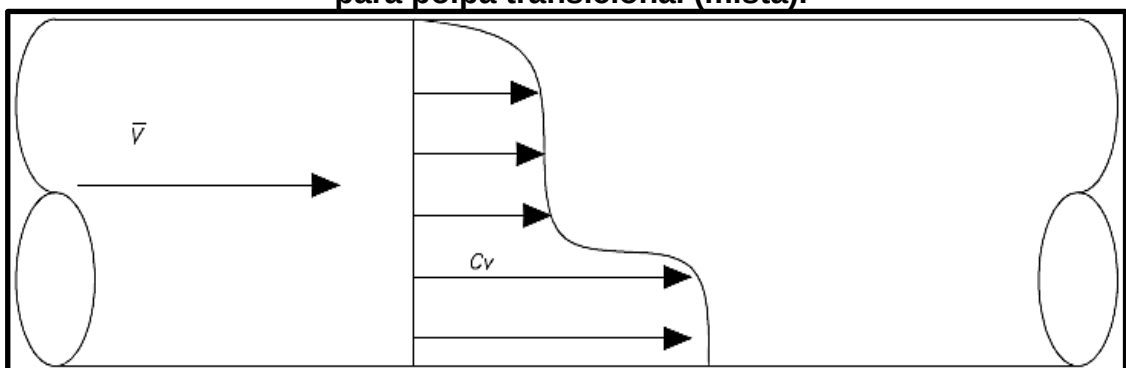
Figura 2.6 - Distribuição da concentração de sólidos no perfil da tubulação para polpa sedimentária.



Fonte: [22].

Polpa Transicional: são polpas que tem um comportamento similar às polpas sedimentárias, percebe-se que sua distribuição de concentração assemelha-se à da polpa sedimentária, conforme a Figura 2.7. A maior parte de todas as polpas que ocorrem no tratamento de minérios se encaixa nesta classificação de comportamento. As partículas finas presentes na polpa fazem com que o fluido fique mais denso e melhore a sustentação, interferindo desta forma na velocidade de decantação.

Figura 2.7 - Distribuição da concentração de sólidos no perfil da tubulação para polpa transicional (mista).



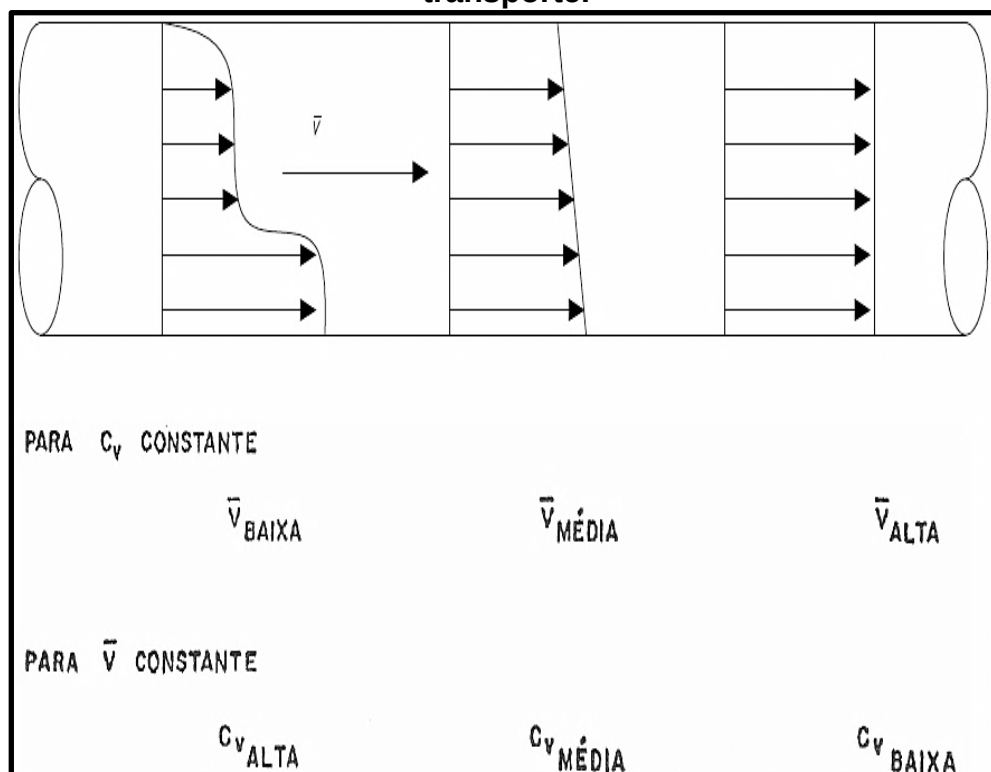
Fonte: [22].

Na prática há três critérios usados para estimar qual fração dos sólidos que irá contribuir efetivamente para o comportamento de meio denso. Conforme [22] o critério apoiado com maior rigor teórico é dos autores [23]. Eles partiram do princípio que todos os finos com uma velocidade de decantação que obedece a lei de Stokes, prestarão sua contribuição ao meio denso. A determinação do diâmetro das partículas que contribuem para o meio denso é calculada pela seguinte equação:

$$d' < 0,12((\gamma_s/\gamma_1)-1)^{1/3} \quad (2.5)$$

A Figura 2.8 mostra os efeitos relativos de concentração volumétrica e velocidade de transporte para polpas transicionais, considerando constantes os valores de granulometria, peso específico e massa transportada. Em condições de baixa velocidade ou alta concentração, a polpa se comporta como uma sedimentária e para altas velocidades ou baixas concentrações, como uma não-sedimentária.

Figura 2.8 - Comparação dos efeitos relativos de concentração e velocidade de transporte.



Fonte: [22].

2.1.4 Determinação do tipo de polpa

A determinação do tipo de polpa é sempre o primeiro passo na análise de manuseio de uma polpa, seja qual for o seu tratamento: bombeamento, escoamento por gravidade, agitação, etc.

Podemos citar conforme [22] defende os dois parâmetros que qualificam a polpa são sua velocidade de decantação (W_s) e sua viscosidade (μ_p). O cálculo da viscosidade é realizado utilizando-se a equação 2.3 e o cálculo da velocidade de sedimentação livre é feito considerando-se os procedimentos descritos a seguir.

- a) A partir da granulometria, determinam-se os diâmetros $d_{\text{máx}}$ ("top size"), o d_{mp} (médio ponderado), o d_{50} e o d_{repr} (diâmetro representativo), os diâmetros que representam essa polpa usualmente adotados são o d_{50} ou d_{repr} (diâmetro representativo);
- b) Calcula-se as velocidades de sedimentação para os diâmetros de partículas mencionadas acima, seguindo-se a seguinte sequência de análise:
 - 1) Determinar o número de Arquimedes (Ar) para classificar o regime de decantação livre, ou seja, definir o regime de transição.

$$Ar = \frac{\pi/6 (\gamma_s - \gamma_l) (d_i/10^3)^3}{g\mu_l^2} \quad (2.6)$$

Onde:

$$Ar \leq 3\pi \quad \text{Indica regime laminar} \quad (2.7)$$

$$3\pi < Ar < 10^5 \quad \text{Indica regime transicional} \quad (2.8)$$

$$Ar \geq 10^5 \quad \text{Indica regime turbulento} \quad (2.9)$$

- 2) Dependendo do regime de escoamento determinado no item acima se escolhe uma das três equações para calcular o coeficiente de arrasto (C_d). O coeficiente, número ou módulo de Reynolds (abreviado como Re) é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície.

$$Cd = 24/Re \quad \text{Regime laminar} \quad (2.10)$$

$$Cd = (24/Re)(1+0,15Re^{0,687}) \quad \text{Regime transicional} \quad (2.11)$$

$$Cd = 44 \quad \text{Regime turbulento} \quad (2.12)$$

3)A partir deste ponto realizam-se cálculos iterativos para os valores de Ws e Re , correspondentes aos diâmetros das partículas: $d_{m\acute{a}x}$, d_{mp} , d_{50} e d_{repr} , aplicando-se as seguintes equações abaixo:

$$Ws = 2((g \, di) / 3 \, Cd) * (\gamma_s - \gamma_l) / \gamma_l)^{1/2} \quad (2.13)$$

$$Re = (Ws \, di) / \nu_p = (Ws \, di \, \gamma_p) / \mu_p \quad (2.14)$$

Nota-se que o número de Reynolds deverá ser calculado em função da viscosidade da polpa. Os valores obtidos para Ws , Cd e Re , respectivamente, são válidos apenas para os casos de baixa concentração de sólidos, já que as equações teóricas foram desenvolvidas para a decantação desimpedida ou livre.

