

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**“A influência de floculantes poliméricos
na formação de pastas minerais”**

Autor: André Falcucci
Orientador: Armando Corrêa de Araujo

Abril/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MINAS

André Falcucci

**“A INFLUÊNCIA DE FLOCULANTES POLIMÉRICOS NA FORMAÇÃO DE
PASTAS MINERAIS”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Professor Armando Corrêa de Araujo

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007

ESPAÇO RESERVADO PARA A FOLHA DE APROVAÇÃO CPGEM

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
Francisco e Ione.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, professor Armando Corrêa de Araujo, pois sem sua orientação esta dissertação jamais se completaria.

Gostaria também de agradecer aos meus amigos Christian Anthony Hernandez Osório e Gustavo Queiroz pela inestimável ajuda.

À Companhia Brasileira de Alumínio, na pessoa do engenheiro Christian Fonseca de Andrade, pela cessão das amostras e suporte oferecido ao longo do desenvolvimento dos trabalhos.

À Companhia Vale do Rio Doce, na pessoa do Dr. Eliomar Evaristo Ferreira, pelos ensaios de caracterização reológica.

Considero-me uma pessoa de sorte por ter tido a chance de discutir assuntos com pesquisadores com tanta experiência como meus professores, George Eduardo Sales Valadão, Paulo Roberto de Magalhães Viana, Roberto Galéry, Paulo Roberto Gomes Brandão e Antônio Eduardo Clark Peres, obrigado a todos vocês.

Também, gostaria de agradecer a Renata Teixeira Forte pela imensa dedicação, apoio e paciência em todos os momentos.

Finalmente gostaria de agradecer à minha família pelo apoio incondicional, pois sem vocês eu jamais teria chegado até aqui. Obrigado pai e mãe por acreditarem em mim durante toda a minha vida.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	5
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1	Circuitos típicos de beneficiamento de bauxita.....	6
3.2	Pastas minerais.....	9
3.3	Floculação.....	15
3.4	Reologia.....	29
3.5	Manuseio.....	34
4.	METODOLOGIA.....	40
4.1	Composição e preparação das amostras.....	41
4.2	Caracterização.....	42
4.3	Ensaio de sedimentação.....	42
4.4	Reagentes.....	43
4.5	Tensão de escoamento e viscosidade.....	43
4.6	Planejamento fatorial.....	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1	Caracterização.....	46
5.2	Ensaio de sedimentação.....	50
5.3	Reologia.....	61
6.	CONCLUSÕES.....	68
6.1	Caracterização.....	68
6.2	Sedimentação.....	68
6.3	Reologia.....	69
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
	APÊNDICE I.....	79

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Exemplo de um espessador convencional. (Slottee, 2001)
- Figura 1.2 Exemplo de um espessador de pastas. (Fogwill, 2005)
- Figura 1.3 Evolução do desenho básico dos espessadores. (Fogwill, 2005)
- Figura 3.1 Fluxograma de processo da Mineração Rio do Norte – MRN.
- Figura 3.2 Fluxograma de processo de Juruti – Alcoa.
- Figura 3.3 Fluxograma de processo de Mirai – CBA.
- Figura 3.4 Exemplo de uma pasta mineral. (Slottee, 2005)
- Figura 3.5 Comparativo entre disposição como polpas de alta densidade e pastas minerais. (Hernandez et al., 2005)
- Figura 3.6 Transição entre polpas diluídas e pastas minerais. (Fogwill, 2005)
- Figura 3.7 Sistema de disposição com torre central. (Therriault et al., 2003)
- Figura 3.8 Esquema típico de transporte e manuseio de pastas. (Dorr-Oliver Eimco Catalog, 2003)
- Figura 3.9 Estrutura química dos polímeros floculantes. (Valadão, 2004)
- Figura 3.10 Conformação de um polímero sobre a superfície da partícula. (Hogg, 2004)

- Figura 3.11 Velocidade de sedimentação de caulim com diferentes dosagens de floculantes. (Besra et al., 2005)
- Figura 3.12 Turbidez do líquido sobrenadante para uma amostra de travertino. (Ersoy, 2005)
- Figura 3.13 Estrutura atômica da Caulinita. (Dana, 1960)
- Figura 3.14 Energia de interação entre partículas de calcopirita e pirita. (Mitchell et al., 2005)
- Figura 3.15 Representação esquemática da Dupla Camada Elétrica (DCE) e do potencial na interface sólido-líquido. (Fuesternau et al., 2005)
- Figura 3.16 Potencial Zeta de uma amostra de Caulinita. (Araujo e Galery, 1987).
- Figura 3.17 Planejamento fatorial 2^3 . (Sheridan et al., 2002)
- Figura 3.18 Planejamento fatorial 2^2
- Figura 3.19 Classificação do comportamento reológico de diferentes tipos de suspensões. (Ferreira et al., 2005)
- Figura 3.20 Tensão de escoamento de uma amostra de alumina em função do pH para diferentes porcentagens de sólidos. (Johnson et al., 2000)
- Figura 3.21 Distribuição da velocidade de um fluido de Bingham em um fluxo laminar. (Roudev et al., 2002)

- Figura 3.22 Otimização do bombeamento em função da modificação da reologia da polpa. (Nguyen et al., 1998)
- Figura 4.1 Fluxograma do planejamento dos ensaios.
- Figura 4.2 Fluxograma esquemático da preparação inicial das amostras.
- Figura 5.1 Ponto de carga zero da amostra.
- Figura 5.2 Distribuição granulométrica da amostra.
- Figura 5.3 Superfície de resposta para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante catiônico.
- Figura 5.4 Superfície de resposta para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante catiônico.
- Figura 5.5 Superfície de resposta para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante aniônico.
- Figura 5.6 Superfície de resposta para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante aniônico.
- Figura 5.7 Superfície de resposta para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante aniônico.
- Figura 5.8 Superfície de resposta para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante aniônico.
- Figura 5.9 Tensão de escoamento em função de porcentagem de sólidos segundo modelo de Bingham.

Figura 5.10 Consumo energético específico para um diâmetro de tubulação variado.

Figura 5.11 Consumo energético específico para um volume de sólidos variado.

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 Incidentes e impactos ambientais relacionados com mineração no ano 2000. (van Deventer et al., 2003)

Tabela III.2 Seqüência de eventos no processo de floculação. (Farinato et al., 2003)

Tabela III.3 Matriz do planejamento fatorial.

Tabela IV.1 Procedimentos utilizados para caracterização das amostras.

Tabela IV.2 Detalhamento dos ensaios de sedimentação.

Tabela IV.3 Fatores e níveis nos ensaios de sedimentação com o uso de floculante catiônico.

Tabela IV.4 Fatores e níveis nos ensaios de sedimentação com o uso de floculante aniônico.

Tabela IV.5 Fatores e níveis nos ensaios de sedimentação com o uso de floculante não iônico.

Tabela V.1 Peso específico das amostras.

Tabela V.2 Composição química tecnológica das amostras

Tabela V.3 Resultados experimentais para os ensaios de sedimentação com o uso do floculante catiônico.

Tabela V.4 Ajuste polinomial para o floculante catiônico.

Tabela V.5 Constantes para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante catiônico.

Tabela V.6 Constantes para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante catiônico.

Tabela V.7 Resultados experimentais para os ensaios de sedimentação com o uso do floculante aniônico.

Tabela V.8 Ajuste polinomial para o floculante aniônico.

Tabela V.9 Constantes para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante aniônico.

Tabela V.10 Constantes para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante aniônico.

Tabela V.11 Resultados experimentais para os ensaios de sedimentação com o uso do floculante não iônico.

Tabela V.12 Ajuste polinomial para o floculante não iônico.

Tabela V.13 Constantes para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante não iônico.

Tabela V.14 Constantes para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante não iônico.

Tabela V.15 Tensão de escoamento segundo o modelo de Bingham.

LISTA DE NOTAÇÕES

A	Área;
α, β, k, m	Constantes;
b_0, b_1, b_2, b_3	Constantes;
A_H	Constante de Hamaker;
d	Diâmetro;
h	Distância;
E	Energia;
f	Fator de Fanning;
f_L	Fator de fluxo laminar;
f_T	Fator de fluxo turbulento;
F	Força;
F_{vdW}	Força de van der Waals;
M	Massa;
He	Número de Hedstrom;
Re	Número de Reynolds;
ρ	Peso específico;
C_w	Porcentagem de sólidos;
P	Potência;
p	Pressão;
r	Raio;
γ	Taxa de cisalhamento;
t	Tempo;
τ	Tensão de cisalhamento;
τ_0	Tensão de escoamento;
v	Velocidade;
v_s	Velocidade de sedimentação;
μ	Viscosidade;

RESUMO

Nos últimos anos, a disposição de rejeitos em forma de pastas minerais e/ou polpas de alta densidade tem ganhado importância por apresentar significativas vantagens quando comparado a forma tradicional de disposição. O conhecimento das características físico-químicas do material, assim como as interações resultantes devido ao uso de floclulantes nas operações de separação sólido-líquido, pode levar a formação de pastas e/ou polpas dentro das condições desejadas para manuseio e disposição final.

Com o auxílio da ferramenta do planejamento fatorial 2^2 , com o pH e a dosagem de floclulante como variáveis independentes, foi avaliada a influência de três diferentes tipos de floclulantes na velocidade de sedimentação e na porcentagem de sólidos final do material floclulado – rejeito de bauxita, assim como a reologia da polpa para a operação subsequente de manuseio.

No que diz respeito à velocidade de sedimentação e a porcentagem final de sólidos do material floclulado, o floclulante catiônico apresentou melhores resultados dentre os ensaios, com uma dosagem de 130g/t e pH 5, apresentando uma velocidade de sedimentação de 105,2mm/min e uma porcentagem final de sólidos de 31,2%. No que diz respeito à reologia da polpa, utilizando-se do modelo de Bingham e o modelo de Darby, as melhores condições de manuseio foram para uma polpa com aproximadamente 32% de sólidos.

Palavras chave: pastas minerais, bauxita, floclulação.

ABSTRACT

In the last years, the disposal of tailings in the form of pastes or high-density slurries has gained importance as it may present significant advantages in comparison to more traditional disposal techniques. The knowledge of physical chemical characteristics of the material to be disposed, as well as the interactions that result from the use of polymeric flocculants on solid/liquid separation can lead to the formation of pastes and/or high-density slurries with adequate conditions for handling and final disposal.

With the help of factorial design tool (2^2) and with pH and flocculant dosage as independent variables, the influence of three different flocculants was evaluated on the settling rate and final percent solids of a bauxite tailings flocculated material. Rheological aspects of the slurry were also investigated as they are of paramount importance for the subsequent handling of the paste and/or slurry produced.

Regarding settling rate and final % solids of the flocculated material, a cationic polymer presented the best results among the three reagents tested. With a dosage of 130 g/t and pH 5, a settling rate of 105.2 mm/minute was reached and the final % solid (by wt.) was 31.2%. In relation to the slurry rheology, employing Bingham and Darby models, optimized handling conditions would take place at 32% solids.

Key Words: pasting, bauxite, flocculation.

1. INTRODUÇÃO

A mineração em larga escala e o processamento mineral em todo mundo gera, inevitavelmente, enormes quantidades de rejeitos que necessitam ser dispostos de maneira econômica e ambientalmente aceitáveis. Geralmente os rejeitos gerados encontram-se na forma de polpas diluídas e necessitam de operações de separação sólido-líquido, onde a fase líquida é reciclada e recirculada novamente ao processo. Usualmente estas operações são executadas em espessadores de grande diâmetro, com aplicação de altas dosagens de flocculantes, a fim de acelerar o processo de desaguamento e melhorar a qualidade final da água recuperada. Após esta etapa, o rejeito, oriundo do *underflow* dos espessadores é bombeado na forma de polpa relativamente diluída para bacias de rejeito, onde a fração sólida será consolidada ao longo do tempo. Este método tradicional apresenta alguns problemas inerentes além de um alto custo financeiro, social e ambiental. A granulometria fina do rejeito geralmente requer o uso de flocculantes para que as partículas flocculadas sedimentem mais rapidamente. Em contra partida, os flocos formados apresentam uma estrutura mais aberta fazendo com que estes apresentem uma quantidade maior de água presa em sua estrutura. Como resultado, quando disposto nas barragens de rejeito, este material flocculado apresenta um nível de compactação mais baixo, levando ao preenchimento mais rápido do volume disponível nas barragens de rejeitos além de uma reabilitação mais lenta da área. Por estes e outros motivos nos últimos anos tem crescido o interesse na disposição de rejeitos na forma de polpas de alta densidade e pastas minerais, pois nesta forma de disposição os sedimentos se consolidam mais rapidamente levando a um melhor aproveitamento do solo e em longo prazo, uma diminuição dos custos. (Boger et al., 1998)

A implementação desta nova forma de disposição deve considerar dois fatores independentes. Primeiro, é essencial que a polpa seja manuseada e transportada por tubulações, para disposição como polpas de alta porcentagem de sólidos e em grandes quantidades com o mínimo de energia possível. O

método de descarga também deve ser projetado de forma a permitir o espalhamento da polpa sobre toda a superfície da área. Estas suspensões muito concentradas normalmente apresentam as características de um fluido não-newtoniano. Um bom conhecimento das características destas polpas concentradas é um importante fator para o estabelecimento de condições ótimas de manuseio e transporte. O segundo fator a ser considerado é a capacidade física e econômica de se produzir polpas muito concentradas. Isso requer um bom conhecimento do comportamento das partículas nas operações de separação sólido-líquido e o desenvolvimento de tecnologias viáveis para sua produção. (Boger et al., 1998)

A busca por operações mais eficientes e econômicas de processamento mineral tem levado ao avanço de diversas áreas da tecnologia mineral e isto reflete nas operações de separação sólido-líquido. Nas últimas décadas o principal avanço nestas operações se deu na área de floculação, que possibilitou o aumento das taxas de sedimentação, diminuição das áreas necessárias dos espessadores e uma melhoria na qualidade da água recuperada. A floculação também permitiu grandes avanços no desenho básico dos espessadores (Figuras 1.1, 1.2 e 1.3).



Figura 1.1: Exemplo de um espessador convencional. (Slotee, 2001)



Figura 1.2: Exemplo de um espessador de pastas. (Fogwill, 2005)

As principais formas de preparação de pastas minerais se baseiam em operações de filtragem ou espessamento, onde a água é eliminada até o nível de consistência desejado.

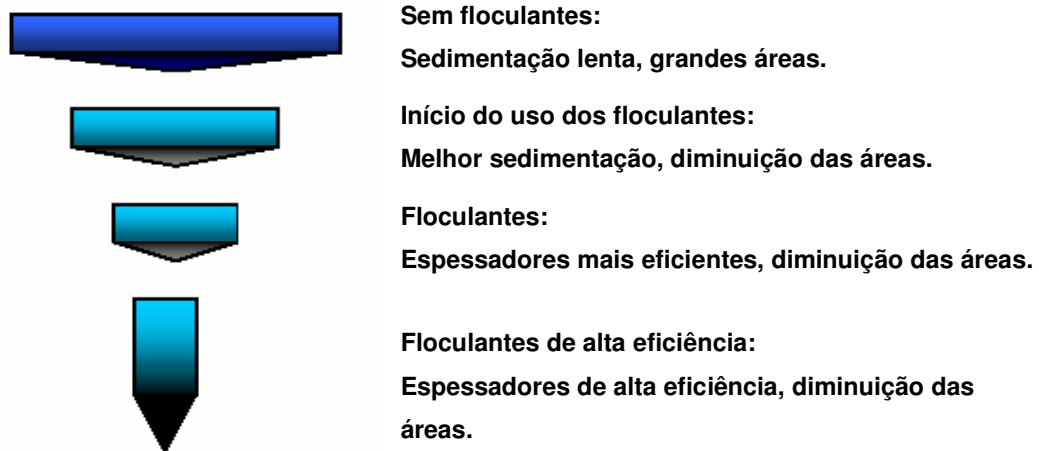


Figura 1.3: Evolução do desenho básico dos espessadores. (Fogwill, 2005)

Recentemente tem aumentado o interesse de empresas, governos e outras entidades no uso de pastas minerais como forma final de disposição de rejeitos, por ser ambientalmente mais segura e socialmente mais aceitável. A disposição de rejeitos na forma tradicional apresenta riscos ambientais e sociais maiores, além de um pior aproveitamento do solo e dos recursos hídricos.

Slottee (2005) apresenta diversos benefícios do uso de pastas minerais:

- A alta concentração de sólidos das pastas minerais resulta numa maior recuperação de água quando comparado com métodos convencionais de desaguamento;
- Redução das áreas necessárias para disposição, pois apresentam ângulos de repouso maiores;
- Redução no risco de rompimento das barragens;
- Diminuição do tempo e do custo de recuperação das áreas de disposição de rejeitos;

Archibald (2005) apresenta também, os benefícios do uso de pastas minerais como “backfill” em minas subterrâneas. Entre eles pode-se citar:

- Maior recuperação do minério;
- Menor tempo de secagem;
- Redução nos custos de manuseio;

Atualmente a principal operação de beneficiamento de bauxita do Brasil concentra-se na região norte do país, onde fatores ambientais, de uso do solo e da água, além de fatores sociais, devem ser fortemente considerados. Esta operação produz cerca de 17,0 milhões de toneladas por ano de bauxita beneficiada e aproximadamente 7,3 milhões de toneladas por ano de rejeitos sólidos, sendo o rejeito, com 10% de sólidos, transferido para uma lagoa de espessamento intermediária para adensar a aproximadamente 34% de sólidos. Após esta etapa o rejeito é dragado e bombeado para a área lavrada da mina para disposição final.

Tendo em vista os atuais problemas enfrentados pela indústria mineral no que diz respeito à disposição final de rejeitos oriundos do beneficiamento de bauxita, este trabalho tem como finalidade estudar a influência de reagentes poliméricos sintéticos na formação e manuseio de polpas de alta densidade e/ou pastas minerais. Pretende assim contribuir para um melhor entendimento das propriedades resultantes, adquiridas com a adição destes.

2. OBJETIVOS

Com o auxílio da ferramenta do planejamento fatorial, pretende-se estudar o impacto das variáveis pH e dosagem de três diferentes tipos de floclulantes, na velocidade de sedimentação e porcentagem de sólidos final do material floclulado.

Outros objetivos específicos são descritos a seguir:

Gerar e validar um polinômio para a predição da velocidade de sedimentação e porcentagem final de sólidos para cada um dos floclulantes utilizados.

Caracterizar a amostra quanto as suas propriedades físico-químicas.

Caracterizar a reologia da polpa.

Avaliar o impacto da dosagem de floclulante e do pH na reologia da polpa.

Identificar as condições ótimas de manuseio da polpa.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Circuitos típicos de beneficiamento de bauxita

As reservas de bauxita no Brasil são tipicamente de origem supergênica onde a Gibbsita, rica em alumina aproveitável, aparece na forma de nódulos envoltos por uma matriz argilosa. As usinas de beneficiamento usualmente produzem um só produto, onde a fração mais grossa do minério é aproveitada e a fração fina é descartada como rejeito.

As principais operações de beneficiamento de bauxita no Brasil seguem basicamente a mesma rota de processo onde o minério é cominuído em britadores de rolos dentados, desagregado em lavadores rotativos, classificado em peneiras e ciclones, sendo a fração mais fina filtrada. A Figura 3.1 apresenta a rota de processo da principal operação de beneficiamento de bauxita no país, realizado pela Mineração Rio do Norte, localizada no estado do Pará.

O minério proveniente da mina (ROM) passa por etapas de britagem primária e secundária, em britadores de rolos dentados, adequando o tamanho para as operações subseqüentes. Após esta etapa, o minério é conduzido para o lavador rotativo que tem a função de desagregar o material. A operação subseqüente é a classificação por meio de peneiras vibratórias, que em uma primeira etapa separa as frações mais grosseiras, esta fração retida na peneira irá compor o produto final e a passante segue para uma nova etapa de classificação, novamente com o uso de peneiras vibratórias, dando continuidade ao processo de classificação. A fração retida nesta segunda operação irá compor o produto final, juntamente com a fração retida na primeira etapa de peneiramento, já a passante seguirá para as etapas de ciclonagem onde segue-se o processo de classificação por tamanho.

A ciclonagem geralmente é composta por estágios duplos de classificação devido às ineficiências de classificação dos ciclones. O *overflow* do primeiro

Companhia Brasileira de Alumínio - CBA, em fase de implantação no município de Mirai, estado de Minas Gerais.

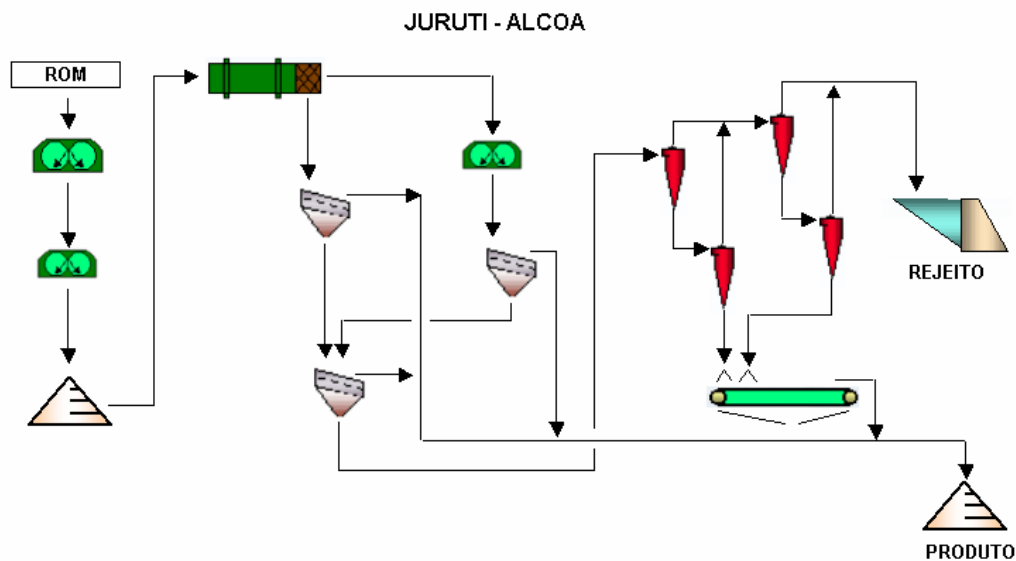


Figura 3.2: Fluxograma de processo de Juruti – Alcoa.

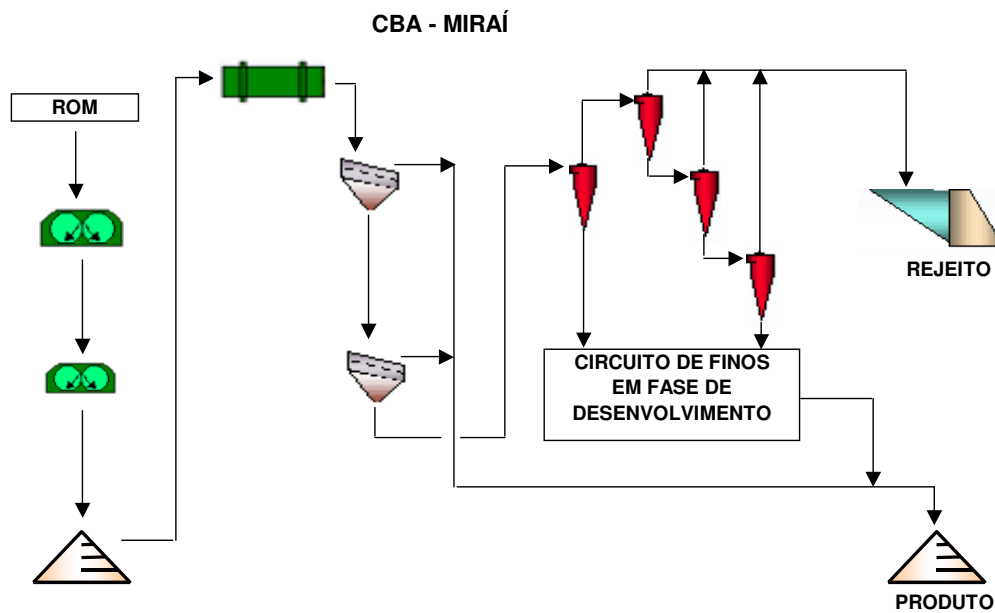


Figura 3.3: Fluxograma de processo de Mirai – CBA.

Deve-se ressaltar que as rotas de processo das operações ilustradas anteriormente diferenciam-se entre si em função das características intrínsecas do minério em cada localidade.

3.2 Pastas minerais

Segundo os trabalhos de Jewell (2002) e de Araujo, Amarante e Souza (2003), uma pasta mineral pode ser conceituada como um sistema coloidal e que se apresenta como um fluido homogêneo, no qual não ocorre a segregação granulométrica das partículas, e que, se disposto de forma suave em superfícies estáveis, não apresenta drenagem significativa de água. Pastas minerais geralmente apresentam comportamento de fluido não-newtoniano e normalmente são classificadas como fluidos plásticos de Bingham.

Segundo Archibald (2005) pastas minerais podem ser definidas como um material adensado e homogêneo, com alta viscosidade, distribuição de tamanhos e mineralogia característica, com baixos ou nenhum nível de água livre e no qual não ocorre segregação granulométrica das partículas (Figura 3.4) Normalmente seu transporte se dá por bombas de deslocamento positivo, com velocidades relativamente baixas.



Figura 3.4 – Exemplo de uma pasta mineral. (Slotee, 2005)

Os fluidos denominados plásticos de Bingham e pseudoplástico com tensão de escoamento distinguem-se dos outros fluidos por requererem uma tensão inicial, denominada tensão de escoamento, para que o fluido comece a escoar.

A disposição de rejeitos em forma de pastas minerais apresenta inúmeras vantagens em relação à forma tradicional de disposição em forma de polpas diluídas, a Figura 3.5 apresenta de forma qualitativa o ganho de capacidade das áreas de disposição com a utilização de pastas. Deve-se ressaltar que os aspectos geotécnicos da área escolhida para disposição são de extrema importância e não devem ser negligenciados. (Hernandez et al., 2005)

Daly et al. (1995) estudaram os aspectos geotécnicos de uma área de disposição de rejeitos em forma de pastas minerais. As diversas forças envolvidas foram analisadas, principalmente no contato entre a superfície do dique e a pasta mineral, mostrando os limites de empilhamento a partir do qual a força aplicada devido ao peso do material ultrapassa as forças de coesão entre as duas superfícies chegando ao limite de escoamento.

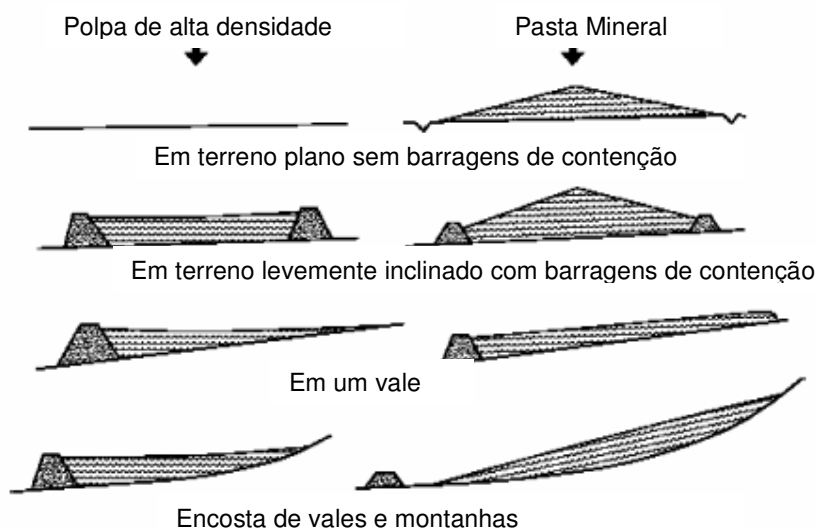


Figura 3.5: Comparativo entre disposição como polpas de alta densidade e pastas minerais (Hernandez et al., 2005).

A porcentagem de sólido necessária para formação de pastas minerais é uma característica intrínseca do material e não pode ser definida por um valor fixo. Uma pasta mineral deve conter uma quantidade de partículas finas suficiente para a retenção de água, principalmente quando submetida a diferença de pressão, como nas operações de bombeamento.

Johnson et al. (2005) consideram que pastas geralmente podem ser produzidas a partir de uma ampla faixa de tamanho de partículas, ainda que usualmente tenha um mínimo de 15% em massa de material de tamanho inferior a 20 μm .

Outro aspecto importante é a área superficial específica, parâmetro que pode afetar as propriedades da pasta mineral assim como a proporção necessária de partículas finas. Quando esta proporção cresce, a necessidade de água também aumenta para que ocorra a cobertura da área superficial disponível. Através da caracterização reológica é possível estabelecer a faixa de transição entre polpas e pastas minerais. A Figura 3.6 apresenta de forma qualitativa esta faixa de transição.

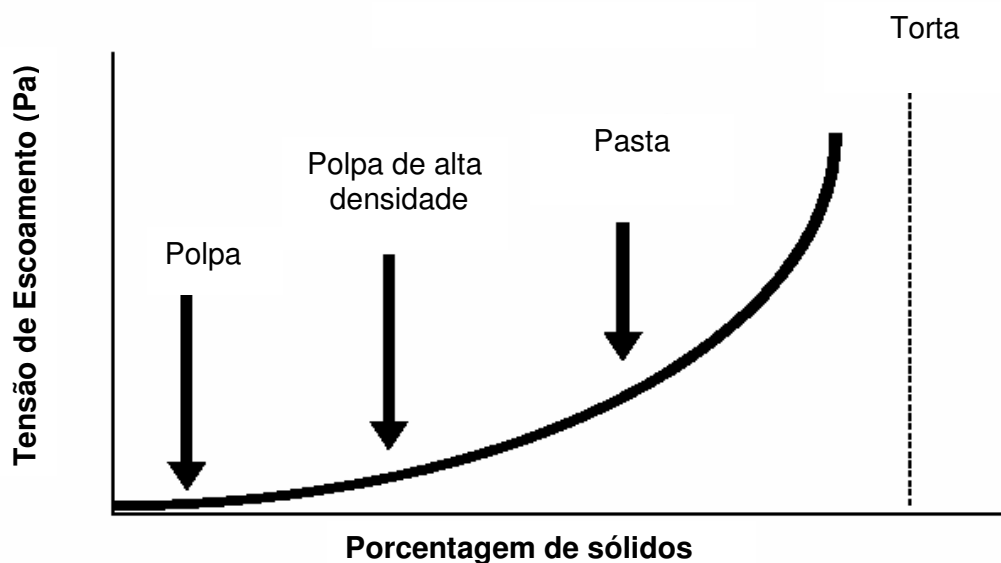


Figura 3.6: Transição entre polpas diluídas e pastas minerais. (Fogwill, 2005)

A otimização da disposição de rejeitos na forma de pastas minerais requer o entendimento das características reológicas e dos parâmetros operacionais, de forma que estes possam ser alterados, atingindo os objetivos técnicos e econômicos desejados.

Devido às características apresentadas pelas pastas minerais a forma de disposição deve ser pensada visando sua melhor distribuição. Usualmente a disposição é feita por um sistema de torre central a partir do qual a pasta se distribui uniformemente ao longo da área, (Figuras 3.7 e 3.8) facilitando desta forma a secagem e o adensamento natural. Silva (2003) apresenta um estudo do ressecamento de rejeitos de ferro exposto às condições climáticas e de que forma tais condições podem influenciar nas características finais do material disposto.



Figura 3.7: Sistema de disposição com torre central. (Therriault et al., 2003)

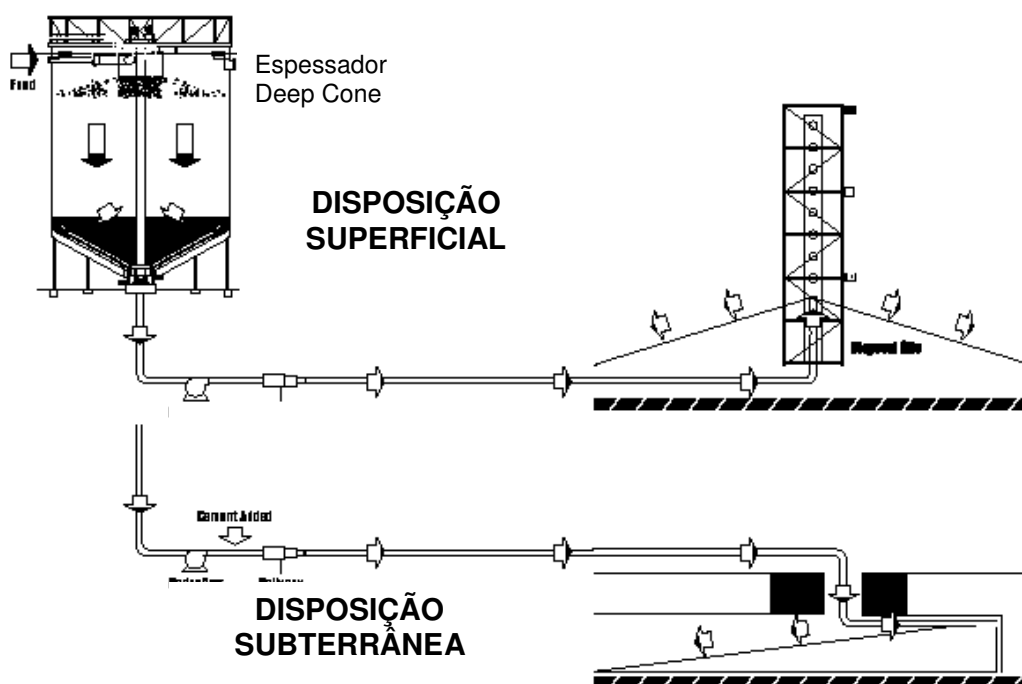


Figura 3.8: Esquema típico de transporte e manuseio de pastas minerais.
(Dorr-Oliver Eimco Catalog, 2003)

Newman et al. (2003) destacam, de forma qualitativa, diversos aspectos sobre o desenvolvimento e uso da tecnologia de formação, manuseio e disposição de rejeitos na forma de pastas minerais e comparam os custos envolvidos com a disposição na forma de polpas diluídas, mostrando que a disposição na forma de pastas minerais, apesar de inicialmente apresentar um custo de capital maior, a longo prazo pode representar ganhos devido ao menor tempo de recuperação das áreas. Além disso, a disposição na forma de pastas requer uma menor infra-estrutura, pois as áreas de disposição podem ser diminuídas assim como a necessidade de água nova para o processo.

3.2.1 Aspectos ambientais

A disposição de rejeitos no meio ambiente é um potencial fonte poluição que pode criar perigos a saúde pública e ao meio ambiente.

O perigo que significa a existência das barragens de rejeitos na atualidade é sempre uma preocupação constante. O rompimento de uma barragem de rejeitos pode significar entre outros efeitos: perda de vidas humanas, dano ambiental severo, impacto direto nos custos de produção, imagem negativa da empresa e responsabilidade legal. (Davies, 2000)

Van Deventer et al. (2003) apresentam algumas das catástrofes ambientais na mineração mundial acontecidas no ano 2000 (Tabela III.1). Também mostra que desde 1975 os incidentes ambientais reportados na mineração são causados em 76% dos casos por acidentes em barragens de rejeitos, 18% devido às falhas na tubulação de transporte e 6% por acidentes de transporte.