Para a computação das velocidades de sedimentação para médias e altas concentrações de sólidos, isto é, $C_v > 10\%$, aplica-se uma fórmula empírica de ajuste conforme a equação descrita abaixo:

$$Ws' = Ws (1-C_v)^m \quad (2.15)$$

O valor de m muda do seguinte modo:

$$\text{Para,} \quad Re < 0,5 \quad m = 4,65 \quad (2.16)$$

$$0,5 \leq Re \leq 1300 \quad m = 4,375 (Re)^{-0,0875} \quad (2.17)$$

$$Re > 1300 \quad m = 2,33 \quad (2.18)$$

Os valores calculados para Ws' representam as velocidades retardadas de decantação, devido à porcentagem de partículas presentes na polpa.

Nos projetos de manuseio de polpas com baixas concentrações de sólidos utiliza-se os valores de Ws e para polpas com médias ou altas concentrações de sólidos utiliza-se os valores de Ws' . Porém, alguns fatores tais como a presença de reagentes, pH, etc. pode influenciar na seleção final da “velocidade projeto” de decantação.

Conforme visto, o número de Arquimedes tem valor adimensional e aponta o tipo de polpa (a não sedimentária correspondente ao regime laminar, a transicional correspondente ao regime transicional e a sedimentária correspondente ao regime turbulento). Por isso, recomenda-se uma análise cautelosa da granulometria para escolher um diâmetro (d_i) realmente representativo. Entretanto em casos de dúvidas a elaboração de ensaios de laboratório ajudará nas considerações relativas ao sistema de transporte.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS

O problema de caracterizar um sólido particulado é de prever suas características. Encontramos sólidos particulados ao efetuarem muitas operações unitárias – por exemplo, na moagem, na secagem, na filtração, na cristalização, na reação entre sólidos e fluidos, na coleta de poeira – que constituem parte de qualquer processo de obtenção de produtos sólidos [24].

As partículas sólidas individuais se caracterizam pelo seu tamanho, forma e densidade. Os sólidos homogêneos têm a mesma densidade que o material inteiro. As partículas obtidas com o rompimento de um sólido composto, como os materiais cerâmico, têm várias densidades, que geralmente são diferentes da densidade do material inteiro.

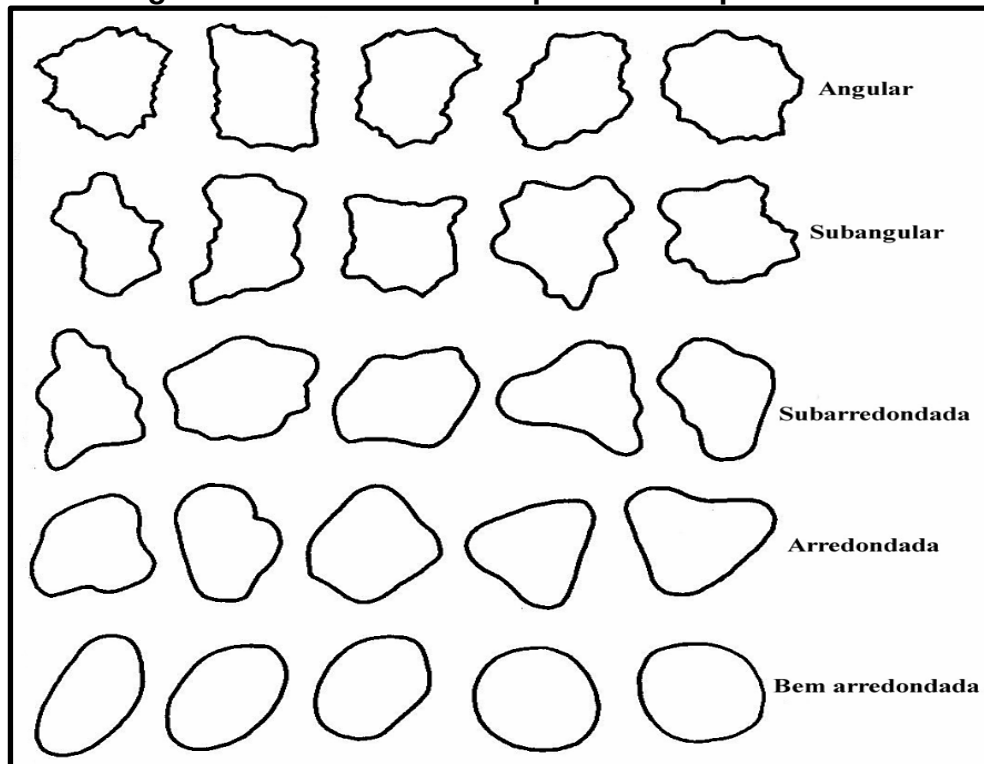
2.2.1 Formas das partículas sólidas

Quando as partículas do material são todas iguais, o problema da determinação de seu número, volume e superfície externa são bastante simples. Consideremos uma partícula isolada. Seu tamanho poderá ser definido pela dimensão livre de maior importância, como o diâmetro, no caso de partícula esférica, o comprimento da aresta se ela for cúbica [25]. No caso de partículas de outras formas geométricas ou irregulares, uma dimensão deverá ser arbitrariamente escolhida. Geralmente a dimensão imediatamente abaixo da maior é preferida, porque é a que mais se aproxima do tamanho obtido experimentalmente. Em geral, podem ser especificar “diâmetros” similares para qualquer partícula equidimensional. A forma da partícula é comumente caracterizada através da esfericidade, apesar de não se conhecer qualquer argumento científico para assim fazê-lo.

Quanto á forma, as partículas dos matérias granulares como pedregulhos e areias, se aproximam de uma esfera e a sua caracterização do tamanho de partícula é definida por uma medida linear.

As Formas da sua superfície podem ser: Angular, subangular, subarredondado, arredondado, e bem arredondado.

Figura 2.9 – Formas das superfícies de partículas.

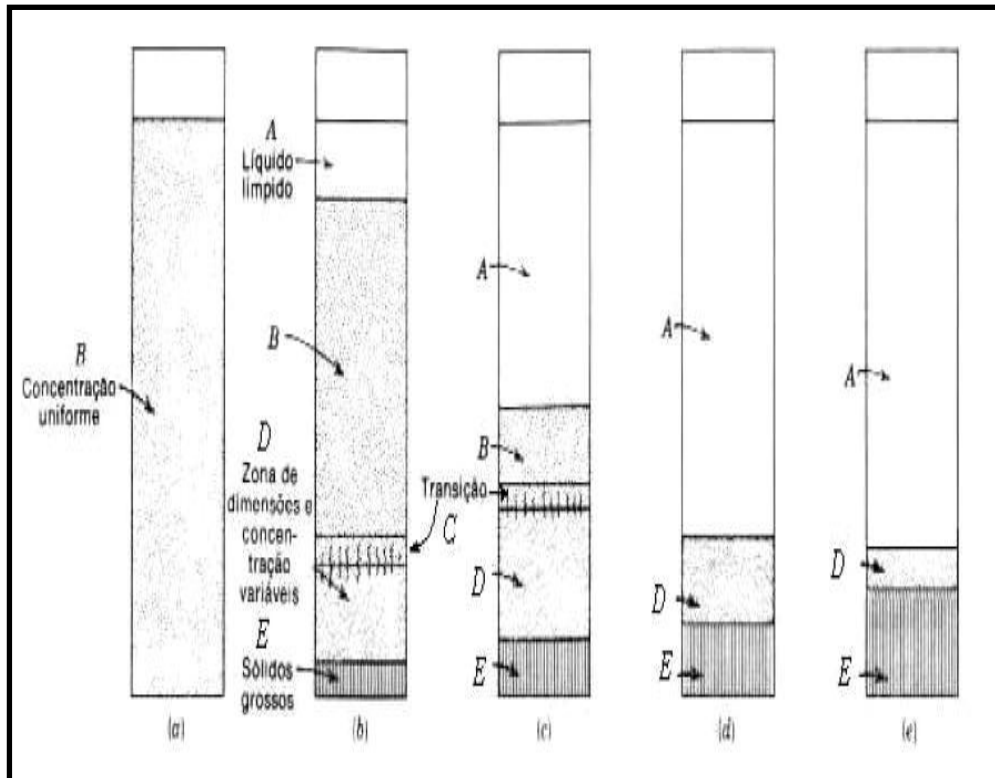


Fonte [26].

2.2.2 Medições do tamanho das partículas pelo método de sedimentação

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

Durante esse teste pode ser observado, após um tempo, a existência de cinco regiões distintas: uma região de líquido clarificado, a de sedimentação livre e a de compactação. O mecanismo da sedimentação descontínua auxilia na descrição do processo contínuo, com o uso do teste de proveta, que é baseado no deslocamento da interface superior da suspensão com o tempo.

Figura 2.10 - Mecanismo da sedimentação descontínua

Fonte: [27].

A região A mostra o líquido clarificado. 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. Na região B ocorre a suspensão com a mesma concentração inicial, ou seja, a linha que divide A e B é geralmente nítida.