No Brasil podem-se citar dois acidentes, ocorridos recentemente, envolvendo barragens de rejeitos, onde milhões de toneladas de lamas resultantes do beneficiamento de bauxita foram derramados causando danos a diversas cidades dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro.

Assim, a disposição de rejeitos na forma de pastas minerais ou polpas de alta densidade apresenta-se como uma importante alternativa como forma de disposição final.

Tabela III.1: Incidentes e impactos ambientais relacionados com mineração no ano 2000. (van Deventer et al., 2003)

DATA	LOCAL	FALHA	PRODUÇÃO	MORTES
Jan-2000	Baia Mare, Romênia	Rompimento da barragem	Cianeto	Não
Mar-2000	Borsa, Romênia	Rompimento da barragem	Metais pesados	Não
Mar-2000	Papua – Nova Guiné	Acidente no transporte	Cianeto	Não
Jul-2000	Romênia	Falha na linha de pipping	Chumbo e Zinco	Não
Set-2000	Galivare, Suécia	Falha da barragem pela drenagem no filtro	Cobre	Não
Set-2000	Shanxi, China	Derrame de 5,2t de NaCN no rio Shuangjiang	Cianeto	Não
Out-2000	Inez, EUA.	Falha da barragem dentro da mina subterrânea	Polpa de descarte de carvão	Não
Out-2000	Nandan County, China	Colapso da barragem	Cobre	29 mortos, 100 desaparecidos

3.3 Floculação

A floculação é a agregação obtida por intermédio de polímeros orgânicos que possuem normalmente elevado peso molecular, realizando ligações entre

partículas, servindo como pontes e originando agregados denominados flóculos ou flocos.

Suspensões formadas com partículas muito finas geralmente apresentam resistência à floculação devido às forças resultantes das interações entre as partículas em suspensão, o primeiro passo no processo de floculação é a desestabilização destas partículas com a eliminação destas forças.

A maioria dos polímeros sintéticos utilizados no processamento mineral e hidrometalurgia são baseados na química do acrílico. Floculantes baseados em poliacrilamidas representam a maior classe de reagentes orgânicos, tendo sido introduzido na década de 60. A substituição do grupo funcional na cadeia carbônica por grupos catiônicos, aniônicos ou não iônicos e também a variação do peso molecular da poliacrilamida permite sua utilização em praticamente todos os tipos de polpa e equipamentos de separação sólido-líquido, tais como: clarificadores, espessadores e filtros. (Pearse, 2005)

O peso molecular apresenta-se um fator importante se for considerado que em baixos valores a floculação pode ficar prejudicada pela falta de capacidade do polímero em formar ligações. Caso contrário, se o peso for alto pode significar problemas na solubilidade.

A Figura 3.9 apresenta as entidades básicas dos tipos de reagentes mais utilizados. A acrilamida polimerizada com a adição de vinil forma o floculante não iônico. Acrilato de sódio polimerizado conjuntamente com a acrilamida forma o floculante aniônico e o dimetilamonioetil acrilato é utilizado conjuntamente com a acrilamida para formar o floculante catiônico.

Inúmeros fatores físico-químicos podem influenciar a floculação e o desaguamento de suspensões com partículas finas, dentre eles podem ser citados o tamanho de partículas e sua distribuição granulométrica, porcentagem de sólidos da polpa, pH, íons em suspensão, peso molecular, densidade de carga do floculante, intensidade de adsorção e conformação dos flocos. (Valadão, 2004)

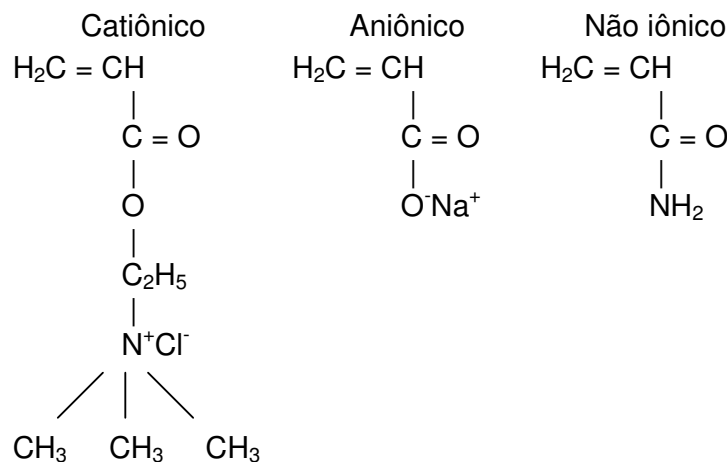


Figura 3.9: Estrutura química dos polímeros floculantes. (Valadão, 2004)

Uma floculação eficiente não depende da cobertura total da partícula, mas de como os segmentos do polímero estão distribuídos sobre a superfície da partícula, lateralmente ou radialmente, de forma que as partículas ao aproximar-se uma das outras estejam susceptíveis a formação de pontes de interligação (Figura 3.10).

Segundo Fariato et al. (2003) o desenvolvimento e uso de polímeros para a indústria mineral devem considerar os seguintes aspectos:

- i. tipo de adsorção;
- ii. distribuição dos segmentos do polímero na região da interface;
- iii. carga resultante na superfície da partícula;
- iv. características do meio (temperatura, pH, presença de outros íons);
- v. aspectos dinâmicos (agitação e grau de dispersão do reagente);
- vi. capacidade química e física de sobrevivência do polímero;
- vii. capacidade química e física de sobrevivência do floco;

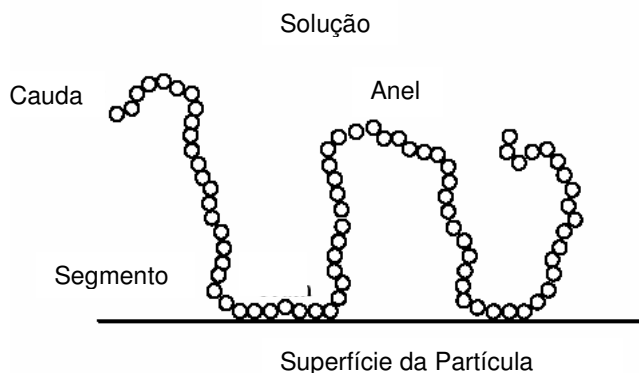


Figura 3.10: Conformação de um polímero sobre a superfície da partícula.
(Hogg, 2004)

A Tabela III.2 ilustra a seqüência de eventos após a adição do polímero. É importante ressaltar que estes eventos ocorrem simultaneamente, mostrando o caráter dinâmico do processo.

Hogg (2004) acredita que os mecanismos de adsorção entre as moléculas do polímero e superfície das partículas envolvem a formação de pontes de hidrogênio entre os segmentos amina e carboxila, presentes no polímero, com os grupos hidroxila presente na superfície das partículas. Atrações eletrostáticas entre o polímero e a superfície carregada da partícula também contribuem com o processo. A adsorção de um único segmento do polímero sobre a superfície da partícula pode ser descrita como um fenômeno reversível, porém, no processo de adsorção, inúmeros segmentos adsorvem simultaneamente sobre a superfície tornando a dessorção de todos estes segmentos um processo irreversível.

A dosagem de floculantes deve estar de acordo com a necessidade do sistema. Reconhece-se que para obter uma boa floculação é necessário apenas recobrimento parcial da superfície da partícula. Uma dosagem excessiva, além de significar custo desnecessário, pode levar a um recobrimento superficial muito grande das partículas, propiciando a re-estabilização do sistema.

Tabela III.2: Seqüência de eventos no processo de floculação.
(Farinato et al., 2003)

Dispersão e transporte	Floculação
Colisão polímero-partícula	
Adsorção	
Reconformação	
Colisão partícula-partícula	
Desestabilização da partícula	
Agregação partícula-partícula	
Estrutura agregada e crescimento do floco	
Sedimentação / Espessamento	
Desaguamento	

Besra et al. (2005) em seus estudos mostraram a importância da correta dosagem de floculantes na floculação de uma amostra de caulim, a Figura 3.11 mostra como a velocidade de sedimentação varia em função da dosagem. A partir de determinados níveis a velocidade de sedimentação estabiliza-se, não sendo possível o aumento desta com o simples aumento da dosagem.

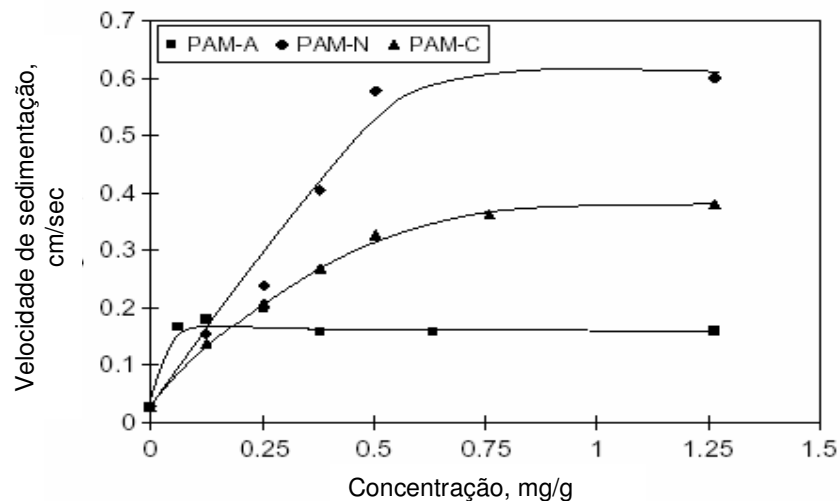


Figura 3.11: Velocidade de sedimentação de caulim com diferentes tipos e dosagens de floculantes. (Besra et al., 2005)

Ersoy (2005) também ressalta a importância da correta dosagem de flocculantes e mostra que o excesso destes pode proporcionar a re-estabilização do sistema, a Figura 3.12 ilustra que a partir de certos níveis de dosagem a turbidez do material sobrenadante torna a elevar-se, mostrando uma tendência a re-estabilização. Ersoy acredita que este aumento da turbidez se deve às repulsões estéricas causadas pelo excesso de flocculantes.

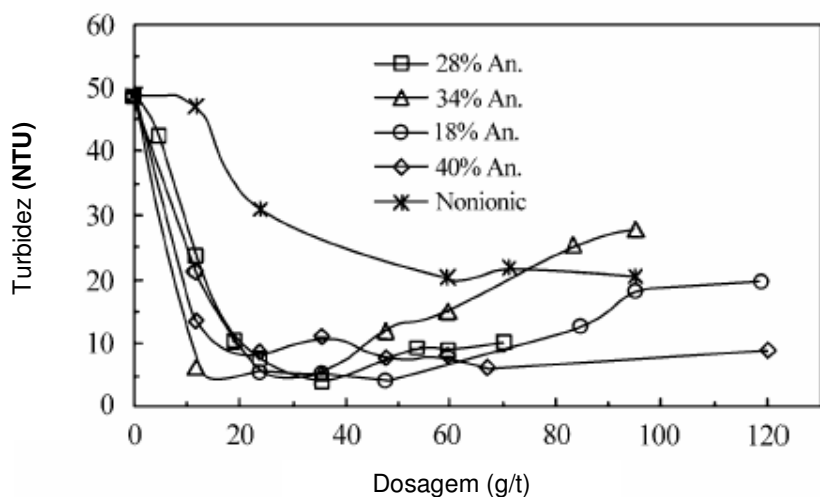


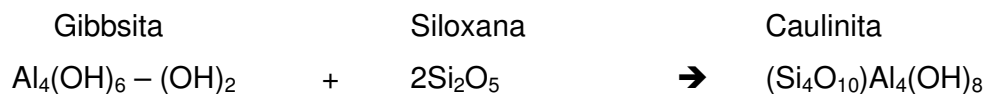
Figura 3.12: Turbidez do líquido sobrenadante para uma amostra de travertino. (Ersoy, 2005)

3.3.1 Estrutura da Caulinita

A palavra argila é empregada em referência a um material terroso, de granulometria fina e que se apresenta plástico ao ser misturado a pequenas proporções de água. Uma argila pode ser formada por um único mineral, mas de maneira geral encontra-se misturado a outros minerais como feldspatos, quartzos e micas. As argilas são predominantemente formadas por substâncias cristalinas que em sua essência constituem-se silicatos de alumínio hidratados. Em alguns casos o alumínio pode ser parcialmente substituído por magnésio ou ferro e os grupos alcalinos e alcalinos terrosos podem estar presentes como constituintes essenciais. (Dana, 1960)

A Caulinita, principal constituinte da amostra, é um mineral de origem supergênica, basicamente originado da meteorização prolongada de rochas alumínicas, principalmente feldspatos, em condições tropicais ou subtropicais e aparecem como um dos produtos comuns da decomposição das rochas. Integra a classe dos filossilicatos possuindo hábito lamelar ou escamoso com uma direção de esfoliação dominante. Em geral apresentam baixo peso específico e dureza, suas lâminas podem ser flexíveis e às vezes elásticas. Todas estas características peculiares derivam do predomínio da folha de silício-oxigênio. A maior parte dos minerais desta classe contém hidroxilas e as peculiaridades estruturais características deste íon exercem grande influência sobre suas propriedades. (Dana, 1960)

A Caulinita é constituída por folhas de hidroxilas coordenadas por íons de alumínio na estrutura da Gibbsita. As hidroxilas formam folhas duplas com empacotamento hexagonal muito compacto, onde nem todos os interstícios encontram-se ocupados e os íons de alumínio formam um anel hexagonal, no qual o centro do anel encontra-se desocupado. Isto conduz a uma proporção de dois íons de alumínio para cada octaedro, configuração chamada de folha dioctaédrica (Figura 3.13). Estas folhas são eletricamente neutras e estão ligadas por ligações de van der Waals. (Dana, 1960)



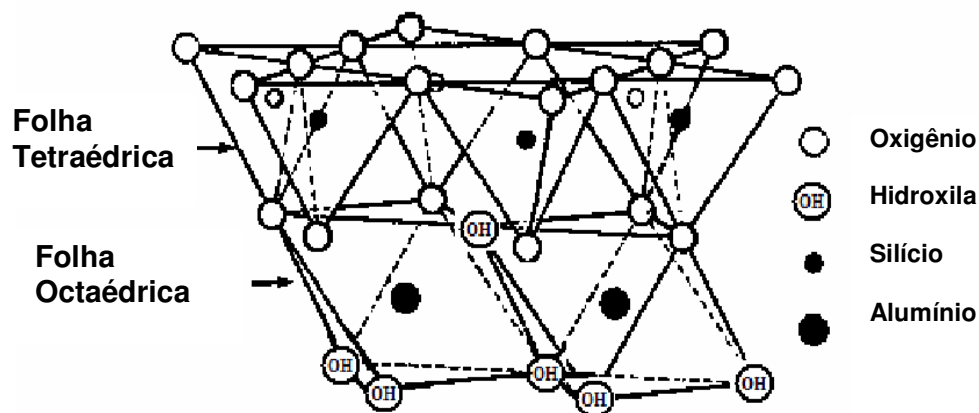


Figura 3.13: Estrutura atômica da Gaulinita (Dana, 1960).

3.3.2 Interações partícula-partícula e partícula-polímero

O entendimento das forças envolvidas na agregação é fundamental para o desenvolvimento e otimização das condições de processo.

A energia total envolvida nas interações entre as partículas e o polímero pode ser abordada pela teoria conhecida como DLVO, desenvolvida por Deryaguin e Landau (1941) na antiga URSS e por Verwey e Overbeek (1948) na Holanda.

A DLVO aborda basicamente o equilíbrio entre as forças presentes no sistema, que podem ser de caráter repulsivo, resultante da dupla camada elétrica (DCE), ou de caráter atrativo, resultantes das forças de van der Waals e fornecem uma boa previsão da energia total envolvida no processo de floculação (equação 3.1).

$$E_{\text{Total}} = E_{\text{Repulsiva}}(h) + E_{\text{Atrativa}}(h) \quad (3.1)$$

Onde h representa a distância entre partículas.

A partir desta equação aparentemente simples é possível prever o estado de agregação e/ou dispersão do sistema (Figura 3.14). O texto referente à Dupla

Camada Elétrica e as Forças de van der Waals apresentam de forma geral como é possível prever o estado de agregação e/ou dispersão do sistema.

Do ponto de vista prático, a magnitude e a natureza destas forças podem ser controladas pela manipulação de uma ampla gama de parâmetros experimentais, entre eles podemos citar o tamanho das partículas, pH, natureza e concentração de eletrólitos ou pela adição de espécies ativas na superfície da partícula, isto inclui surfatantes, polímeros e polieletrólitos.

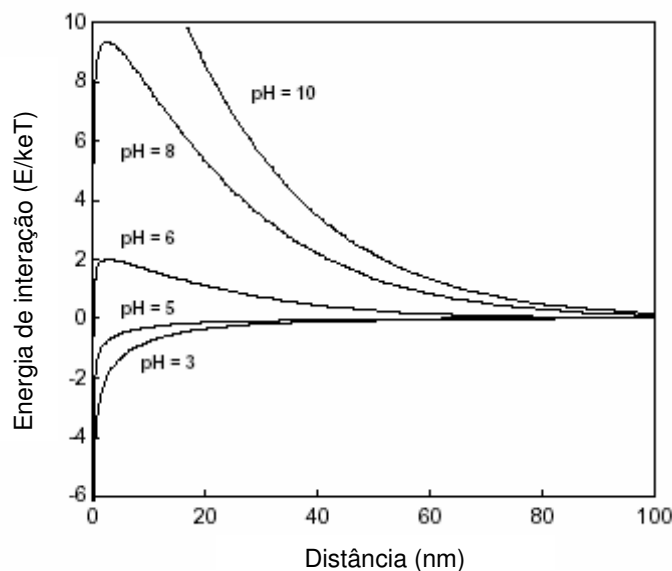


Figura 3.14: Energia de interação entre partículas de calcopirita e pirita.