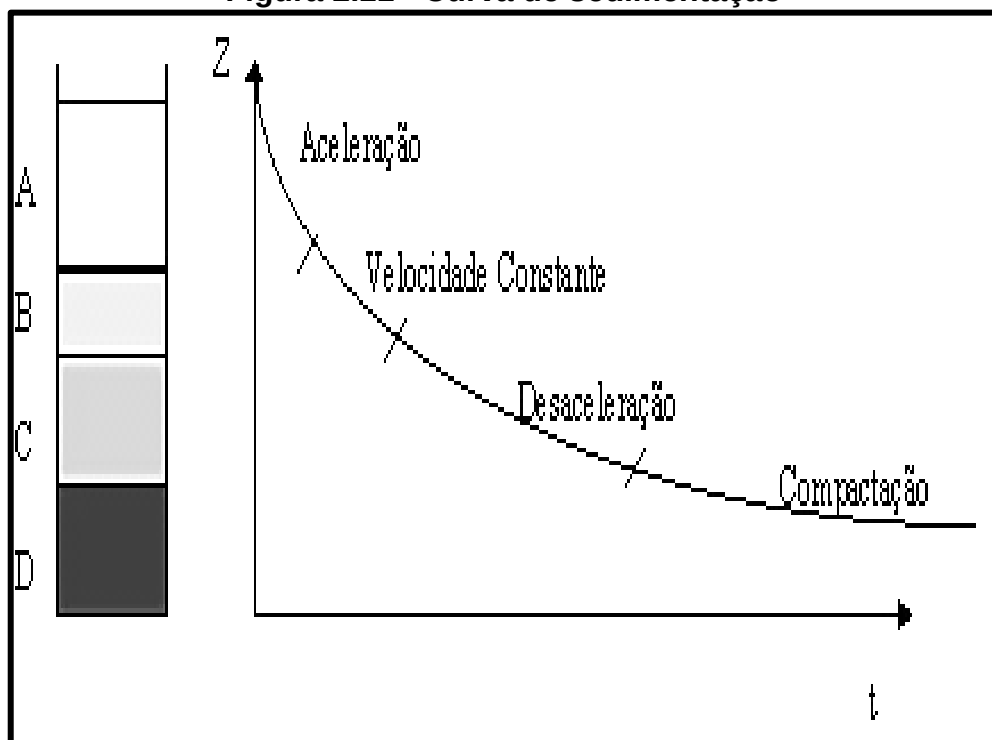
A zona C é a zona de transição. A concentração da suspensão aumenta gradativamente de cima para baixo, variando entre o valor inicial até a concentração da suspensão espessada. A interface BC é, de modo geral, é pouco nítida. Já a região D mostra a suspensão espessada na zona de compressão, ou seja, é a suspensão onde os sólidos decantados sob a forma de flocos se encontram dispostos uns sobre os outros, sem atingirem a máxima compactação. A separação entre as zonas C e D geralmente não é nítida e apresenta diversos canais através dos quais o líquido proveniente da zona em compressão escoar. A espessura desta zona vai aumentando durante a operação.

A última região, a região E, apresenta os sólidos grosseiros que foram decantados logo no início do ensaio. A espessura desta zona praticamente não varia durante o ensaio, apenas no final da decantação é verificado o aumento da mesma.

Além disso, na Figura 2.10 pode se observar a evolução da decantação com o tempo. As zonas A e D tornam-se mais importantes, enquanto a zona B diminuiu e C e E permaneceram inalteradas. Ao final do processo B e C desapareceram, ficando apenas o líquido clarificado, a suspensão em compressão e o sedimento grosso. Este também é chamado ponto de compressão, ou ponto crítico. A zona A aumenta enquanto que a zona D diminui lentamente até a superfície de separação das camadas A e D atingirem o valor. Este valor mínimo não corresponde necessariamente a concentração máxima da suspensão decantada, pois é possível, com agitação apropriada, reduzir ainda mais a altura da lama espessada.

É verificado na Figura 2.11 que as partículas sedimentam com diferentes velocidades influenciadas tanto pelo formato da partícula como pelas peculiaridades de cada zona durante o processo de sedimentação.

Figura 2.11 - Curva de sedimentação



Fonte: [28].

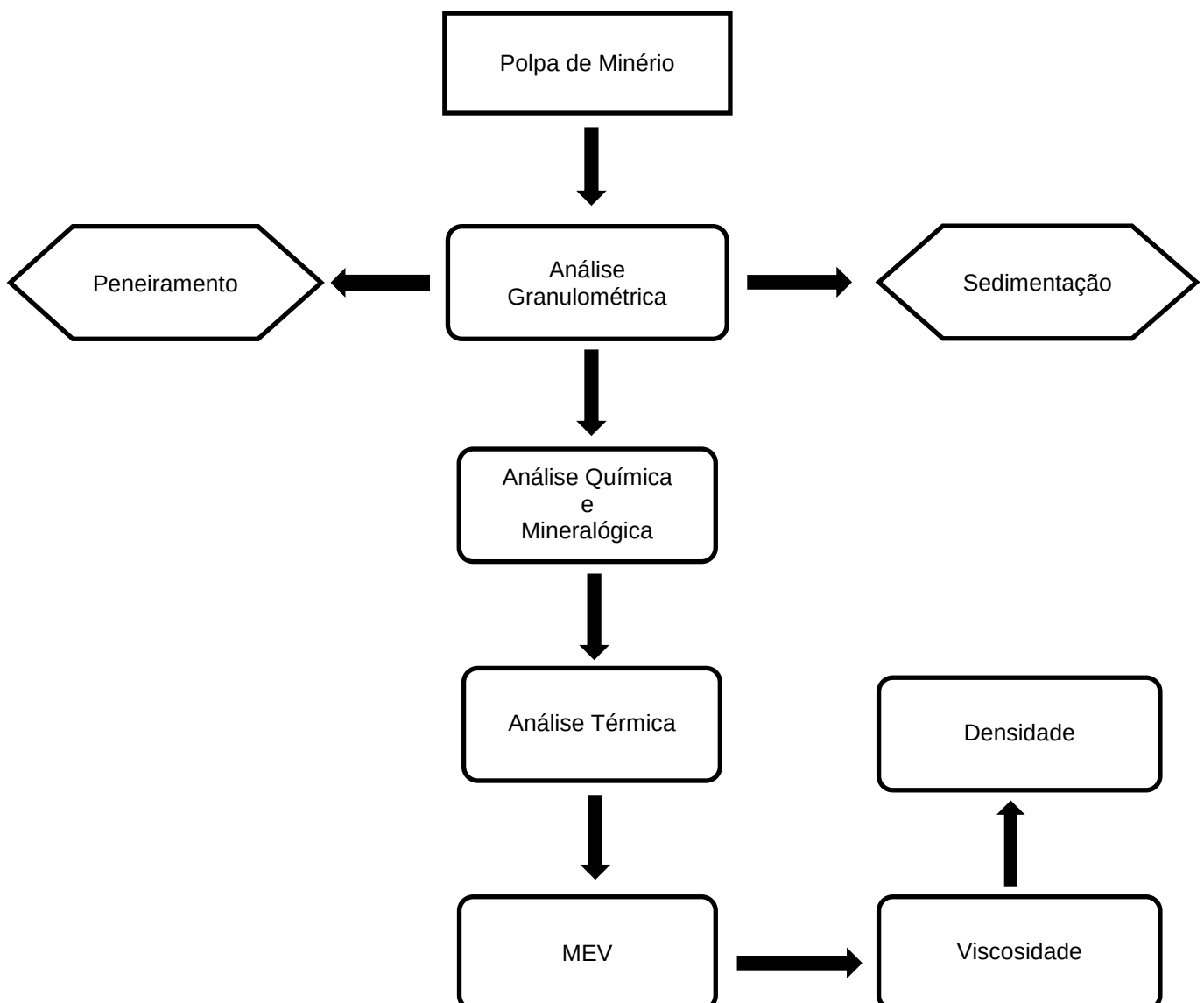
3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 MATERIAL

A polpa de minério é proveniente de uma mina de ouro a céu aberta e subterrânea, além da prospecção para minério de ferro, cobre e urânio, esta é localizada próxima à cidade de Rio Maria, no estado do Pará, Brasil. Os ensaios realizados com a amostra de polpa de minério seguem as respectivas normatizações técnicas descritas abaixo:

3.2 MÉTODO

3.2.1 FLUXOGRAMA DE CARACTERIZAÇÃO DA POLPA DE MINÉRIO



3.2.2 Análise granulométrica

A Polpa de minério foi seca na estufa na temperatura de 100 °C durante 24h. As peneiras foram colocadas em um agitador mecânico (MAQ.2336, SERIE 08.05 BIVOLTS) umas sobre as outras, na ordem crescente de abertura das malhas, ou seja, a peneira com menor abertura (0.075mm) primeira peneira e a de maior abertura (1.18 mm) que fica no topo, durante 10 minutos. Abaixo da primeira peneira há uma panela que recolhe a fração que contém as partículas mais finas do material que não foram retidas por nenhuma peneira.

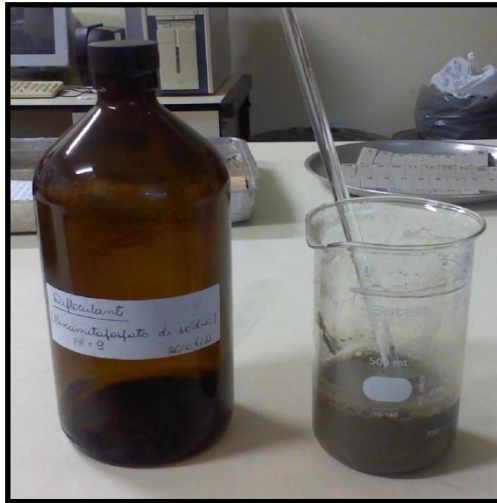
Ao final do ensaio pesa-se a massa da amostra retida em cada peneira e da panela do fundo, somam-se as massas para obter a massa total da amostra, sendo possível assim obter as frações mássicas ou porcentagens retidas e acumuladas em cada peneira [29].

3.2.3 Sedimentação

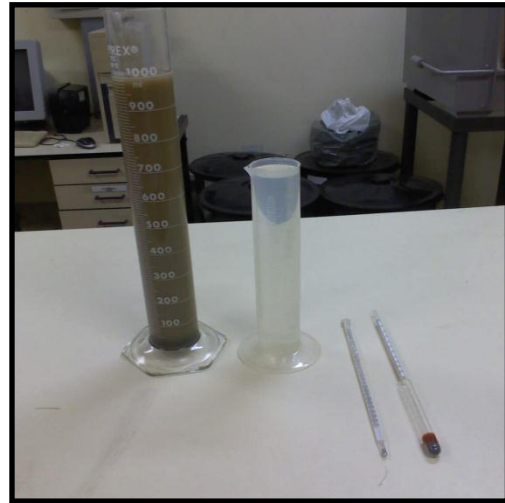
O material sólido retido na peneira de #200 mesh (0,075 mm) foi seca em estufa na temperatura de 100 °C por 24 h em seguida foi peneirado na peneira de abertura 2 mm, posteriormente transferida a um béquero de 250 ml, misturado com 125 ml de solução de hexametáfosfato de sódio de pH 9, deixada em repouso por 24 h, este tem a função de impedir a imediata aglomeração das partículas e mantê-las em maior tempo em suspensão, depois de decorrido tempo a solução foi vertida em um dispersor de solos (MODELO 127, 220 V) que sofreu ação do aparelho por 15 min.

Por conseguinte, a dispersão foi transferida para uma proveta de 1000 ml e adicionado com água destilada através de uma pisseta para completar o volume de 1000 ml da proveta e em seguida a proveta foi agitada e colocada em repouso sendo feita as leituras da distância h a cada 4, 8,15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

Figura 3 -a) Solução de hexametáfosfato de sódio
b) Ensaio de sedimentação



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Baseando-se na lei de Stokes que estabelece que partículas em suspensão num fluido sedimentem com diferentes velocidades dependendo do seu diâmetro, sendo assim, foram feitos os cálculos da velocidade de sedimentação, diâmetro de partícula e área superficial específica do material a partir das seguintes fórmulas respectivamente:

$$v = d^2 (\rho_2 - \rho_1)g / 18\mu \quad (3.1)$$

$$d = [(1800 \mu / \rho_2 - \rho_1) \cdot (g/t)]^{1/2} \quad (3.2)$$

$$S = 6/d \cdot \rho_s \quad (3.3)$$

3.2.4 Espectrometria de fluorescência de raios-X

A determinação da composição química da amostra foi realizada por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, utilizando espectrômetro WDS sequencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potencia 2,4 KW.

A amostra foi analisada no modo de preparação disco fundido: 1 g de amostra + 6 g de fundente (Tetraborato de Lítio - Li₂B₄O₇), mistura fundida a 1000 °C por 10 min.

A Perda ao Fogo (PF) foi determinada com a queima a 1000 °C, após secagem a 105 °C. As aquisições e tratamento dos dados foram realizados através do software SuperQ Manager da PANalytical.

3.2.5 Difração de raios-X

A análise foi realizada em Difratorômetro de raios-x modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha_1$ 1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. O detector utilizado é do tipo RTMS, X'Celerator.

A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore versão 2.1b, também da PANalytical. Foram utilizadas as seguintes condições de análise: Voltagem (kV): 40; Current (mA): 30; Scan range (° 2 θ): 5-75°; Stepsize (° 2 θ): 0,02; Scanmode: Continuous; Counting time (s): 5; Divergenceslit: SlitFixed 1/8°; MaskFixed 10 mm; Anti-scatterslitName: SlitFixed 1/4°; a amostra foi pulverizada em gral de ágata em granulometria compatível e preenchidas em porta amostra específico para a análise.

3.2.6 Análise térmica

A análise térmica foi realizada em um equipamento simultâneo de Termogravimetria (TG) e de Análise Térmica Diferencial (ATD) da Shimadzu, com atmosfera de nitrogênio. Tomaram-se 20 mg de amostras desde a temperatura ambiente até 1100°C, utilizando razão de aquecimento de 20°C/min. Alfa alumina foi utilizada como material de referência para as análises de ATD.

3.2.7 Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A técnica de microscopia eletrônica de varredura foi empregada para a determinação da morfologia das partículas da polpa de minério. Para tanto, uma fita de carbono foi usada para fixar o material analisado no microscópio eletrônico de varredura. O emprego da fita de carbono foi para evitar que partículas caiam na câmara de ionização e causem danos físicos ao MEV.

3.2.8 Viscosidade

O ensaio de viscosidade foi realizado no equipamento Viscotester 6L-HAAk, com spindler tipo L1, nas condições de taxa cisalhamento 100S-1 e temperatura de 28 °C.

3.2.9 Densidade

A amostra foi seca em estufa a 100 °C por 24h e esfriada em dessecador, em seguida foi recolhido 10 g do material, a princípio foi pesado o picnômetro seco (P1) e em seguida o picnômetro mais amostra (P2) e então foi adicionada água até a metade do volume do picnômetro que posteriormente foi aquecido em uma chapa de aquecimento por 15 minutos, sempre agitando o picnômetro para evitar o superaquecimento, essa etapa visa retirar todo o ar existente entre as partículas do material.

O picnômetro foi deixado em repouso ao ar livre até que sua temperatura se estabilizasse para que em seguida fosse adicionada água destilada para completar o volume do picnômetro, e manejado para um banho de água à temperatura ambiente durante 15 minutos juntamente com termômetro para definir a temperatura do banho e então foi novamente pesado e obteve-se o valor de (P3).

E por fim o picnômetro foi lavado e retirado todo o material de dentro do mesmo para que fosse ser preenchido novamente com água destilada, o qual ficou em repouso por 15 minutos acompanhado de um termômetro e encerrando a etapa com uma nova pesagem definindo o (P4).

O ensaio foi repetido duas vezes que é o mínimo para validar o experimento, o qual se obteve discrepâncias aceitáveis inferiores a 0,009 de um ensaio para outro como foi descrita na norma [30], constando como densidade a média dos dois valores obtidos e corrigidos de acordo com a temperatura de ensaio.

$$D_t = (P_2 - P_1) / (P_4 - P_1) - (P_3 - P_2) \quad (3.4)$$

$$D_t = K_t \times D_t \quad (3.5)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O histograma abaixo representa a massa retida em função do tamanho de partículas. Observando que o material passante pela peneira de 200 mesh (0,075mm) há uma certa quantidade de silte, sendo que seu tamanho de partícula é caracterizado na faixa abaixo de 0,02mm e acima de 0,002 mm o que define uma fração siltosa teoricamente maior em relação a quantidade de argila, pois este, começa a ser retido a partir da quarta peneira de 70 mesh (0,212 mm) .

A massa total a partir da Tabela 4.1 é de 113 g sendo equivalente a 100%, entretanto houve perdas de material durante a realização do ensaio granulométrico. Para início do procedimento foi utilizado cinco peneiras (1,18; 0,600; 0,212; 0,150; 0,075 mm) e uma bandeja coletora (BC).

Os dados obtidos por peneiramento foram complementados pela análise de sedimentação gravítica da amostra.