(Mitchell et al., 2005)

Dupla Camada Elétrica (DCE)

A imersão de um sólido em uma solução aquosa produz uma região não homogênea na interface sólido-líquido. O excesso de carga positiva ou negativa, originada da superfície do mineral é balanceado por contra íons formando uma região difusa com mesma intensidade de carga, porém de sinal oposto (Figura 3.15). (Fuesternau et al., 2005)

Quando duas partículas se aproximam elas estão sujeitas as forças de caráter eletrostático que podem ser atrativas ou repulsivas dependendo do sinal das cargas superficiais. O modelo utilizado para descrever a energia de interação é baseado na equação de Poisson-Boltzmann, que descreve o potencial eletrostático de uma solução iônica em função da distância entre partículas e/ou reagentes. (Mitchell et al., 2005)

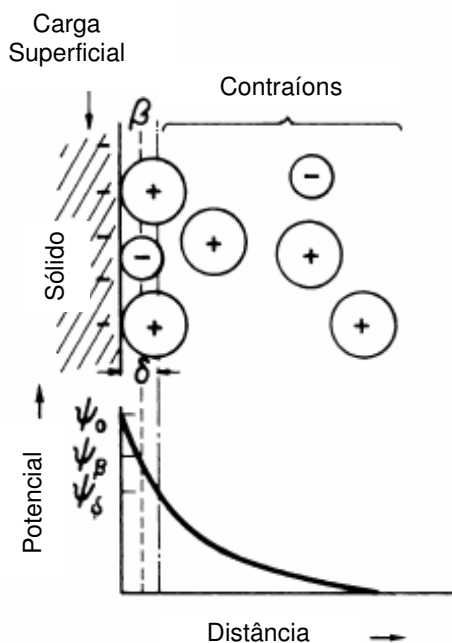


Figura 3.15: Representação esquemática da Dupla Camada Elétrica (DCE) e do potencial na interface sólido-líquido. (Fuesternau et al., 2005)

O parâmetro mais importante para descrever a DCE de um mineral em solução aquosa é o Ponto de Carga Zero (PCZ). O PCZ expressa o pH no qual a carga superficial, no plano de cisalhamento é zero. Marcando, desta forma, o sinal e a intensidade da carga em função do pH.

Nos óxidos minerais o sinal e a intensidade da carga superficial são determinados pelos íons H^+ ou pela hidroxila OH^- . Estes íons são denominados íons determinadores de potencial (IDP) e são influenciados diretamente pelo

pH da solução. A adsorção/dissociação de íons H^+ na superfície da hidroxila irá determinar a carga superficial da partícula. A Figura 3.16 apresenta a curva do potencial zeta de uma amostra de Caulinita. (Araujo e Galery, 1987)

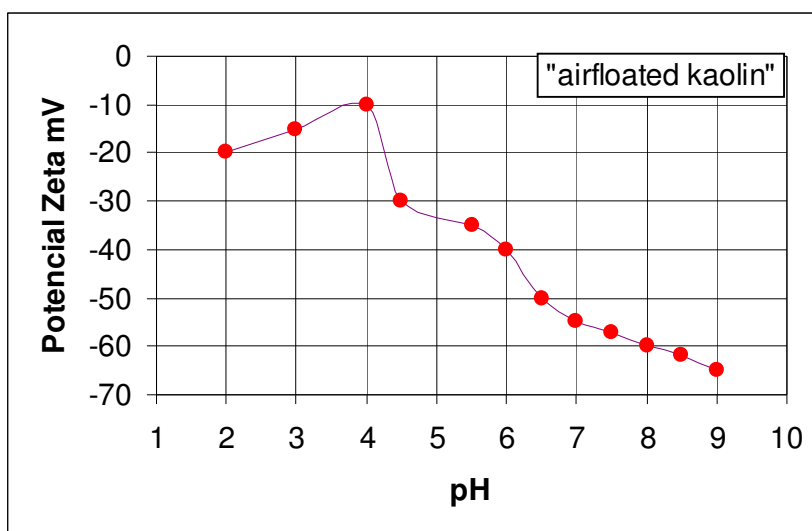
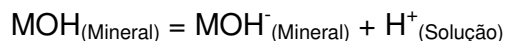


Figura 3.16: Potencial Zeta de uma amostra de Caulinita (Araujo e Galery, 1987).

Forças de van der Waals

As forças de van der Waals, em uma escala microscópica, são geradas pela formação de dipolos instantâneos nos átomos. Cada átomo independente é não polar por natureza e a formação do dipolo instantâneo é possível devido à flutuação do centro de massa da nuvem de elétrons em relação ao núcleo positivo. O campo eletromagnético gerado por cada dipolo interage com os átomos vizinhos gerando um dipolo induzido. Os dipolos induzidos tendem a tomar uma orientação de forma que a energia de interação seja minimizada. As interações entre dipolos são atrativas e sua magnitude cresce com o inverso da distância, este fenômeno atômico, em escala macroscópica, resulta, na maioria dos casos, em uma força atrativa entre partículas. (Johnson et al., 2000)

Para a interação de duas partículas esféricas idênticas de raio r , separadas por uma distância h , sendo $r \gg h$, as forças de van der Waals podem ser escritas pela equação 3.2.

$$F_{vdw} = - rA_H / 12 h^2 \quad (3.2)$$

Onde, A_H é uma propriedade intrínseca da partícula denominada constante de Hamaker.

Existem diversos métodos para o cálculo da constante de Hamaker, sendo o desenvolvido por Lifshitz o que produz a melhor aproximação.

3.3.3 Planejamento fatorial

Levando-se em conta os diversos fatores apresentados anteriormente, a otimização das condições de sedimentação apresenta-se de maneira complexa, devido ao grande número de variáveis independentes que podem afetar este processo. Estudos de otimização que utilizam a aproximação de “uma variável por vez” podem ser muito ineficientes e algumas vezes duvidosos, pois as diversas variáveis envolvidas podem ser interdependentes. É comum que ocorram interações múltiplas entre as variáveis e a identificação destas interações contribui para o entendimento e otimização das operações. Desta forma, o planejamento fatorial apresenta-se como uma eficiente ferramenta para a otimização de operações que envolvam sistemas multivariáveis. (Sheridan et al., 2002)

O planejamento fatorial possibilita a observação das respostas às diferentes variáveis de maneira espacial permitindo o modelamento tridimensional dos resultados, facilitando a identificação de pontos ótimos e uma melhor avaliação de como as diferentes variáveis se relacionam. A Figura 3.17 apresenta de maneira esquemática a distribuição espacial para este tipo de ensaio, com três variáveis independentes.

O planejamento com duas variáveis irá formar um plano, gerando uma superfície de resposta.

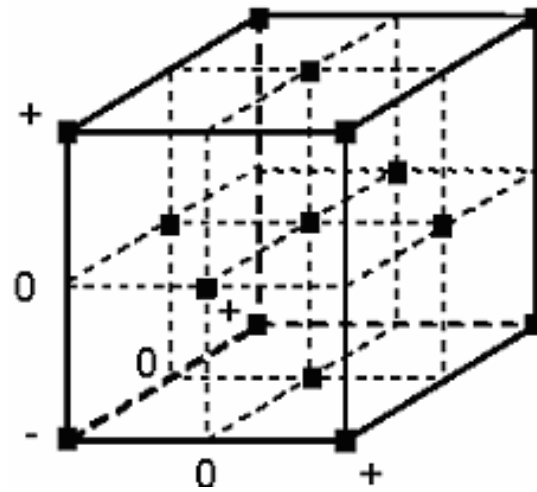


Figura 3.17: Planejamento fatorial 2^3 (Sheridan et al., 2002)

A matriz do planejamento é apresentada na Tabela III.3, sendo o nível mais elevado representado pelo sinal "+", o nível mais baixo pelo sinal "-" e o nível base pelo sinal "0".

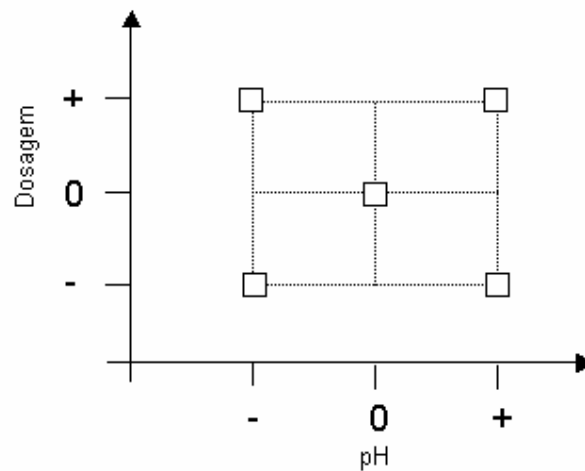


Figura 3.18: Planejamento fatorial 2^2

Tabela III.3: Matriz do planejamento fatorial

Observação	pH	Dosagem
1	0	0
2	0	0
3	-	-
4	+	-
5	-	+
6	+	+

Os resultados obtidos serão modelados seguindo o polinômio descrito pela equação (3.3) onde foram avaliados os coeficientes de interação e as respostas relativas da velocidade de sedimentação e da porcentagem de sólidos final do material floculado. (Naik et al., 2005)

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1X_2 \quad (3.3)$$

Onde,

Y = Variável dependente (Velocidade de sedimentação ou porcentagem de sólidos final do material floculado)

$X_1 = (\text{Dosagem} - \text{índice "0"}) / (\text{índice "+"} - \text{índice "-"})$

$X_2 = (\text{pH} - \text{índice "0"}) / (\text{índice "+"} - \text{índice "-"})$

b_0, b_1, b_2 e b_3 = coeficientes da regressão

Na equação (3.3) b_0 representa o valor médio e as constantes b_1, b_2 e b_3 o peso de cada variável no processo em questão, no caso a velocidade de sedimentação ou a porcentagem de sólidos final do material floculado. Sendo que b_1 representa a influência da dosagem, b_2 a influência do pH e b_3 a influência da relação entre a dosagem e o pH.

Box et al. (1978) apresentam uma excelente discussão da teoria do planejamento fatorial e Sworska et al. (2000) apresentam um estudo do uso do planejamento fatorial para a floculação de rejeitos oriundos do beneficiamento de areia betuminosa.

3.4 Reologia

A reologia de suspensões compreende o estudo do comportamento de fluxo de suspensões de sólidos, utilizando principalmente, a determinação da viscosidade aparente e a tensão de escoamento. Segundo Barnes et al. (1989) o estudo da deformação e fluxo da matéria, os quais envolvem fenômenos de elasticidade, plasticidade e viscosidade, constitui-se no principal objetivo da reologia. (Ferreira et al., 2005)

Isaac Newton realizou um dos primeiros estudos de fluxo de um fluido. Ele considerou um modelo constituído por duas lâminas paralelas de mesma área, (A), próximas uma da outra a uma distância (y) entre as quais existe um fluido. Ao se aplicar uma força tangencial F sobre a lâmina superior, mantendo fixa a inferior, cada partícula do fluido percorre uma trajetória paralela às lâminas com velocidade constante (v). No entanto, a velocidade das diversas partículas varia de v, junto à lâmina superior, a zero, junto à lâmina inferior. Newton postulou que a força tangencial F é diretamente proporcional à área A da lâmina e ao gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento dv/dy , equação (3.4). A relação F/A é denominada tensão de cisalhamento e a relação tensão de cisalhamento (τ) por taxa de cisalhamento (γ) é denominada viscosidade absoluta ou dinâmica (μ). (Possa et al., 2000)

Assim,

$$\mu = \frac{F/A}{dv/dy} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.4)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

γ = taxa de cisalhamento (1/s).

Uma das formas de caracterização do comportamento reológico de suspensões consiste na realização de ensaios de medidas da tensão de cisalhamento, reportados como curvas de fluxo (Figura 3.10).

3.4.1 Classificação reológica dos fluidos

Segundo Ferreira et al., (2005) os fluidos podem receber diversas classificações, sendo as principais descritas abaixo e ilustradas na Figura 3.19.

Fluidos newtonianos

Fluidos newtonianos apresentam uma relação linear entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, como mostra a equação de Newton (equação 3.4), ou seja, a viscosidade mantém-se constante com a variação na taxa de cisalhamento (Figura 3.19).

Fluidos não-newtonianos

Ao contrário dos fluidos newtonianos, os fluidos não-newtonianos não apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, isto é, os valores da viscosidade mudarão com a variação nos valores da taxa de cisalhamento. Esses valores de viscosidade são considerados como viscosidade aparente, podendo aumentar ou diminuir, de acordo com as características de cada fluido.

Para alguns fluidos, os valores de viscosidade diminuem com o aumento da taxa de cisalhamento. Neste caso, diz-se que o material possui comportamento pseudoplástico.

Quando o contrário acontece, ou seja, a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento, diz-se que o material possui comportamento dilatante.

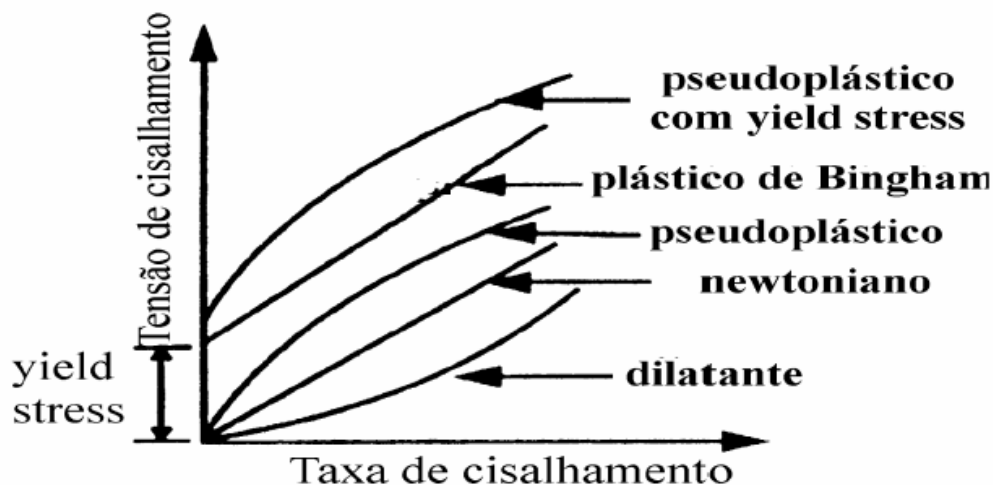


Figura 3.19: Classificação do comportamento reológico de diferentes tipos de suspensões. (Ferreira et al., 2005)

Outros tipos de fluidos não-newtonianos são fluidos plásticos. Estes fluidos necessitam de uma tensão finita, conhecida como tensão de escoamento, para que ocorra o movimento das partículas. Esse comportamento é característico de suspensões pseudo-homogêneas de partículas finas ou ultrafinas. Segundo Nguyen e Boger (1992), o valor da tensão de escoamento denota a transição entre o comportamento de um sólido e um líquido. Uma das principais aplicações desse parâmetro tem sido no projeto e monitoramento do transporte de suspensões através de bombeamento, onde se deseja um valor da tensão de escoamento que possibilite o transporte de suspensões sem a ocorrência de sedimentação de partículas.

Coussot (1997) afirma que as propriedades reológicas em termos macroscópicos serão influenciadas pelas interações em nível microscópico, devido a transferências de energia nessas interações. Ele também cita cinco tipos de efeitos, que são: Browniano, hidrodinâmicos, de empacotamento, coloidal e efeito de inércia.

Na caracterização microscópica da reologia de uma polpa Pawlik e Laskowski (1999) consideram importante o balanço de três forças agindo no sistema água-partícula: difusão Browniana, interação hidrodinâmica e 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.

A polpa, formada principalmente por Caulinita, pode ser descrita como um sistema no qual a fase sólida encontra-se dispersa na fase líquida. Devido a carga superficial apresentada pelas partículas, forças atrativas de van der Waals e forças repulsivas de caráter eletrostático dominam as interações entre partículas. A soma destas interações irá determinar a natureza da reologia da polpa.

A interação entre partículas pode ser fortemente repulsiva, mantendo as partículas dispersas, induzindo o fluido a exibir a característica de um fluido newtoniano. Por outro lado, tais interações podem ser fortemente atrativas formando estruturas que podem interagir entre si, levando a polpa a exibir uma característica não-newtoniana. Estas estruturas podem, também, resistir a forças de cisalhamento, fazendo com que esta apresente uma resistência ao fluxo ou tensão de escoamento.

O principal modelo que utiliza a tensão de escoamento (τ_0) é o modelo de Bingham apresentado na equação (3.5), abaixo.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} + \tau_0 \quad (3.5)$$

As características reológicas da polpa podem ser manipuladas pela alteração da percentagem de sólidos ou pelo controle das forças de interação entre partículas. As forças repulsivas de caráter eletrostático podem ser aumentadas ou diminuídas através da manipulação do pH ou dos íons presentes no meio. O

aumento das forças repulsivas com a adição de reagentes dispersantes pode diminuir ou quebrar as estruturas formadas eliminando o caráter não-newtoniano da polpa. O caminho contrário também pode ser seguido, aumentando as forças atrativas presentes e conseqüentemente aumentado o caráter não-newtoniano. (Litzenberger, 2003)

Johnson et al. (2000) realizaram estudos em que foram analisadas a influência das propriedades superficiais das partículas sobre a reologia das polpas. Seus estudos tiveram como foco a interação das forças entre partículas presentes. O Ponto de Carga Zero (PCZ) de amostras de alumina e zircônia foram determinados e a tensão de cisalhamento medida variando-se o pH para diferentes porcentagens de sólidos. Os resultados obtidos (Figura 3.20) mostram que a tensão de cisalhamento sofre a influência das forças de interação entre partículas, aumentando quando estas encontram-se próximas do ponto de carga zero (pH 9). Os autores acreditam que este fato se deve ao menor grau de repulsão entre as partículas presentes, permitindo uma maior aproximação favorecendo a agregação e conseqüentemente aumento da tensão de escoamento.