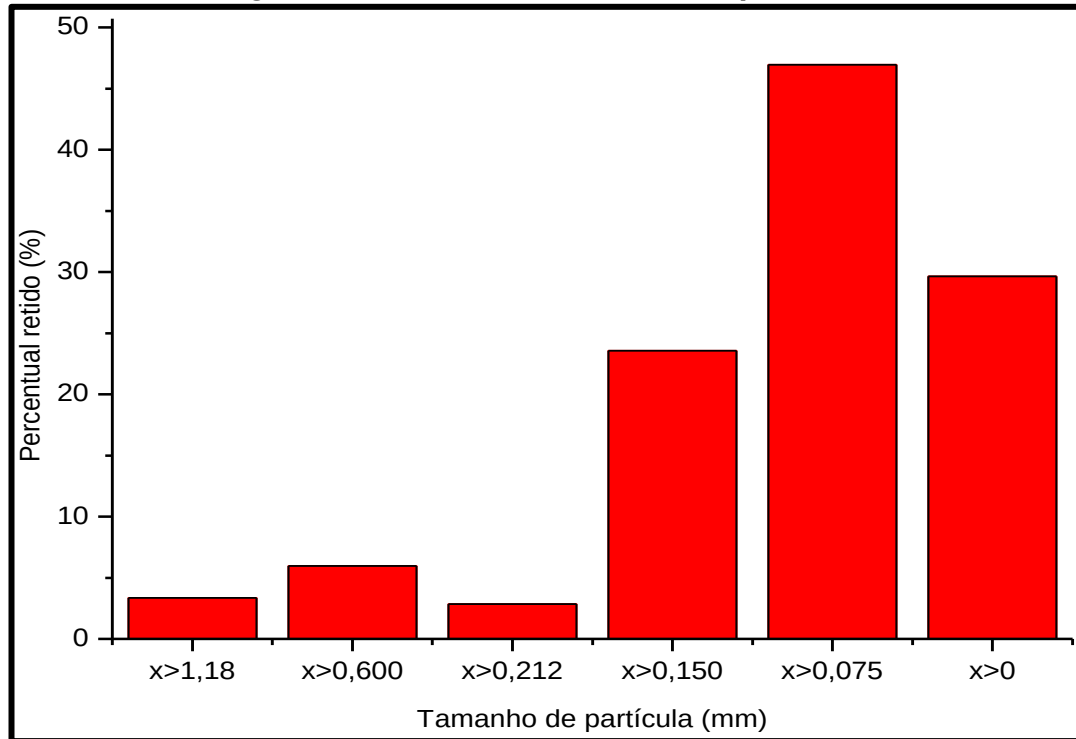
Tabela 4.1 – Classificação granulométrica por peneiramento.

Abertura (mm)	Peso da peneira (g)	Peneira + Material (g)	M. retido acumulado (%)	M. passante Acumulada (%)
1,18	318,9	320,2	3,36	3,36
0,6	283,8	287,7	5,96	9,32
0,212	298,3	299,1	2,86	12,18
0,15	266,6	288,1	23,56	35,74
0,075	257,3	302,2	46,96	82,70
BC	254,3	294,3	29,66	112,36

Fonte: Autor.

De acordo com os dados da Figura 4.1, observamos que cerca de 46,96 % do material é constituído de partículas com tamanho na faixa correspondente à areia fina na forma sólida. Considerando que o método de peneiramento não garante a completa desagregação dos grãos e a segunda maior faixa de retenção de material encontra-se na faixa granulometria pertencente a argila e silte, foi realizado o cálculo para determinar o teor de argila e material friável constando 99,23%, dessa forma conclui-se que o material é classificado como silto-argiloso.

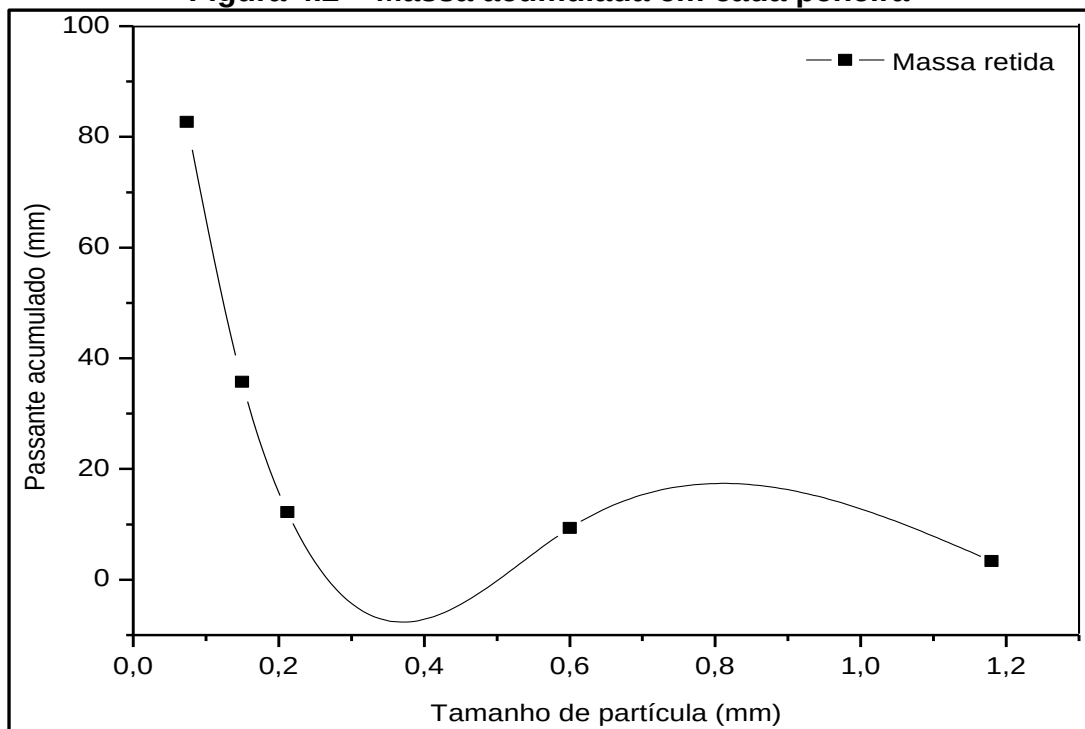
Figura 4.1 - Massa retida em cada peneira



Fonte: Autor.

Na Figura 4.2 é traçada a curva granulométrica do material passante acumulado em todas as peneiras.

Figura 4.2 – Massa acumulada em cada peneira



Fonte: Autor.

Tabela 4.2 - Tabela ilustrativa para coleta de dados

Tempo (min)	Altura (cm)	Densidade de Sólidos em suspensão (g/ml)	Diâmetro esférico equivalente (μm)	Velocidade de Sedimentação (cm/s)	(ASE) (m^2/g)
4	2	22	91,275	63,39	0,255
8	3	21	79,046	47,54	0,295
15	4	20	66,658	33,81	0,350
30	6	19	57,727	25,35	0,404
60	10	14	52,697	21,13	0,443
120	14	12	44,090	14,79	0,530
240	20	10	37,263	10,58	0,627
480	32	07	33,329	8,45	0,701
1440	240	04	22,697	3,92	1,030

Fonte: Autor.

Através dos resultados da análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, observamos que há certa quantidade de partículas finas na polpa que não foram retidas na ultima peneira cerca 27,6 % do material possui tamanho abaixo de 75 μm , como é observado na Figura 4.1, e com a ampliação da análise pelo método de sedimentação foi possível prever partículas com diâmetro de até 22 μm , conforme mostra a Tabela 4.2, Por conseguinte foi calculada a área superficial específica através da equação 3.3, percebe-se que a medida que as partículas diminui seu tamanho esférico equivalente, cresce a ASE o que irá propiciar maior interação eletrostática entre partícula-partícula e/ou partícula de o meio. Levando em consideração que o ensaio durou apenas 24h, não foi o tempo suficiente para a completa sedimentação da amostra.

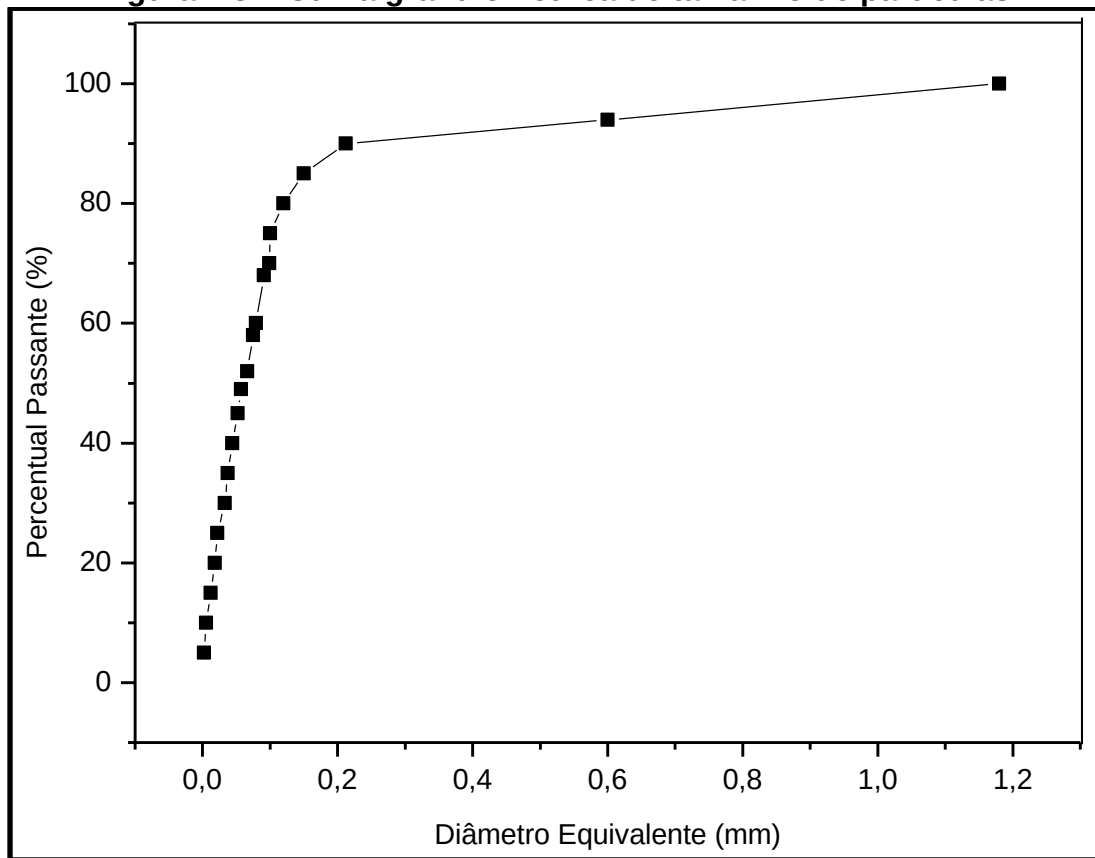
A velocidade de sedimentação de uma partícula é função de sua forma, densidade, tamanho, superfície sólida na vizinhança, concentração local e da viscosidade do fluido no qual está imersa, e o aumento da concentração local faz com que a velocidade de sedimentação da partícula diminua (sedimentação impedida), na medida em que decresce a área livre de ascensão do fluído e para efeito de escoamento, o que explica a redução da velocidade de sedimentação a medida que as partículas decantam.

A presença de finos pode causar aumento da viscosidade aparente [31] e particularmente, no caso da proporção de partículas coloidais serem alta, os efeitos de carga e demais propriedades da superfície das partículas passam a ter relevância no comportamento de fluxo da suspensão. De modo geral, a coesão do material

sedimentado, além dos fatores já citados também é favorecida pela presença de minerais cimentantes como calcita que possui esta característica, sendo um dos minerais constituintes da polpa.

Através dos resultados obtidos, foi feita a curva granulométrica completa da polpa, conforme mostra a Figura 4.3. Alguns valores de porcentagem de sólido em suspensão coincidiram com diferentes diâmetros, mas nada que comprometa a curva granulométrica.

Figura 4.3 – Curva granulométrica de tamanho de partículas



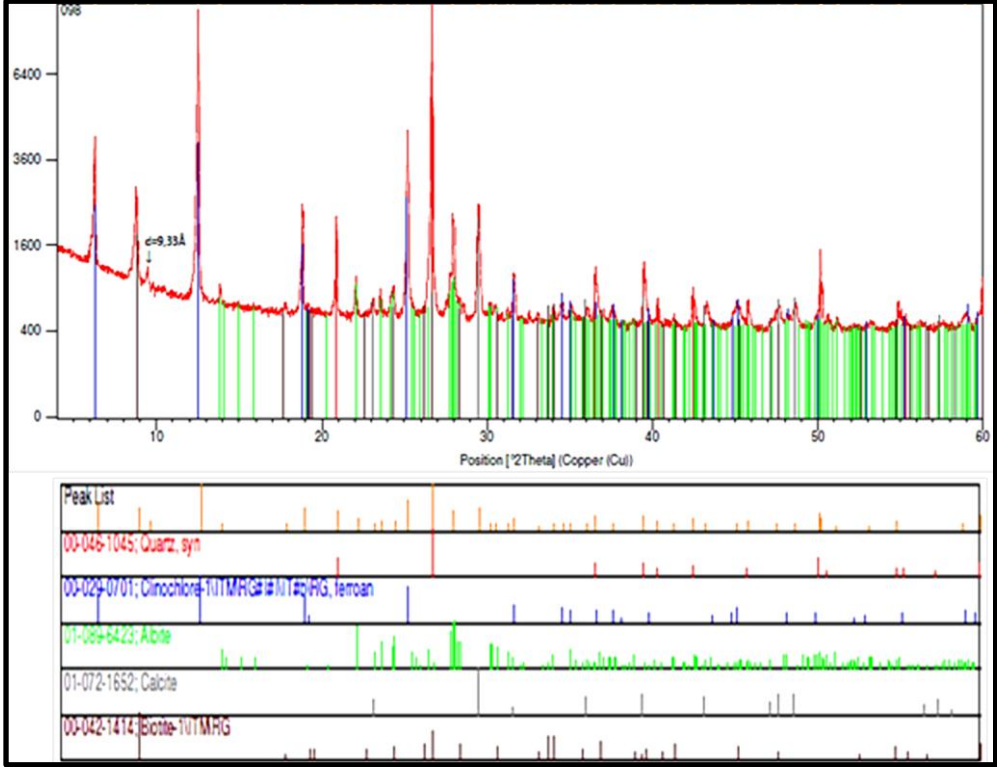
Fonte: Autor.

4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A amostra apresenta muitas fases minerais, típica de rochas sedimentares, carbonáticas, graníticas, pegmatíticas e hidrotermais, com quartzo em abundância, clinocloro (um tipo de clorita), albita (um tipo de feldspato), calcita e biotita. A grande quantidade de quartzo e seu elevado grau de orientação dificultam a identificação e caracterização das demais fases presentes, neste caso há um pico pequeno em

9,33 Å, não identificado, que pode estar relacionado a vários minerais (zeólita, anfibólio, dentre outros).

Figura 4.4 – Difratoograma da amostra sólida



Fonte: Autor.

4.3 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A Tabela 4.3 mostra os resultados da análise química para determinação dos teores semiquantitativa da composição da polpa de minério.

Tabela 4.3 - Composição semiquantitativa da polpa de minério

Elementos	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	P.F.
Conce. (%)	10,46	7,88	9,44	0,67	3,77	0,10	3,16	0,54	55,90	1,08	7,00

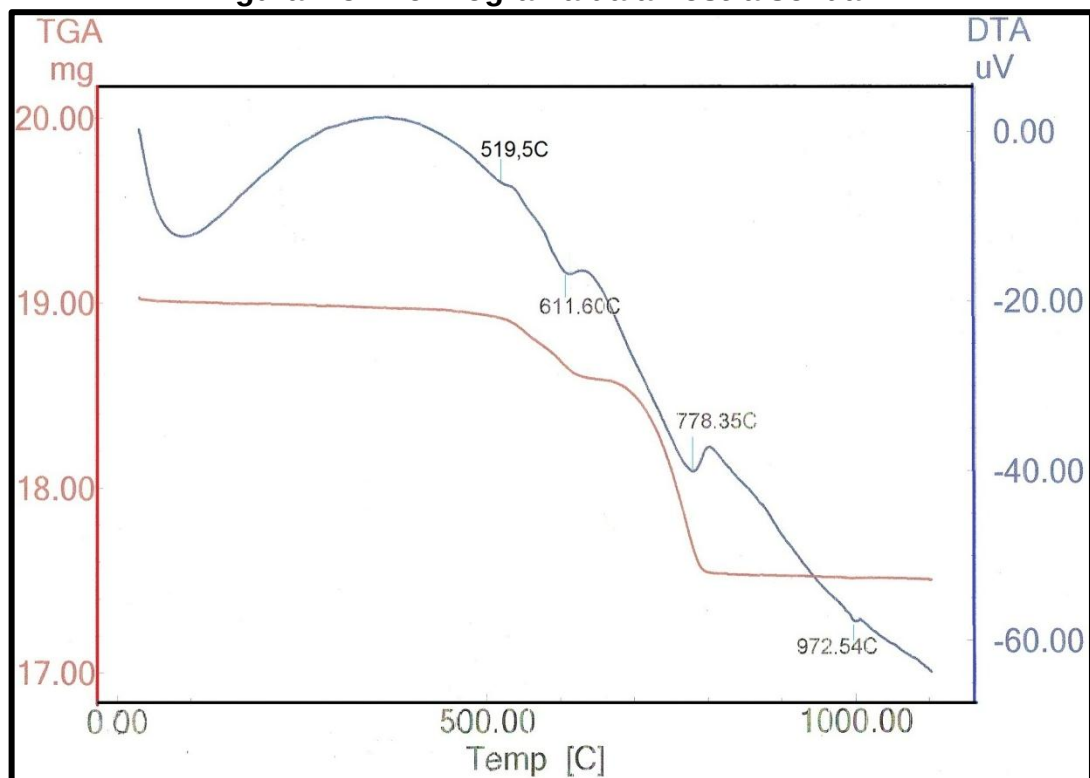
Fonte: Autor.