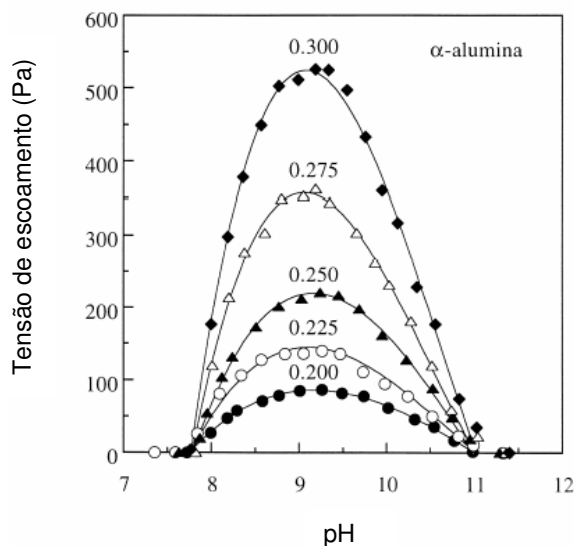


Figura 3.20: Tensão de escoamento de uma amostra de alumina em função do pH para diferentes porcentagens de sólidos. (Johnson et al., 2000)

3.5 Manuseio

Do ponto de vista do manuseio, uma mistura sólido-líquido pode ser classificada como as que não sedimentam e as que sedimentam. Polpas que sedimentam contém partículas que podem apresentar velocidades de sedimentação elevadas. Quando bombeadas a baixas velocidades formarão um leito no fundo da tubulação sendo necessário seu manuseio através de um fluxo turbulento. Polpas que não sedimentam são compostas por partículas finas, que quando manuseadas apresentam uma distribuição uniforme na tubulação e apresentam uma distribuição uniforme da velocidade, favorecendo um fluxo laminar. De fato essa simplificação não se apresenta muito adequada, pois muitas das polpas manuseadas em operações de bombeamento de minérios apresentam as duas características. (Litzenberger, 2003)

O conhecimento da reologia do material está diretamente relacionado com o manuseio por meio de operações de bombeamento, permitindo a identificação das condições ótimas para o transporte hidráulico. Tal conhecimento possibilita o sucesso técnico e econômico do transporte de grandes volumes de polpas por tubulações, com alta porcentagem de sólidos e com o mínimo consumo energético.

O bombeamento de líquidos e polpas por tubulações implica em uma perda de energia devido a fricção entre a polpa e a parede interna do tubo. Portanto ao projetar uma tubulação, é necessário conhecer a magnitude destas perdas e prover a energia necessária de forma que a vazão requerida seja atendida. A Figura 3.21 ilustra o comportamento de um fluido de Bingham transportado por meio de um fluxo laminar em uma tubulação. A tensão de cisalhamento varia de τ_w na parede do tubo até zero no centro do tubo.

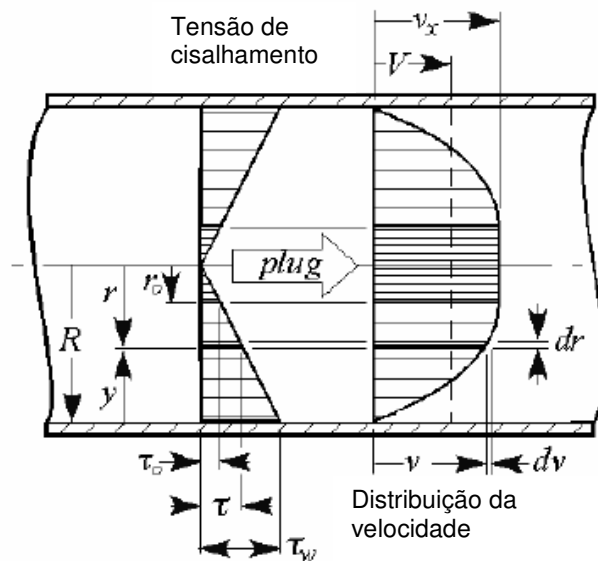


Figura 3.21: Distribuição da velocidade de um fluido de Bingham em um fluxo laminar. (Roudev et al., 2002)

Segundo Roudev et al. (2002) o custo de bombeamento é diretamente proporcional ao tipo de fluxo na tubulação, quando submetido a velocidades mais altas torna-se turbulento e o custo de bombeamento varia parabolicamente, proporcional ao quadrado do fluxo.

Ralston et al. (2000), em seu trabalho descreve o método desenvolvido por Darby et al. (1992) que permite quantificar a energia necessária ao bombeamento para um regime laminar, utilizando parâmetros reológicos retirados do modelo de Bingham, o modelo pode ser definido conforme as equações descritas abaixo. Deve-se ressaltar que polpas com altas porcentagens de sólidos geralmente favorecem o fluxo laminar.

Os números de Reynolds (Re) e de Hedstrom (He) podem ser calculados utilizando-se dos parâmetros tensão de escoamento (τ_0) e viscosidade (μ), conforme as equações (3.9) e (3.10).

$$Re = d v \rho / \mu \quad (3.9)$$

$$He = d^2 \rho \tau_0 / \mu^2 \quad (3.10)$$

Onde, d é o diâmetro da tubulação, v é a velocidade de transporte e ρ a densidade da polpa.

As equações (3.11) e (3.12) apresentam a análise dimensional e definem os números de Reynolds e Hedstrom.

Dimensionalmente, o número de Reynolds (Re) pode ser definido como:

$$Re = d \rho^A v^B \mu^C \quad (3.11)$$

$$M^0 L^0 t^0 = L [M/L^3]^A [L/t]^B [M/Lt]^C$$

$$M: 0 = A + C$$

$$L: 0 = 1 - 3A + B + C$$

$$T: 0 = -B - C$$

Resolvendo as equações temos

$$A = 1, B = 1 \text{ e } C = -1$$

Assim,

$$Re = \rho v d / \mu$$

Dimensionalmente, o número de Hedstrom (He) pode ser definido conforme as equações abaixo:

$$He = \tau_0 \rho^A \mu^B d^C \quad (3.12)$$

$$M^0 L^0 t^0 = [M/Lt^2][M/L^3]^A [M/Lt]^B L^C$$

$$M: 0 = 1 + A + B$$

$$L: 0 = -1 - 3A - B + C$$

$$T: 0 = -2 - B$$

Resolvendo as equações temos

$$A = 1, B = -2 \text{ e } C = 2$$

Assim,

$$He = \rho \tau_0 d^2 / \mu^2$$

Assim, os fatores de fluxo turbulento e laminar podem ser calculados conforme as equações (3.13) e (3.14).

$$fT = 10^\alpha Re^{-0,193} \quad (3.13)$$

$$fL = [16 / Re] [(1+(He / 6 Re) - (He^4 / 3 f^3 Re^7))] \quad (3.14)$$

Onde f é o fator de Fanning dado pela equação (3.15)

$$f = (fL^\beta + fT^\beta)^{1/\beta} \quad (3.15)$$

Os fatores α e β são obtidos pelas equações (3.16) e (3.17)

$$\alpha = -1,47 [1 + 0,146 \exp(-2,9 \cdot 10^{-5} He)] \quad (3.16)$$

$$\beta = 1,7 + (4 \cdot 10^4 / Re) \quad (3.17)$$

O fator de Fanning será utilizado na equação (3.18) para a determinação da pressão necessária (Δp), onde h corresponde ao comprimento da tubulação.

$$-\Delta p = 2 h \rho v^2 f / d \quad (3.18)$$

A potência necessária para o bombeamento da polpa pode ser obtida pela equação (3.19), onde M é a massa de polpa a ser bombeada.

$$P = -\Delta p M / \rho \quad (3.19)$$

Finalmente a energia necessária para o bombeamento da polpa pode ser obtida pela equação (3.20), onde t corresponde ao tempo de bombeamento.

$$E = P t \quad (3.20)$$

Pela definição apresentada acima, Ralston et al. (2000) mostraram que com a alteração da tensão de escoamento e viscosidade, é possível a manipulação e otimização do fluxo transportado, resultando em um aumento na porcentagem de sólidos da polpa e conseqüentemente o aumento do fluxo de material. A Figura 3.22 mostra o ganho apresentado pela manipulação da reologia de uma polpa de calcopirita com a adição de diferentes tipos de reagentes.

Shou (2003) apresenta as alternativas possíveis para o transporte de rejeitos através de operações de bombeamento. Bombas centrífugas cobrem uma faixa de aplicação maior que as bombas de deslocamento positivo, porém, para porcentagens de sólidos mais elevadas, normalmente são utilizadas bombas de deslocamento positivo capazes de atingir maiores pressões.

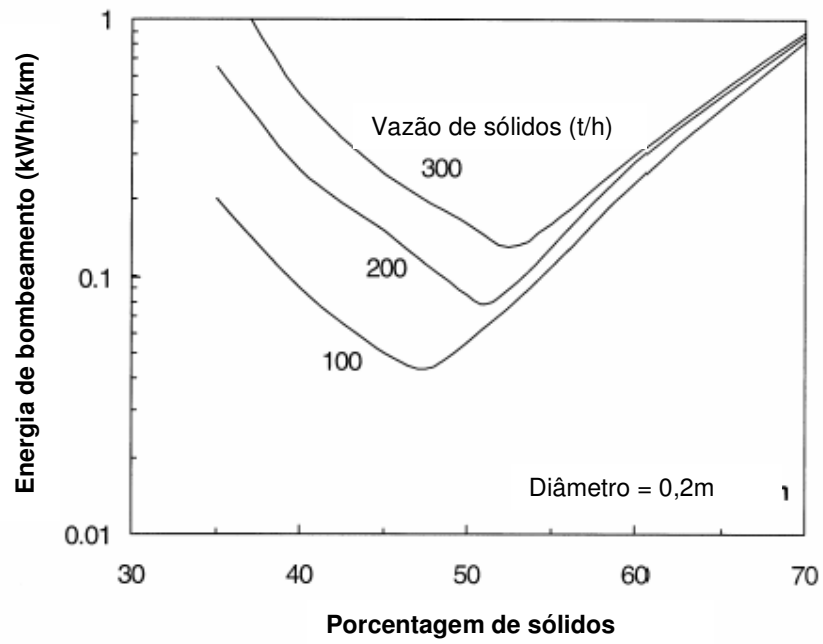


Figura 3.22: Otimização do bombeamento em função da modificação da reologia da polpa. (Nguyen et al., 1998)

4. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os métodos e materiais utilizados no desenvolvimento da parte experimental do presente trabalho.

As amostras utilizadas foram submetidas à caracterização mineralógica, granulométrica, química, peso específico, área superficial e ponto de carga zero.

Ensaio de sedimentação foram realizados com floclulantes de diferentes princípios ativos, onde serão variados a dosagem e o pH. Os ensaios de sedimentação foram planejados pelo método fatorial 2^2 de forma que seja possível determinar a interdependência entre as duas variáveis avaliadas.

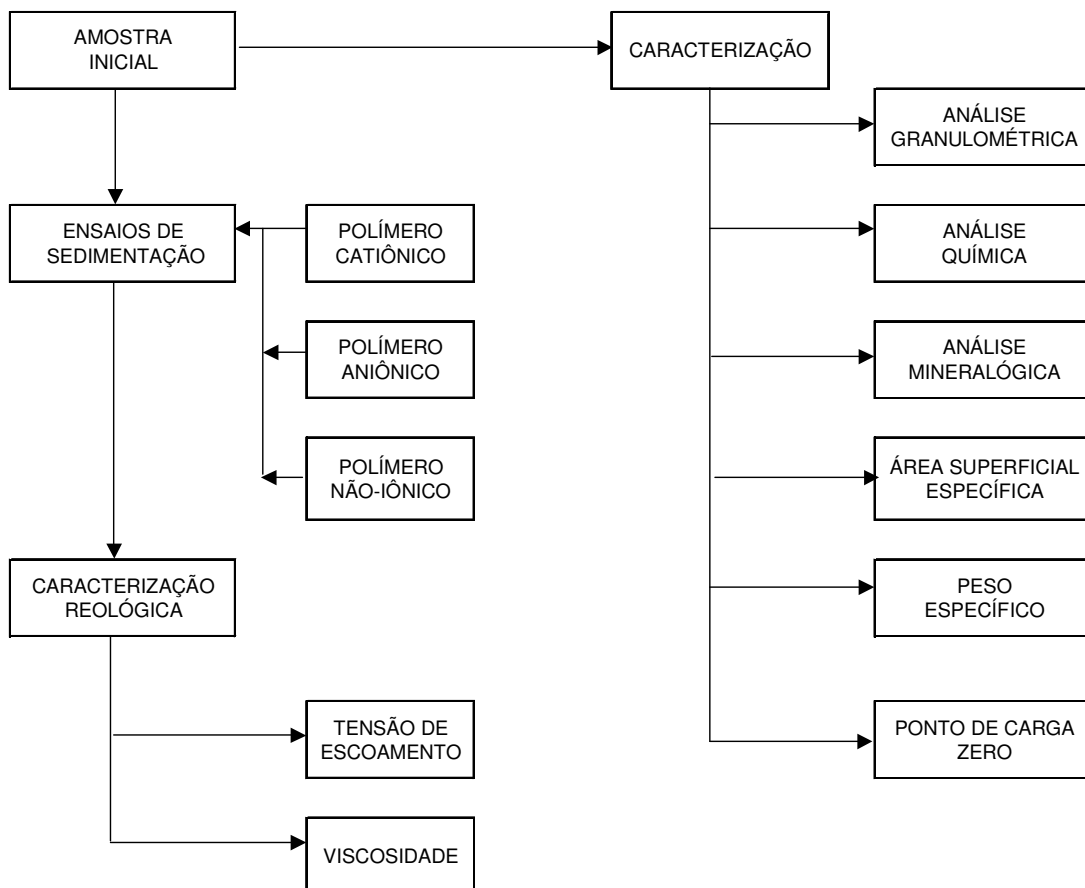


Figura 4.1: Fluxograma do planejamento dos ensaios.

Para os ensaios de sedimentação que apresentarem os melhores resultados dentro do planejamento fatorial foram realizados ensaios para a caracterização reológica do material floculado. Nesta etapa foram determinadas a viscosidade e a tensão de escoamento. A Figura 4.1 apresenta um diagrama esquemático dos ensaios propostos.

4.1 Composição e preparação das amostras

As amostras minerais utilizadas no desenvolvimento dos trabalhos representam o rejeito proveniente do beneficiamento de bauxita estando originalmente na forma de polpa diluída, com baixa porcentagem de sólidos e granulometria abaixo de $212\mu\text{m}$ (65#), sendo formado principalmente por argilas.

As amostras originais foram obtidas de furos de sondagem tendo sido tratadas em laboratório, onde o processo de beneficiamento foi simulado (Figura 4.2.)

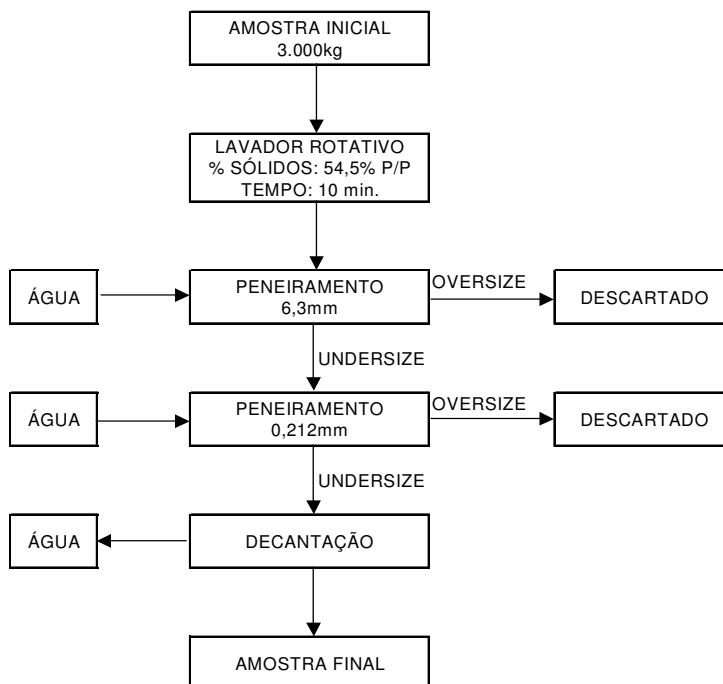


Figura 4.2: Fluxograma esquemático da preparação inicial das amostras.

A amostra final foi encaminhada em três tambores de 200 litros sendo denominados T1, T2 e T3. A partir destes tambores, após homogeneização alíquotas menores foram retiradas, compondo a amostra final utilizada nos ensaios.

4.2 Caracterização

As amostras fornecidas foram caracterizadas conforme apresentado na Tabela IV.1 abaixo:

Tabela IV.1: Procedimentos utilizados para caracterização das amostras.

Propriedade	Técnica
Distribuição granulométrica	Peneiramento e difração laser
Peso específico	Picnometria a Hélio
Área Superficial Específica (ASE)	Adsorção de Nitrogênio
Composição química	Métodos via úmida
Composição mineralógica	Difração de RX
Ponto de Carga Zero (PCZ)	Mular e Roberts

4.3 Ensaios de sedimentação

Os ensaios de sedimentação foram realizados em provetas de 1.000 mL e seguiram a metodologia clássica (FITCH, 1966, onde foram traçadas curvas de sedimentação da altura da interface versus tempo.

4.4 Reagentes

Foram utilizados três diferentes tipos de reagentes poliméricos (floculantes) de alto peso molecular, estes possuíam caráter catiônico, não iônico e aniônico. Os floculantes utilizados foram C-494 para o catiônico, N-100 para o não iônico e A-130 para o aniônico, todos da linha Superfloc, fabricados pela Cytec e foram denominados:

PAM – C: Floculante Catiônico (C-494);

PAM – N: Floculante Não-iônico (N-100);

PAM – A: Floculante Aniônico (A-130).