Os resultados da análise química refletem, em grande parte, a mineralogia descrita anteriormente. Os teores mais elevados de SiO₂ e Al₂O₃ estão relacionados ao quartzo e aos outros aluminosilicatos presentes, como a clorita e o feldspato. O teor de CaO (7,88%) esta relativamente elevado para a maioria das rochas (exceto

calcários) e reflete a quantidade relativamente elevada de calcita presente na amostra. O Fe_2O_3 também, esta relativamente alta (9,44%), pois esta na estrutura de minerais como clorita e biotita, abundantes na amostra, além de outros possíveis minerais de Fe (por ex., magnetita), que podem estar em pequenas quantidades e por isso não foram identificados na DRX. O Mg também esta relacionado a estrutura da clorita e biotita, enquanto o Na deve estar associado ao feldspato (albita). A Perda ao Fogo reflete o conteúdo de voláteis, neste caso, principalmente da calcita, além da clorita e biotita, que não apresentam H_2O , mas OH nas suas estruturas.

4.4 ANÁLISE TÉRMICA

Figura 4.5 - Termograma da amostra sólida



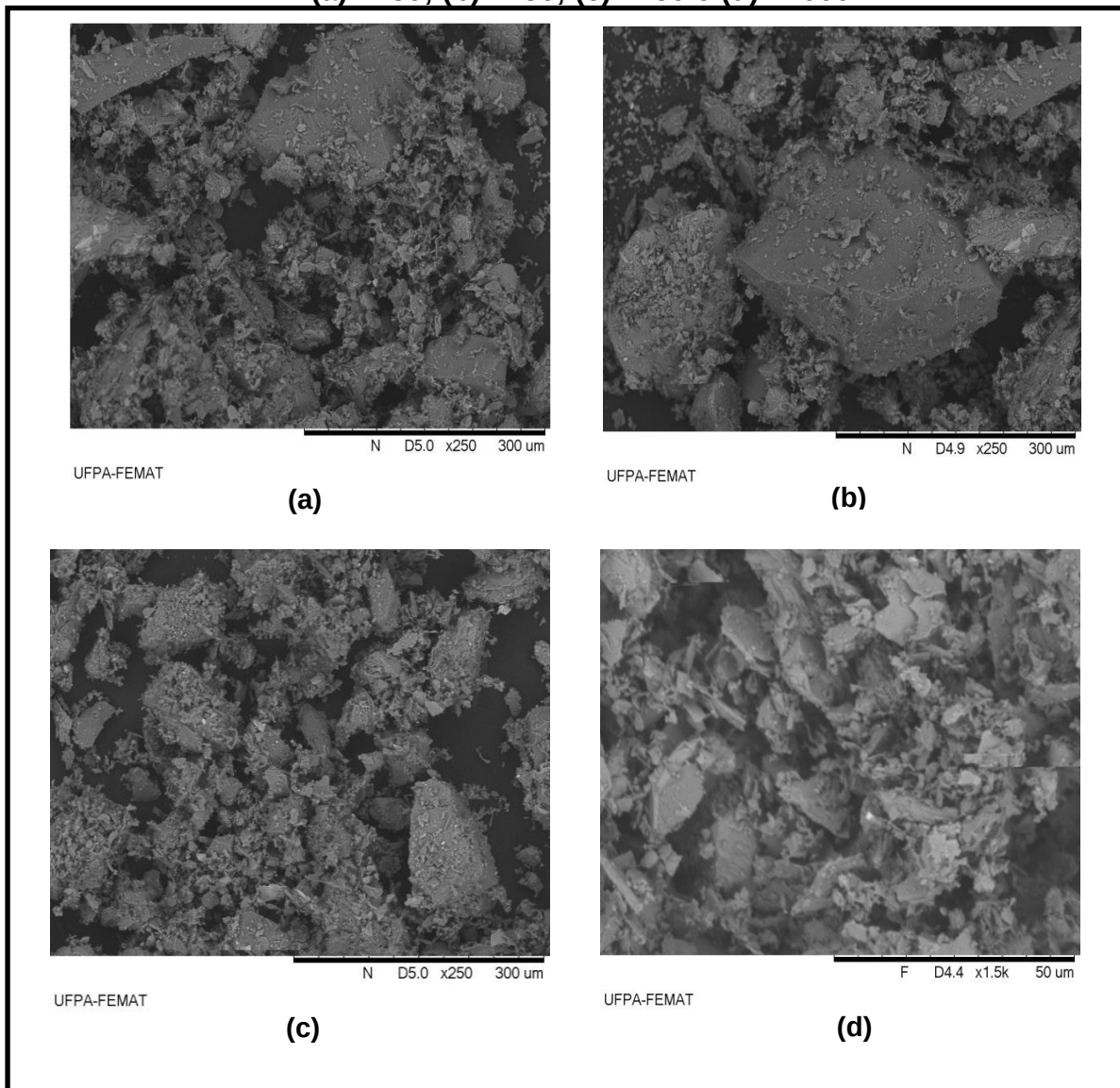
Fonte: Autor.

De acordo com o termograma da amostra sólida da curva TGA é possível perceber que houve perdas substanciais de matéria orgânica ou água adsorvida entre 80°C e 110°C, por conseguinte a curva DTA identifica um pico endotérmico muito pequeno realçado a 519,5°C correspondente a transformação polimórfica do quartzo α para β e dois picos situados a 611,60°C e 778,35°C referente a formação de voláteis proveniente da descarbonatação da calcita, e desidroxilação da clorita

e biotita respectivamente, o pico exotérmico apresentado na temperatura de 972,54°C é atribuído a um processo de formação de fases cristalinas.

4.4 ANÁLISE DA POLPA PELO MEV

Figura 4.6 Microscopia da polpa de minério com aumento de:
(a) x250; (b) x250; (c) x250 e (d) x2000



Fonte: Autor.

Na Figura 4.6, observa-se uma sequência de fotomicrografias da amostra, em que são constatadas a heterogeneidade morfológica da amostra e a presença de agregados recobertos por partículas de menor tamanho e de diversos formatos, onde é percebidas partículas de traços lamelar, retangular e esfericidade mediana, o

que já era esperado, pois quando se trata de polpa de minério é pouco provável uma linha comparativa homogênea em relação ao formato das partículas, ou seja, não há um formato definido de formas geométricas conhecidas como cúbicas ou esféricas.

4.5 VISCOSIDADE

Através do teste de viscosidade podemos acompanhar na Tabela 4.4 que a taxa de cisalhamento aumenta proporcionalmente com a quantidade de percentual sólido, neste caso o percentual sólido e a variação de tamanho de partícula não oferece grande influência na viscosidade da polpa de minério. Segundo [32] conclui que para polpas com percentagens de sólidos relativamente baixos segundo os autores aproximadamente de 40% sólidos por volume, suas viscosidades aparentes são mais ou menos independentes da distribuição de tamanhos de partículas ou adição de qualquer dispersante.

Tabela 4.4 - Percentual de sólidos e viscosidade dinâmica da Polpa				
Porcentagem de sólidos				
	01	02	03	Média
	43,69	42,35	41,16	42,40
Viscosidade (Pa.s)				
Taxa 100s⁻¹	0,012759	0,01117	0,00986	0,01126

Fonte: Autor.

A viscosidade da polpa não varia totalmente apenas com a percentagem de sólidos, com a necessidade de beneficiar partículas finas com o auxílio de instrumentos mais modernos de medição de propriedades das partículas, Outras variáveis já são consideradas significativas para a viscosidade da polpa, são elas a distribuição de tamanhos das partículas, o ambiente químico e a temperatura das polpas. De acordo com [33], a maioria das polpas em tratamento de minério apresenta comportamento de plástico de Bingham, pois o mesmo necessita de uma tensão inicial denominada limite de escoamento para que o fluido comece a escoar, característica de fluidos não newtonianos.

5 CONCLUSÕES

O resultado químico e mineralógico demonstra que a composição da polpa de minério é similar a matéria utilizada para fabricação de peças cerâmicas, em relação à distribuição granulométrica é observado grande quantidade finos referente à silte e argila, e através análise granulométrica foi obtido um percentual de 99,23% de material friável composto pela fração granulométrica referente á silte e argila.

A Análise feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV) constatou vários tipos de morfologia como lamelares, pontiagudas, angulares e subarrendadas. Como 100% do sólido possuem tamanho médio de partícula menor que 0,5mm não se espera muita dificuldade no bombeamento do mesmo, às quais não são consideradas críticas para medição. A única exceção é se a grande ocorrência de partículas no formato lamelar e pontiaguda, aliada a velocidade de bombeamento que poderá acarretar a uma abrasividade bastante severa na tubulação.

A viscosidade determinada neste trabalho é referente viscosidade dinâmica e não a aparente, pois esta só poderá ser determinada durante o bombeamento da polpa que irá definir o verdadeiro grau e cisalhamento das partículas. Uma vez que a intensidade dos esforços de cisalhamento que a polpa está sendo submetida é que irá determinar o valor da viscosidade aparente, porém podemos ter como referência a viscosidade dinâmica para mensurar o grau de sedimentação das partículas durante possíveis paradas durante o bombeamento da polpa de minério.