As amostras foram submetidas aos ensaios fatoriais com os floculantes citados.

4.5 Tensão de escoamento e viscosidade

A tensão de escoamento e a viscosidade foram determinadas com o auxílio de um reômetro equipado com conjunto de aletas (*vane*), pertencente ao Centro de Desenvolvimento Mineral da Companhia Vale do Rio Doce e foram modeladas segundo um fluido de Bingham.

4.6 Planejamento fatorial

Para o presente estudo as duas variáveis independentes consideradas no planejamento foram o pH (x_2) e a dosagem (x_1) de três diferentes tipos de floculantes (catiônico, aniônico e não iônico) sendo utilizado um tipo de floculante por ensaio e gerada uma superfície de resposta para cada um (Figura 3.18). As respostas foram analisadas em função da porcentagem de sólidos final do material floculado e da velocidade de sedimentação.

Utilizando-se desta ferramenta o número de ensaios foi reduzido a cinco, porém, de acordo com o princípio básico deste tipo de planejamento foram executados dois experimentos para o nível base para estimar o erro e o desvio padrão (Tabela III.3). Assim, para cada tipo de floculante utilizado foram realizados seis experimentos.

As Tabelas IV.2, IV.3, IV.4 e IV.5 apresentam o planejamento para os três diferentes tipos de floculantes empregados (aniônico, catiônico e não iônico).

Tabela IV.2: Detalhamento dos ensaios de sedimentação.

Nº do Experimento	Dosagem de floculante (x_1)	pH (x_2)
1	0	0
2	0	0
3	-	-
4	+	-
5	-	+
6	+	+

Tabela IV.3: Fatores e níveis nos ensaios de sedimentação com o uso de floculante catiônico.

TIPO DE FLOCULANTE	CATIÔNICO		
Fatores/Níveis	-	0	+
pH	5	6	7
Dosagem (g/t)	90	110	130

Tabela IV.4: Fatores e níveis nos ensaios de sedimentação com o uso de floculante aniônico.

TIPO DE FLOCULANTE	ANIÔNICO		
Fatores/Níveis	-	0	+
pH	5	6	7
Dosagem (g/t)	70	90	110

Tabela IV.5: Fatores e níveis nos ensaios de sedimentação com o uso de floculante não iônico.

TIPO DE FLOCULANTE	NÃO IÔNICO		
Fatores/Níveis	-	0	+
pH	5	6	7
Dosagem (g/t)	60	90	120

Utilizando-se do planejamento já descrito, foram avaliadas as interdependências entre as variáveis pH e dosagem de floculante, em função da velocidade de sedimentação e da porcentagem de sólidos final do material floculado, após o tempo de uma hora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização

5.1.1 Peso Específico

Três diferentes amostras foram encaminhadas para a determinação do peso específico utilizando-se de técnicas de picnometria a gás. A Tabela V.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela V.1: Peso específico das amostras

Amostra	Densidade (g/cm³)
APG01	2,39
APG02	2,36
APG03	2,20

Dois dos valores encontrados para o peso específico da amostra estão próximos de valores normalmente encontrados na literatura, porém para a terceira determinação o valor encontrado é significativamente mais baixo (2,20g/cm³). Este fato pode ser devido à presença de poros fechados no interior das partículas.

5.1.2 Área Superficial Específica

A Área Superficial Específica (ASE) da amostra, determinada pelo método de adsorção de Nitrogênio BET, foi de 28,98 m²/g.

Esta área superficial apresentou-se um pouco discrepante quando comparada a distribuição granulométrica das partículas. Para a ASE encontrada esperava-se uma distribuição granulométrica um pouco mais fina, com um d₅₀ estimado em aproximadamente 5µm. A diferença encontrada pode ser devido a pouca dispersão entre as partículas, estando estas agregadas durante a análise granulométrica no granulômetro a laser, sendo medido o tamanho das partículas agregadas e não seu tamanho efetivo. Outra possível justificativa

para a diferença encontrada pode ser devido a presença de poros, que podem contribuir de maneira significativa para o aumento da ASE.

Para o presente estudo medidas de ASE pelo método de Blaine poderiam apresentar a área superficial mais coerente com a distribuição granulométrica, pois não seriam medidos poros muito estreitos ou com aberturas muito fechadas como no caso da adsorção de Nitrogênio.

5.1.3 Composição Mineralógica (ver difratograma e análise no Apêndice 1)

Os procedimentos de caracterização possibilitaram a obtenção da estimativa da composição mineralógica das amostras, conforme exposto na Tabela IV.1.

A identificação das fases, abaixo discriminadas, foi obtida por comparação do difratograma da amostra com banco de dados do ICDD - International Centre for Diffraction Data. Na composição mineralógica obtida foram individualizadas as espécies minerais principais constituintes da amostra.

A caracterização das amostras mostrou que as lamas investigadas constituem-se principalmente de minerais Gibbsita, Caulinita, Quartzo e em quantidades pequenas os minerais Goethita, Anatásio e Hematita. A técnica empregada mostra que também podem estar presentes os minerais Boehmita, Dickita e Nacrita (estes dois últimos de composição química idêntica à da Caulinita).

5.1.4 Composição Química Tecnológica

As amostras submetidas à análise química, por métodos tradicionais do beneficiamento de bauxita determinaram os teores de SiO_2 Total, Fe_2O_3 e Al_2O_3 Aproveitável das amostras.

Tabela V.2: Composição química tecnológica das amostras.

TEOR		
Al ₂ O ₃ Aproveitável	SiO ₂ Total	Fe ₂ O ₃
24,5	19,0	16,5

5.1.5 Ponto de Carga Zero (PCZ)

O PCZ determinado pelo método de Mular e Roberts (Mular et al. 1966) encontra-se no pH 6,2, tendo sido coberta a faixa de pH de 4 a 11, conforme mostrado na Figura 5.1.

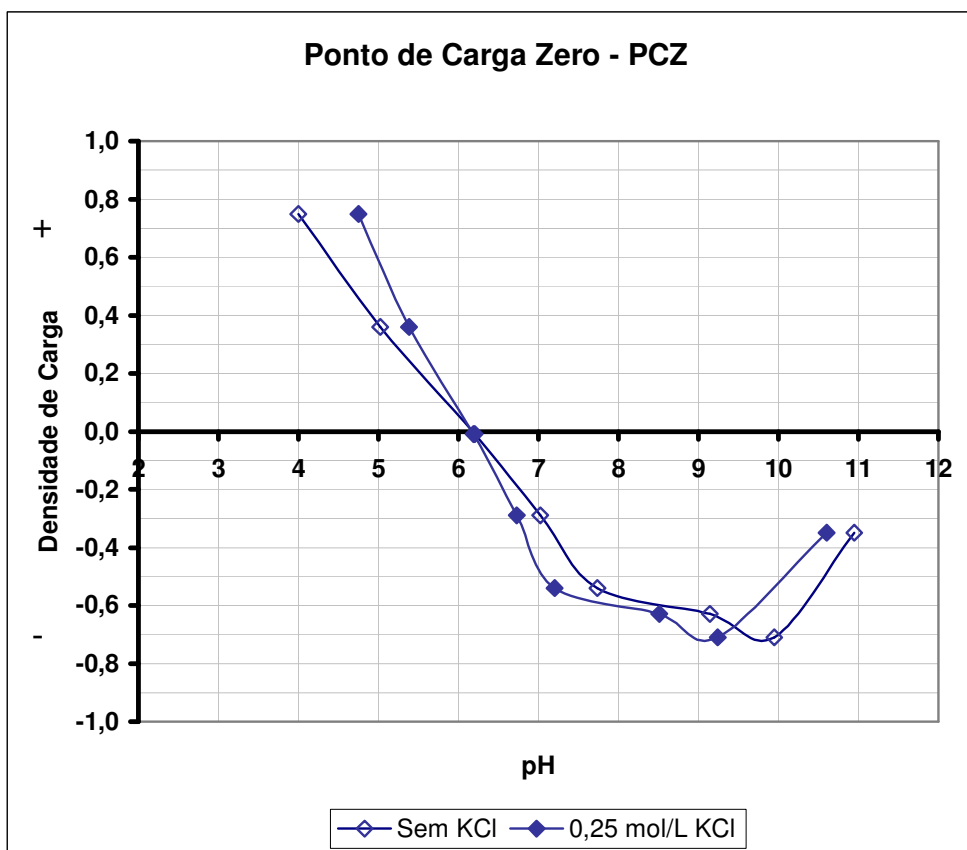


Figura 5.1: Ponto de Carga Zero da amostra.

O Ponto de Carga Zero (PCZ) da amostra encontra-se no pH 6,2, para valores inferiores a este pH a carga superficial encontra-se carregada positivamente, sendo os íons OH⁻ desorvidos e substituídos pelo ânion Cl⁻ quando da adição

do eletrólito. Para valores superiores ao pH 6,2 a carga superficial das partículas encontra-se negativa. Embora a Caulinita seja a principal fase, as demais fases minerais presentes na amostra possuem comportamento anfotérico de dissociação que leva os valores de PIE e de PCZ para valores de pH na faixa entre 6 e 8. Isso justificaria o valor encontrado e mostrado na Figura 5.1 mesmo levando em conta que as Caulinitas tendem a ter carga elétrica negativa em toda a faixa de pH.

5.1.6 Distribuição granulométrica

A Figura 5.2 apresenta a distribuição granulométrica das partículas que compõem a amostra, assim como o modelamento da distribuição através da equação de Rosin-Rammler, equação (5.1), mostrada abaixo.

$$Y = 100.e^{-(d/k)^m} \quad (5.1)$$

Onde:

Y % Passante acumulada, em peso;

d Tamanho das partículas (μm);

k, m Constantes;

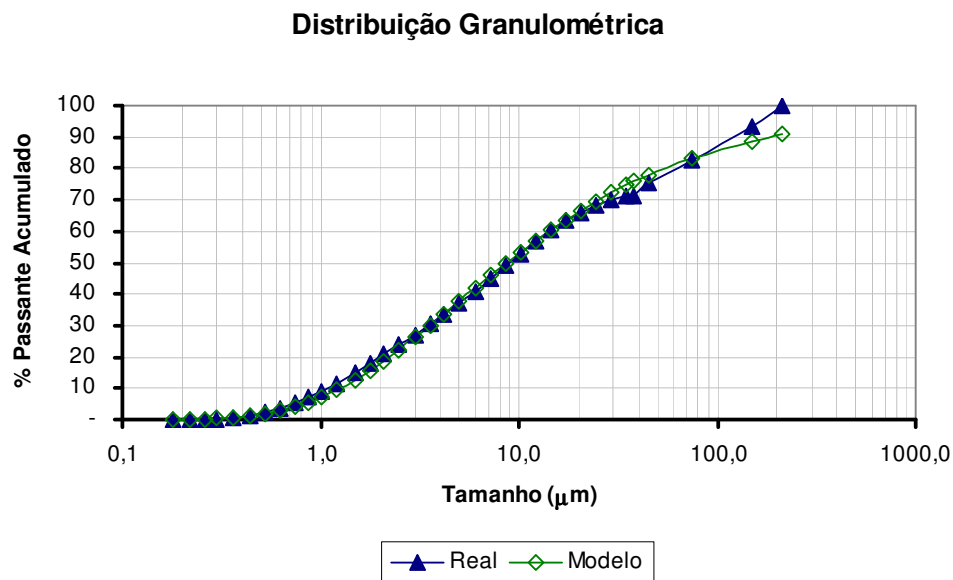


Figura 5.2: Distribuição granulométrica da amostra.

Utilizando-se da equação (5.1) os valores encontrados para as constantes k e m são 4,815 e -0,621 respectivamente. Assim, a equação para a distribuição granulométrica das partículas ficará conforme a equação (5.2) abaixo.

$$Y = 100.e^{-(d/4,815)^{-0,621}} \quad (5.2)$$

5.2 Ensaios de sedimentação

5.2.1 Floculante catiônico

Os ensaios de sedimentação com o uso de floculante catiônico foram executados conforme a Tabela IV.1, sendo os resultados obtidos mostrado na Tabela V.3, abaixo.

Tabela V.3: Resultados experimentais para os ensaios de sedimentação com o uso de floculante catiônico.

Ensaio	Dosagem (g/t)	pH	Velocidade (mm/min)	Cw no UF (%)
1	110	6	36,5	28,8
2	110	6	37,0	29,0
3	110	6	36,9	29,6
4	110	6	37,5	29,8
5	110	6	38,5	29,3
6	110	6	38,3	29,5
7	90	5	41,5	30,1
8	90	5	39,9	30,7
9	90	5	40,6	30,2
10	90	7	3,7	24,7
11	90	7	3,9	24,9
12	90	7	4,2	24,2
13	130	5	105,2	31,3
14	130	5	105,0	30,7
15	130	5	104,6	30,9
16	130	7	5,8	29,4
17	130	7	5,0	28,7
18	130	7	5,2	28,4

A Tabela V.4 abaixo apresenta o ajuste obtido, utilizando-se da equação (3.3).

Tabela V.4: Ajuste polinomial para floculante catiônico

Dosagem	X1	pH	X2	Velocidade (mm/min)	Desvio	Cw no UF	Desvio
110	0,0	6	0,0	38,3	3,21	28,9	0,01
110	0,0	6	0,0	38,3	1,67	28,9	0,01
110	0,0	6	0,0	38,3	1,94	28,9	0,49
110	0,0	6	0,0	38,3	0,63	28,9	0,81
110	0,0	6	0,0	38,3	0,04	28,9	0,16
110	0,0	6	0,0	38,3	0,00	28,9	0,36
90	-0,5	5	-0,5	40,2	1,61	30,6	0,20
90	-0,5	5	-0,5	40,2	0,11	30,6	0,02
90	-0,5	5	-0,5	40,2	0,11	30,6	0,12
90	-0,5	7	0,5	3,5	0,03	24,8	0,01
90	-0,5	7	0,5	3,5	0,16	24,8	0,01
90	-0,5	7	0,5	3,5	0,49	24,8	0,38
130	0,5	5	-0,5	104,5	0,47	31,2	0,01
130	0,5	5	-0,5	104,5	0,24	31,2	0,22
130	0,5	5	-0,5	104,5	0,01	31,2	0,08
130	0,5	7	0,5	4,9	0,71	29,1	0,12
130	0,5	7	0,5	4,9	0,01	29,1	0,12
130	0,5	7	0,5	4,9	0,09	29,1	0,42
Total					11,51	Total	3,57

Para o ajuste empregou-se o método de mínimos quadrados.

Para a velocidade de sedimentação, com o uso do floculante catiônico, os valores das constantes b_0 , b_1 , b_2 e b_3 obtidos no ajuste, de acordo com a equação (3.3), encontra-se na Tabela V.5, abaixo:

Tabela V.5 Constantes para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante catiônico.

b_0	38,3
b_1	32,8
b_2	-68,2
b_3	-62,9

Assim, para a velocidade de sedimentação, a equação (3.3) apresentada anteriormente, toma a seguinte forma:

$$Y = v_s = 38,3 + 32,8 X_1 - 68,2 X_2 - 62,9 X_1 X_2 \quad (5.2)$$

A equação descrita acima é válida dentro dos intervalos de pH e dosagem utilizados no planejamento fatorial, sendo o erro calculado para o uso da equação de 8,9%.

O valor encontrado para as variáveis b_1 , b_2 e b_3 permite observar que o pH influencia de maneira mais significativa na velocidade de sedimentação, seguido da interação entre a dosagem e o pH e como um terceiro fator, a dosagem.

Utilizando-se da equação (5.2) é possível calcular a velocidade de sedimentação em função das duas variáveis em questão (pH e dosagem). A Figura 5.3 apresenta a superfície de resposta de como a velocidade de sedimentação se comporta com a alteração dessas variáveis sendo possível identificar o ponto onde a velocidade de sedimentação apresenta-se máxima, dentro do intervalo em questão.

Para o floculante catiônico tal velocidade encontra-se no ponto de pH 5,0 com uma dosagem de 130g/t sendo a velocidade de 104,5 mm/min.

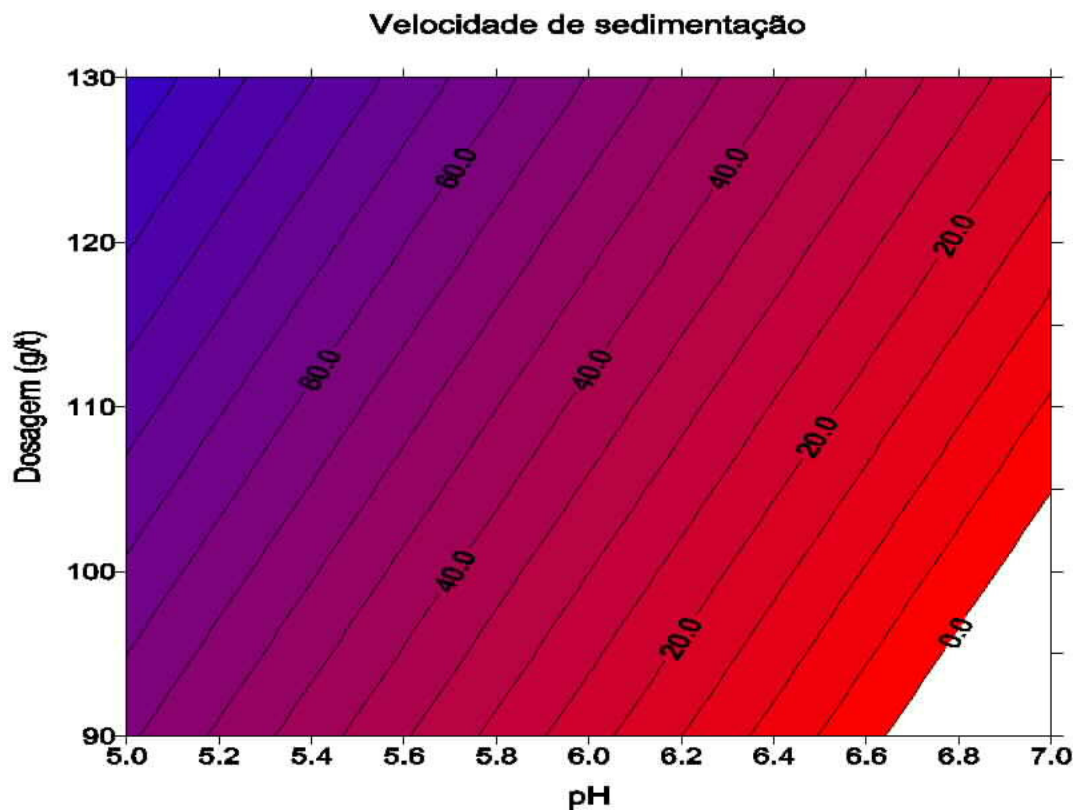


Figura 5.3: Superfície de resposta para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante catiônico.

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado, os valores obtidos para as constantes b_0 , b_1 , b_2 e b_3 , ajustados conforme a equação (3.3), encontram-se na Tabela V.6.

Tabela V.6: Constantes para a porcentagem de sólidos final com o uso do floculante catiônico.

b_0	28,9
b_1	2,4
b_2	-3,9
b_3	3,6

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado, com o uso do floculante catiônico, a equação (3.3) toma a seguinte forma:

$$Y = C_w = 28,9 + 2,4 X_1 - 3,9 X_2 + 3,6 X_1 X_2 \quad (5.3)$$

A equação descrita acima é válida dentro dos intervalos de pH e dosagem utilizados no planejamento fatorial, sendo o erro calculado para o uso da equação de 6,5%.

Novamente o pH apresenta-se como a variável que mais influencia no processo de sedimentação, seguido da relação entre as duas variáveis em questão (pH e dosagem), ficando a dosagem como o terceiro fator de influência.

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado a condição que apresentou o melhor resultado foi, novamente, para um valor de pH de 5,0 e uma dosagem de 130g/t, (Figura 5.4), ficando a porcentagem de sólidos final do material floculado com 31,2%.

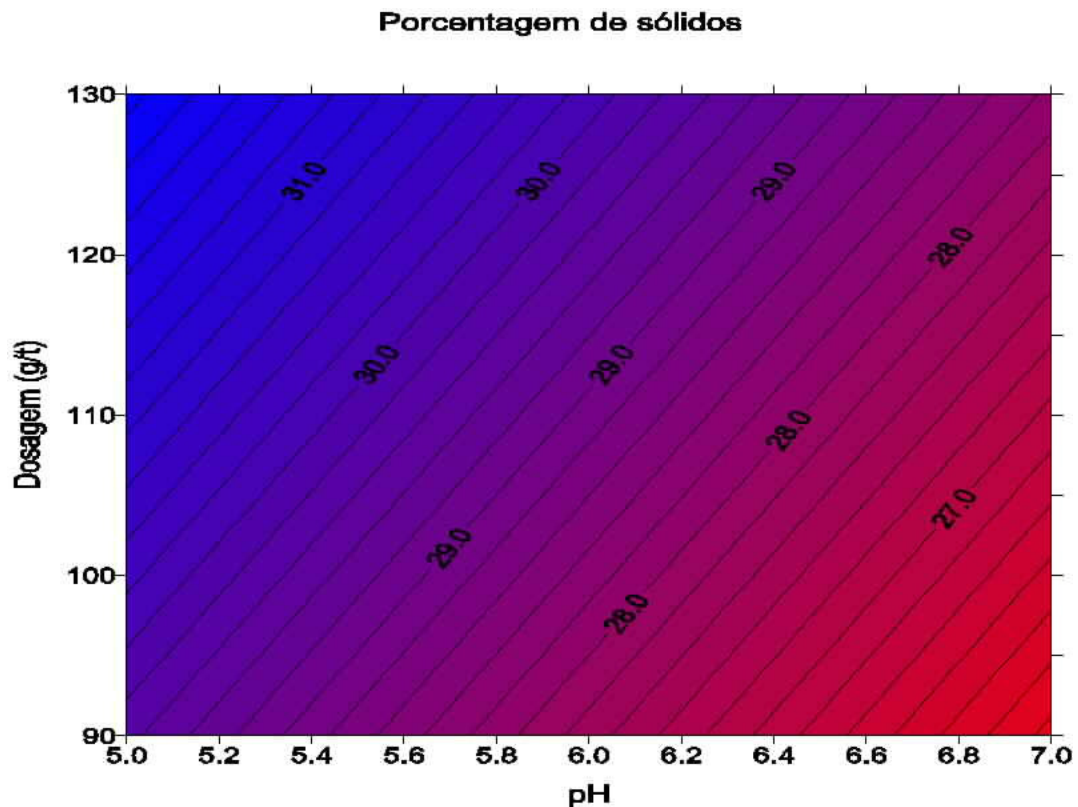


Figura 5.4: Superfície de resposta para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante catiônico.

5.2.2 Floculante aniônico

Os ensaios de sedimentação com o uso de floculante aniônico foram executados conforme a Tabela IV.4, sendo os resultados obtidos mostrados na Tabela V.7, abaixo.

Tabela V.7: Resultados experimentais para os ensaios de sedimentação com o uso de floculante aniônico.

Ensaio	Dosagem (g/t)	pH	Velocidade (mm/min)	Cw no UF (%)
1	90	6	4,50	21,6
2	90	6	4,50	22,3
3	90	6	4,44	21,8
4	90	6	4,50	21,9
5	90	6	4,44	21,7
6	90	6	4,38	21,0

7	70	5	2,76	18,9
8	70	5	2,76	18,6
9	70	5	2,82	18,6
10	70	7	5,10	22,7
11	70	7	5,04	22,4
12	70	7	5,03	22,2
13	110	5	3,24	20,8
14	110	5	3,72	20,1
15	110	5	3,48	20,6
16	110	7	6,60	23,6
17	110	7	6,66	24,2
18	110	7	6,60	24,8

A Tabela V.8 abaixo apresenta o ajuste obtido, utilizando-se da equação (3.3) para o ajuste, pelo método dos mínimos quadrados.

Tabela V.8: Ajuste polinomial para floculante aniônico

Ensaio	Dosagem (g/t)	X1	pH	X2	Velocidade (mm/min)	Desvio	Cw no UF (%)	Desvio
1	90	0,0	6	0,0	4,48	0,001	21,5	0,00
2	90	0,0	6	0,0	4,48	0,001	21,5	0,57
3	90	0,0	6	0,0	4,48	0,001	21,5	0,05
4	90	0,0	6	0,0	4,48	0,001	21,5	0,14
5	90	0,0	6	0,0	4,48	0,001	21,5	0,02
6	90	0,0	6	0,0	4,48	0,009	21,5	0,30
7	70	-0,5	5	-0,5	2,77	0,000	18,8	0,01
8	70	-0,5	5	-0,5	2,77	0,000	18,8	0,03
9	70	-0,5	5	-0,5	2,77	0,002	18,8	0,03
10	70	-0,5	7	0,5	5,05	0,003	22,5	0,03
11	70	-0,5	7	0,5	5,05	0,000	22,5	0,02
12	70	-0,5	7	0,5	5,05	0,000	22,5	0,09
13	110	0,5	5	-0,5	3,47	0,054	20,6	0,06
14	110	0,5	5	-0,5	3,47	0,062	20,6	0,23
15	110	0,5	5	-0,5	3,47	0,000	20,6	0,00
16	110	0,5	7	0,5	6,61	0,000	24,3	0,46
17	110	0,5	7	0,5	6,61	0,002	24,3	0,01
18	110	0,5	7	0,5	6,61	0,000	24,3	0,27
					Total	0,137	Total	2,33

Para a velocidade de sedimentação os valores das constantes b_0 , b_1 , b_2 e b_3 obtidos no ajuste, de acordo com a equação (3.3), encontra-se na Tabela V.9, abaixo:

Tabela V.9: Constantes para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante aniônico.

b ₀	4,5
b ₁	1,1
b ₂	2,7
b ₃	0,9

Assim, para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante aniônico, a equação (3.3) apresentada anteriormente, toma a seguinte forma:

$$Y = v_s = 4,5 + 1,1 X_1 + 2,7 X_2 + 0,9 X_1 X_2 \quad (5.4)$$

A equação descrita acima é válida dentro dos intervalos de pH e dosagem utilizados no planejamento fatorial, sendo o erro calculado para o uso da equação de 8,3%.

Avaliando as constantes b₁, b₂ e b₃, é possível observar que o pH apresenta-se como a principal influência na velocidade de sedimentação, seguido pela dosagem e por último pela relação entre pH e dosagem.

A Figura 5.5 apresenta a superfície de resposta dos resultados obtidos para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante aniônico, sendo possível identificar que a condição ótima de dosagem e pH, dentro do intervalo do planejamento fatorial, é de 110g/t e pH 7, sendo a velocidade de 6,6mm/min.

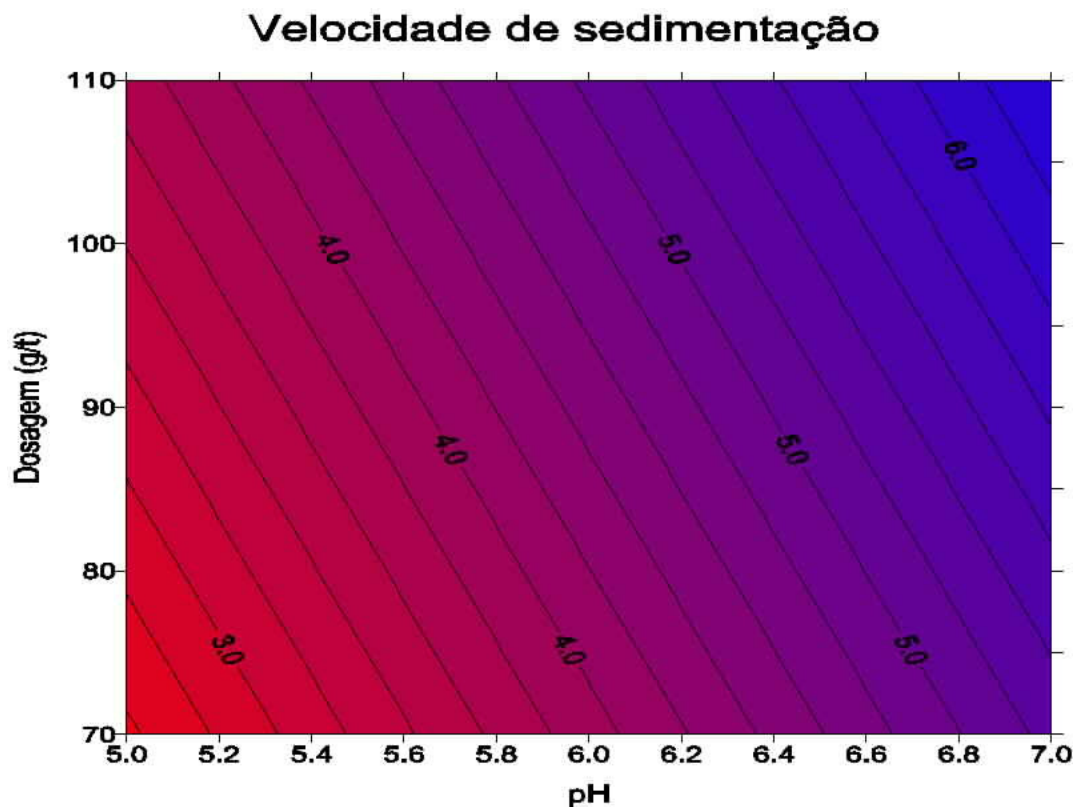


Figura 5.5: Superfície de resposta para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante aniônico.

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado, com o uso do floculante aniônico, os valores obtidos para as constantes b_0 , b_1 , b_2 e b_3 encontra-se na Tabela V.10.

Tabela V.10: Constantes para a porcentagem de sólidos final com o uso do floculante aniônico.

b_0	21,5
b_1	1,8
b_2	3,7
b_3	-0,1

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado, a equação (3.3) toma a seguinte forma:

$$Y = C_w = 21,5 + 1,8 X_1 + 3,7 X_2 - 0,1 X_1 X_2 \quad (5.5)$$

A equação descrita acima é válida dentro dos intervalos de pH e dosagem utilizados no planejamento fatorial, sendo o erro calculado para o uso da equação de 7,1%.

O pH apresenta-se como a variável de maior influência na porcentagem de sólidos final seguido da dosagem e da relação entre estas duas variáveis.

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado a condição que apresentou o melhor resultado foi para o pH 7,0 e uma dosagem 110g/t (Figura 5.6), ficando a porcentagem de sólidos com 24,3%.

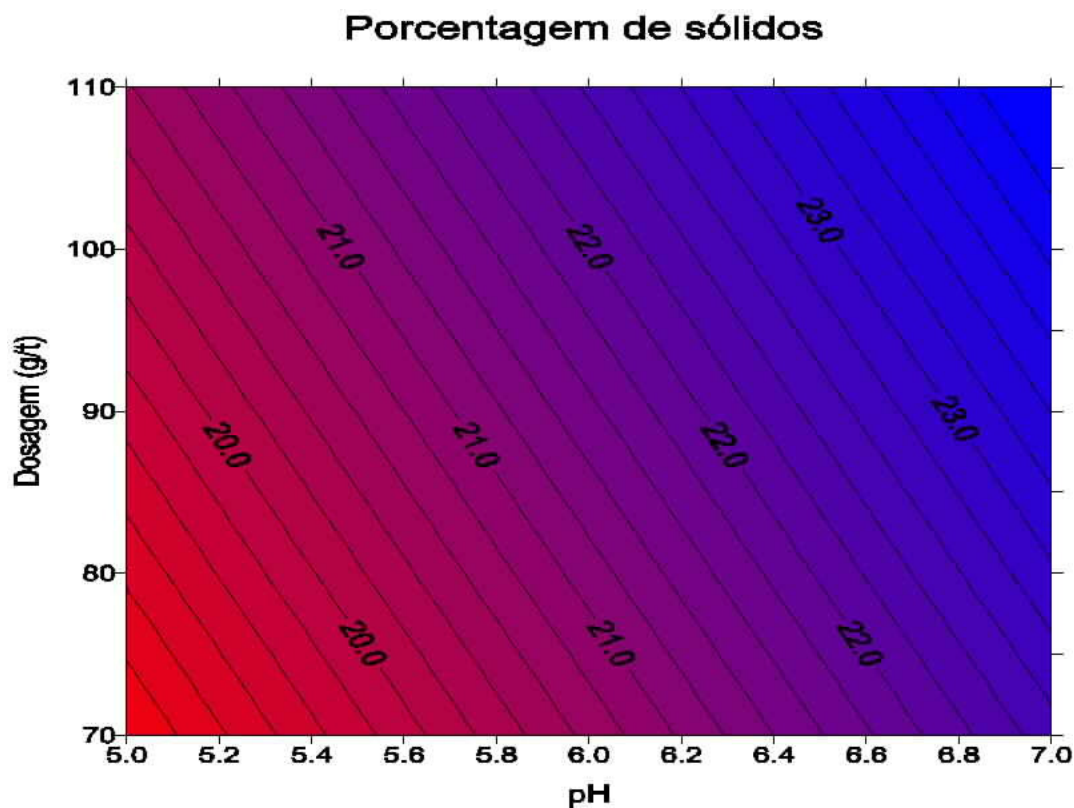


Figura 5.6: Superfície de resposta para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante aniônico.

5.2.3 Floculante não iônico

Os ensaios de sedimentação com o uso de floculante não iônico foram executados conforme a Tabela IV.1, sendo os resultados obtidos mostrados na Tabela V.11, abaixo.

Tabela V.11: Resultados experimentais para os ensaios de sedimentação com o uso de floculante não iônico.

Ensaio	Dosagem (g/t)	pH	Velocidade (mm/min)	Cw no UF (%)
1	90	6	13,20	24,7
2	90	6	13,08	24,5
3	90	6	13,02	24,2
4	90	6	13,14	24,7
5	90	6	13,20	24,7
6	90	6	13,26	24,5
7	60	5	2,76	16,8
8	60	5	2,64	17,1
9	60	5	2,58	16,9
10	60	7	9,30	25,0
11	60	7	9,84	25,4
12	60	7	9,72	25,6
13	120	5	15,36	26,5
14	120	5	15,12	25,5
15	120	5	15,54	26,5
16	120	7	24,12	28,4
17	120	7	24,24	27,5
18	120	7	24,30	27,5

A Tabela V.12 abaixo apresenta o ajuste obtido, utilizando-se da equação (3.3) para o ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

Tabela V.12: Ajuste polinomial para floculante não iônico.

Dosagem	X1	pH	X2	Velocidade (mm/min)	Desvio	Cw no UF	Desvio
90	0	6,0	0	13,02	0,031	24,2	0,225
90	0	6,0	0	13,02	0,003	24,2	0,091
90	0	6,0	0	13,02	0,000	24,2	0,000
90	0	6,0	0	13,02	0,014	24,2	0,193
90	0	6,0	0	13,02	0,031	24,2	0,248
90	0	6,0	0	13,02	0,056	24,2	0,077
60	-0,5	5,0	-0,5	2,72	0,001	17,1	0,090
60	-0,5	5,0	-0,5	2,72	0,007	17,1	0,000

60	-0,5	5,0	-0,5	2,72	0,021	17,1	0,040
60	-0,5	7,0	0,5	9,68	0,147	25,5	0,249
60	-0,5	7,0	0,5	9,68	0,025	25,5	0,010
60	-0,5	7,0	0,5	9,68	0,001	25,5	0,010
120	0,5	5,0	-0,5	15,40	0,002	26,3	0,028
120	0,5	5,0	-0,5	15,40	0,080	26,3	0,693
120	0,5	5,0	-0,5	15,40	0,019	26,3	0,028
120	0,5	7,0	0,5	24,28	0,027	28,0	0,198
120	0,5	7,0	0,5	24,28	0,002	28,0	0,222
120	0,5	7,0	0,5	24,28	0,000	28,0	0,222
				Total	0,467	Total	2,62

Para a velocidade de sedimentação, com o uso do floculante não iônico, os valores das constantes b_0 , b_1 , b_2 e b_3 obtidos no ajuste, de acordo com a equação (3.3), encontram-se na Tabela V.13, abaixo:

Tabela V.13: Constantes para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante não iônico.

b_0	13,0
b_1	13,6
b_2	7,9
b_3	1,9

Assim, para a velocidade de sedimentação, a equação (3.3) apresentada anteriormente, toma a seguinte forma:

$$Y = v_s = 13,0 + 13,6 X_1 + 7,9 X_2 + 1,9 X_1 X_2 \quad (5.6)$$

A equação descrita acima é válida dentro dos intervalos de pH e dosagem utilizados no planejamento fatorial, sendo o erro calculado para o uso da equação de 5,2%.