A complexidade para avaliação das propriedades de uma polpa de minério fica evidente quando é perceptível que o percentual de sólido não é o único parâmetro que pode ser avaliado para se determinar uma característica reológica como a viscosidade. Pois é necessária uma avaliação microscópica do material a ser trabalhado, entretanto não é possível prever o comportamento de cada partícula durante o movimento laminar ou turbulento durante o bombeamento da polpa. Em alguns casos um enfoque teórico guiará a uma escolha de procedimentos adequados enquanto, em outros casos, querer dar um caráter fenomenológico pode ser tão complexo, que o melhor a se esperar é ser capaz de compreender o comportamento macroscópico e fazer inferências sobre o que pode estar ocorrendo num nível microscópico, envolvendo características individuais das partículas e da água na polpa, bem como as interações partícula-partícula.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar a viscosidade aparente por simulação de bombeamento da polpa de minério.
- Definir a influência de cada fator característico e suas respectivas interferências na viscosidade da polpa durante seu bombeamento.

REFERÊNCIAS

- [1] VALADÃO, G.E.S; ARAUJO, A.C, Organizadores. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- [2] HUNTER, R.J. (1992) Rheology of colloidal dispersions. In: **Foundations of Colloid Science**, Clarendon Press-Oxford, v. II, chapter 18, p. 993-1057.
- [3] SHAW, D.J. (1992) Rheology. In: **Introduction to Colloid and Surface Chemistry**, Butterworths-Heinemann Ltd, fourth edition, chapter 9, p. 244-61.
- [4] PAWLIK, M.; LASKOWSKI, J.S. (1999) **Evaluation of flocculants and dispersants through rheological tests**. In: **Polymers in Mineral Processing**. 38th Annual Conference of Metallurgists of CIM, Quebec, Canada, p. 541-55, August.
- [5] BISCO, A. P. R., **A influencia de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Pós- graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte, 2009. 98p.
- [6] BRAGANÇA, A.C., SILVA, T.A. **Alternative to Lime as a Rheology Modifier in the Transport of Iron Ore Slurry by the Samarco Pipeline, Hydrotransport 17**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS, 17. 2007, p. 29- 38.
- [7] SHI, F.N.; NAPIER-MUNN, T.J. (1996a) Measuring the rheology of slurries using an on-line viscometer. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, no 3-4, p. 153-76.
- [8] HEALY, T. W.; BOGER, D. V.; WHITE, L. R.; SCALES, P. J. (1993) **Particulate fluids - a key concept in advanced mineral processing**. In: **XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, Australia**, p. 47- 55, May.
- [9] BAKSHI, A.K.; KAWATRA, S.K. (1996) Rapid determination of non-Newtonian flow behaviour in mineral suspensions. **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 13, no 4, p. 165-9, November.
- [10] HEALY, T. W.; BOGER, D. V.; WHITE, L. R.; SCALES, P. J. (1993) **Particulate fluids - a key concept in advanced mineral processing**. In: **XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, Australia**, p. 47- 55, May.
- [11] SHI, F. N.; NAPIER-MUNN, T.J. (1996b) **A model for slurry rheology**. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, no 1-2, p. 103-23.
- [12] PLITT, L.R. (1991) **A mathematical model of the gravity classifier**. In: **XVII th International Mineral Processing Congress, Dresden**, v. 1, p. 123-35.

- [13] DARLEY, H.C.H.; GRAY, G.R. (1988) **Rheology of drilling fluids**. In: **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**, fifth edition, Gulf Publishing Company, chapter 5, p. 184-281.
- [14] BAKSHI, A.K.; KAWATRA, S.K. (1996) Rapid determination of non-Newtonian flow behaviour in mineral suspensions. **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 13, no 4, p. 165-9, November.
- [15] HIEMENZ, P.C, RAJAGOPALAN, R., **Principles of Colloid and Surface Chemistry**. 3 ed. New York: Marcel Dekker, Inc, 1997. 650 p.
- [16] MACHADO, J. C. V., **Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria de petróleo**. *Interciência*, Rio de Janeiro – Brasil, 2002.
- [17] CHAVES, A.P. et al; **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Volume 1 e 2.ed. São Paulo, Brasil: Signus Editora , 2002.
- [18] FERREIRA, E. E, BRANDÃO, P.R.G., KLEIN, B., PERES, A. E. C., **Reologia de suspensões minerais: uma revisão**.*REM*, Ouro Preto – Brasil, No 58, Jan-Mar 2005, p.83-87.
- [19] HUYNH, L., JENKINS, P., RALSTON, J., **Modification of the rheological properties of concentrated slurries by control of mineral-solution interfacial chemistry**.*International Journal of Mineral Processing*, (59) 2000, p. 305-325.
- [20] IHC.PROMIN b.v. **Variflow classifiers for economical upgrading of industrial sand**.Rosmalen, 1997b.4 p.
- [21] IHC.PROMIN b.v. **Variflow horizontal classifiers sand**. Rosmalen, 1997a. 4p.
- [22] WEIR. **Dimensionamento e Seleção de Bombas de Polpa. Curso Bombeamento**. Rev.1, Belo Horizonte, ECM. 2006.
- [23]M.E. Charles e J.J.**Vocadloda Worthington** (Fabricante de bombas), Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A, 1980.
- [24] FOUST, A. L. **Princípios das operações unitárias** - 2. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnico e Científicos Editora SA,1982.
- [25] Santos, P. S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard BlücherLtda, 1989, p.4.
- [26] UFJF – FAC. ENGENHARIA – DEP. TRANSPORTES. TRN018 – **Mecânica dos Solos I**. Prof. Mitsuo Tsutsumi,São Paulo, 2009.

[27] *Boniatti, Rosiana*. Arquivo no curso de Engenharia Química na UCS. **Sedimentação** Ebah. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/sedimentacao-doc-a36471.html>> Acesso em 17 de Junho de 2012.

[28] CHAVES, A. P. et al. **Teoria e prática de tratamento de minério**. 1. Ed. São Paulo: *Signus*. Editora Ltda/Brasil/Mineral, 1996, v1, v2, v3.

[29] **Análise granulométrica- NBR 7181/84** –DA ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS).

[30] **Determinação de peso específico dos sólidos - NBR 6508/84** - DA ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS).

[31] *Sudiptobhattacharya, arnoud W. A. Boot and anjan V. Thakor*. **Journal of Money, Credit and Banking**. Vol. 30, N^o. 4 (Nov., 1998), pp. 745-770.

[32] FUERSTENAU, D.W.; KAPUR, P.C.; VELAMAKANNI, B. (1990) A multi-torque model for the effects of dispersants and slurry viscosity on ball milling. *International Journal of Mineral Processing*, v. 28, p. 81-98.

[33] VALADÃO, G. E. S. **Minério de ferro: processo de obtenção e sua utilização na siderurgia. 6.3 – Separação sólido líquido**. Disponível na Internet via WWW.URL: http://www.demin.ufmg.br/nova/arquivos/3/sep_sol_liq.pdf. Arquivo capturado em 25 de fevereiro de 2012.

[34] MÉTODOS DE ENSAIOS PARA PAVIMENTAÇÃO, **determinação do teor de argila em torrões nos agregados**, referência volume 12 / me-21, documentação técnica 2003.

ANEXOS

I Cálculo de densidade de sólido

Tabela I.I - Teste de densidade (T = 29 °C)	
PIC - 01 (50 ML)	PIC - 02 (50 ML)
P1= 29,5025 (g)	P1= 27,9238(g)
P2= 39,4891 (g)	P2= 37,9157 (g)
P3= 85,5950 (g)	P3= 84,5320 (g)
P4= 79,4806 (g)	P4= 28,4158 (g)
Pic - 01 = 2,57971	PIC - 02 = 2,57808
$\Sigma \text{pic1, Pic2} = 2,578895$	
Fonte: Autor.	

I.I Correção da densidade relativa em relação a temperatura de ensaio

$$D_{29} = K_{29} \times D_t$$

$$D_{29} = 0,9960 \times 2,578895$$

$$D_{29} = 2,568579 \text{ g/cm}^3$$

II Cálculo de percentagem de torrões de argila e materiais friáveis contidos no agregado miúdo de acordo com a fórmula seguinte[34].

$$P = \frac{(m - m_R)}{m} \times 100$$

onde:

P = quantidade de torrões de argila e materiais friáveis, em percentagem;

m = massa da amostra de ensaio (para agregados miúdos, é a massa da parte que fica retida na peneira 1,18 mm), em gramas;

m_R = massa das partículas retidas na peneira correspondente, por peneiramento úmido, em gramas.

$$P = \frac{(1,3 - 0,01)}{1,3} \times 100 = 99,23\%$$