Avaliando as constantes b_1 , b_2 e b_3 é possível observar que para o floculante não iônico a dosagem apresenta-se como a variável de maior influência na velocidade de sedimentação seguido do pH e da relação pH/dosagem.

A Figura 5.7 apresenta a superfície de resposta dos resultados obtidos para a velocidade de sedimentação, para o floculante não iônico, onde é possível observar que a condição ótima para a velocidade de sedimentação é para um pH 7,0 e uma dosagem de 120g/t sendo a velocidade de 24,3mm/min, dentro do intervalo utilizado no planejamento.

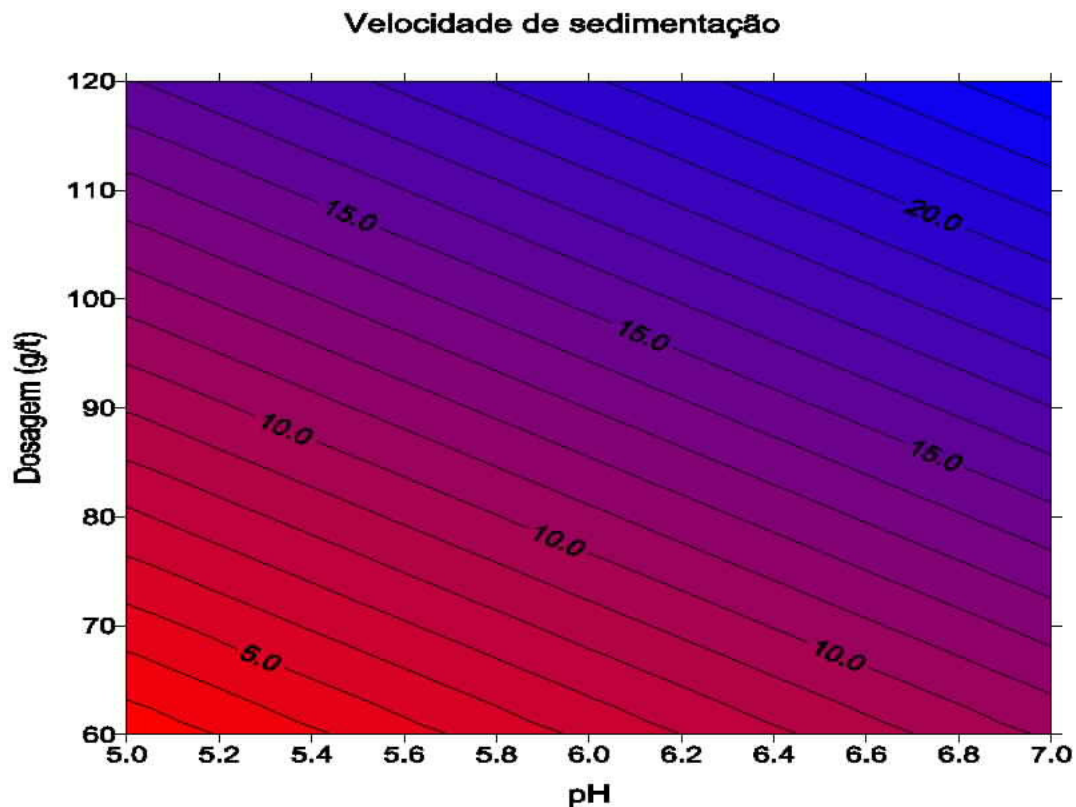


Figura 5.7: Superfície de resposta para a velocidade de sedimentação com o uso do floculante não iônico.

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado, com o uso do floculante não iônico, os valores obtidos para as constantes b_0 , b_1 , b_2 e b_3 encontra-se na Tabela V.14.

Tabela V.14: Constantes para a porcentagem de sólidos final com o uso do floculante não iônico.

b ₀	24,2
b ₁	5,9
b ₂	5,0
b ₃	-6,8

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado, conforme a equação (3.3) tem-se:

$$Y = C_w = 24,2 + 5,9 X_1 + 5,0 X_2 - 6,8 X_1 X_2 \quad (5.7)$$

A equação descrita acima é válida dentro dos intervalos de pH e dosagem utilizados no planejamento fatorial, sendo o erro calculado para o uso da equação de 6,7%.

Para a porcentagem de sólidos final do material floculado a interdependência entre as variáveis apresenta-se como fator principal, seguido da dosagem e do pH. A condição que apresentou o melhor resultado foi para pH 7,0 e dosagem de 120g/t (Figura 5.8) sendo a porcentagem de sólidos de 28,0%.

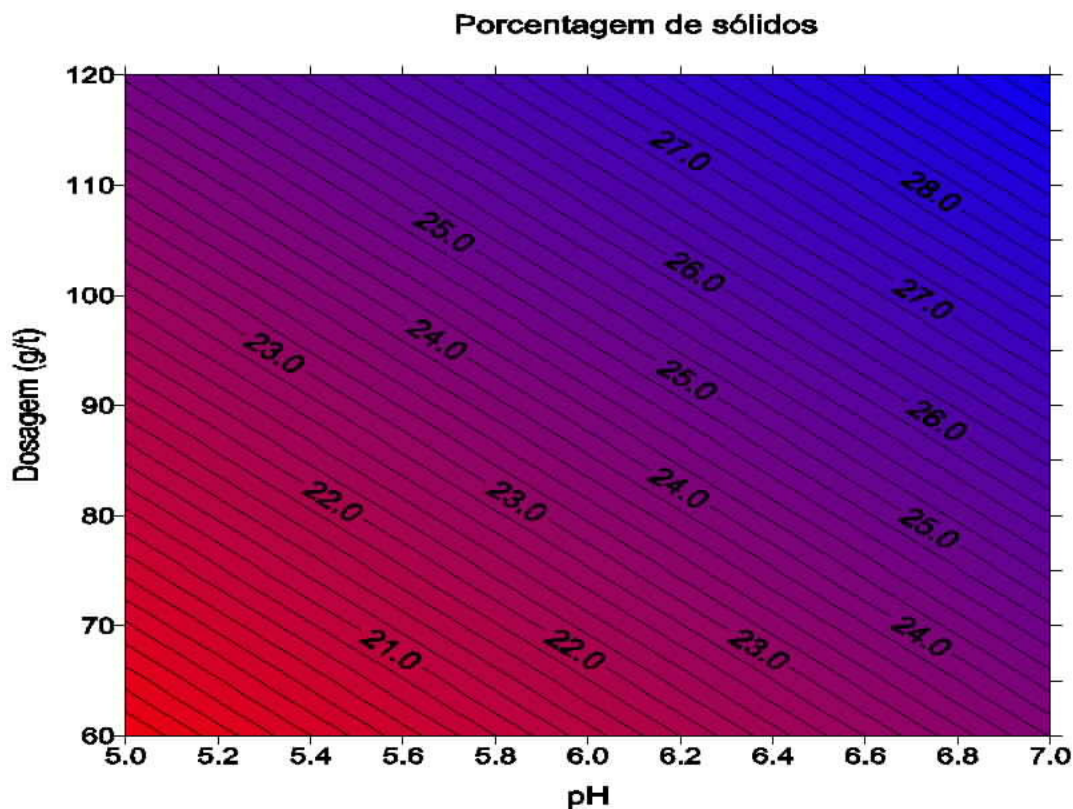


Figura 5.8: Superfície de resposta para a porcentagem final de sólidos com o uso do floculante não iônico.

5.3 Reologia

As medidas de tensão de escoamento da amostra foram modeladas de acordo com o modelo de Bingham apresentado na equação (3.5). Deve-se ressaltar que todas as medidas foram feitas em duplicata.

Os resultados obtidos para o modelo de Bingham encontram-se ilustrados na Tabela V.15 e a curva da tensão de escoamento em função da porcentagem de sólidos, sem a adição de floculantes, na Figura 5.9. Os pontos com a adição de floculantes foram indicados de forma a avaliar o impacto que estes teriam na reologia final da polpa.

Tabela V.15: Tensão de escoamento segundo modelo de Bingham

Tipo de Floculante	pH	Dosagem (g/t)	Cw %	A1	A1	A2	A2
				τ (Pa)	μ (Pa/s)	τ (Pa)	μ (Pa/s)
Sem Floculante	6,5	-	10,0	0,40	0,00299	0,40	0,00183
Sem Floculante	6,3	-	15,0	0,70	0,00299	0,71	0,00300
Sem Floculante	6,3	-	20,0	1,37	0,00493	1,40	0,00496
Sem Floculante	6,2	-	25,0	2,97	0,00811	2,97	0,00817
Sem Floculante	6,0	-	30,0	6,82	0,01296	6,84	0,01322
Sem Floculante	6,1	-	32,0	8,13	0,01442	8,24	0,01452
Sem Floculante	6,1	-	34,0	10,43	0,01754	10,68	0,01725
Sem Floculante	6,1	-	36,0	14,00	0,02095	13,87	0,02150
Sem Floculante	5,8	-	38,0	19,14	0,02440	19,52	0,02514
Sem Floculante	6,0	-	40,0	22,65	0,02666	24,13	0,02766
Sem Floculante	6,0	-	42,0	33,51	0,03368	31,87	0,03364
PAM – N	5,0	80,0	23,7	2,69	0,00719	2,74	0,00719
PAM – N	7,0	100,0	23,5	3,02	0,00827	3,01	0,00831
PAM – A	7,0	110,0	21,4	2,11	0,00636	2,15	0,00679
PAM – C	7,0	130,0					

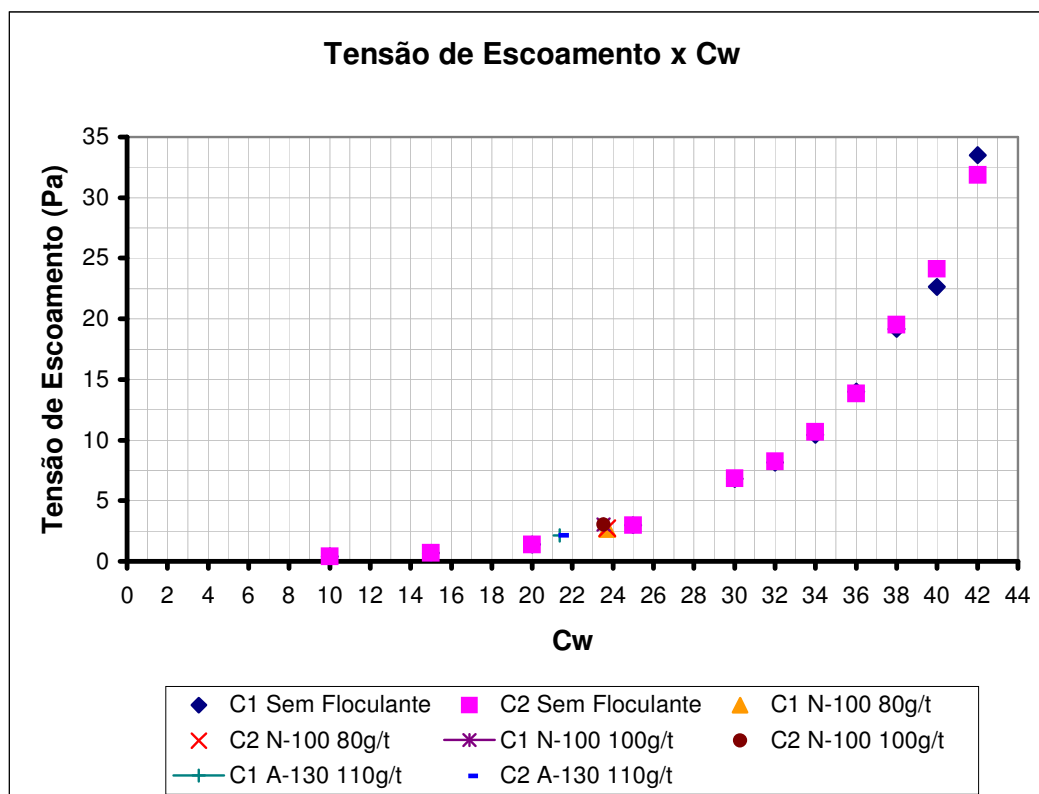


Figura 5.9: Tensão de escoamento em função de porcentagem de sólidos segundo modelo de Bingham.

A curva da tensão de escoamento (Figura 5.9) permite observar que a polpa em questão começa a apresentar elevação significativa para a tensão de escoamento a partir de uma porcentagem de sólidos aproximada de 30%, mudando significativamente suas características reológicas.

Avaliando a Figura 5.9, pode-se observar que os floclulantes apresentaram pouca influência na tensão de escoamento da polpa floclulada. Este fato pode ser devido à baixa porcentagem de sólidos final que o material floclulado atingiu, não permitindo a aproximação entre as partículas, fazendo com que estas se apresentassem muito dispersas, dificultando uma maior interação.

Os valores de tensão de escoamento e de viscosidade obtidos no modelo de Bingham deram subsidio a utilização do modelo desenvolvido por Darby et al. (1992) apresentado pelas equações (3.9) a (3.20) e ilustrados pelas Figuras 5.10 e 5.11 abaixo, onde é possível observar a existência de uma condição ótima de operação na qual a energia consumida para o bombeamento apresenta um mínimo. A Figura 5.10 comparou o modelo variando-se o diâmetro da tubulação com fluxo fixo de sólidos de 100 t/h a ser manuseado.

Já a Figura 5.11 apresenta o modelo de Darby para um diâmetro fixo de tubulação de 305mm variando-se o volume de polpa a ser manuseado.

Segundo o modelo, a condição ótima de bombeamento está localizada entre 30 e 34% de sólidos, com a tensão de escoamento entre 6,8 e 10,5Pa e a viscosidade entre 1,3 e 1,7cP.

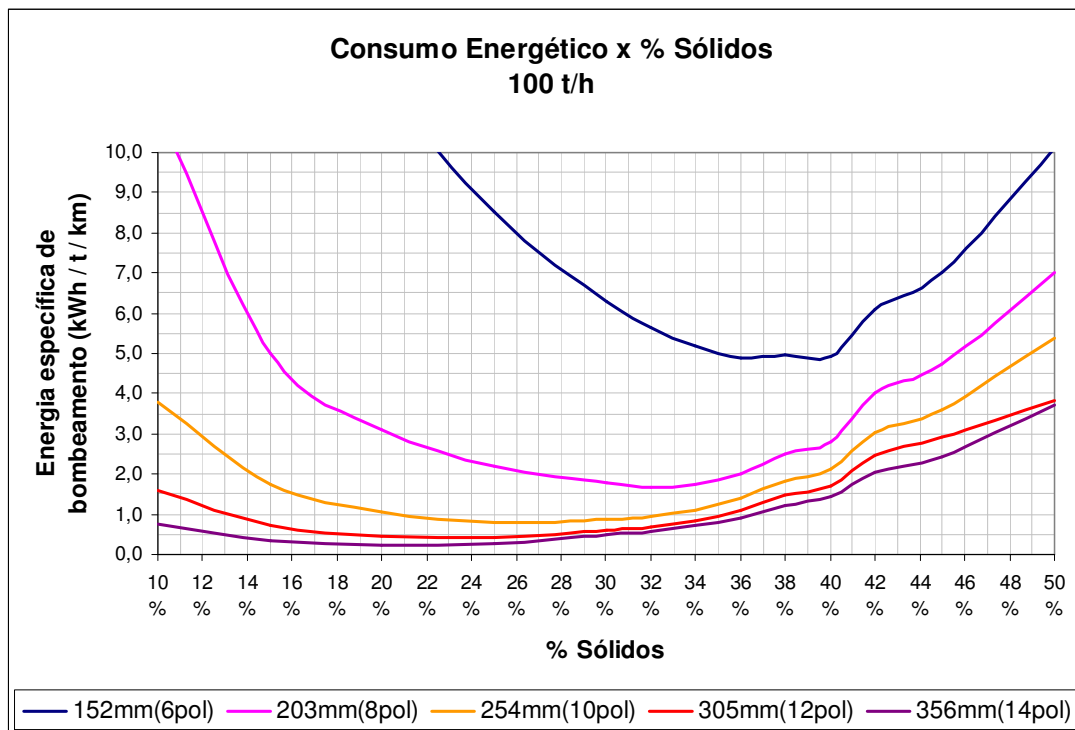


Figura 5.10: Consumo energético específico em função do diâmetro de tubulação.

Dentre os ensaios de sedimentação apenas a polpa floculada com o floculante catiônico apresentou uma porcentagem de sólidos final na faixa onde a polpa poderia apresentar as características de uma pasta mineral. Também, avaliando-se do ponto de vista do manuseio a polpa floculada com o floculante catiônico apresentou-se dentro da faixa ótima de operação atingindo 31,2% de sólidos.

Para o floculante aniônico e não iônico as polpas floculadas não apresentaram porcentagem de sólidos elevadas a ponto de apresentar o comportamento de uma pasta mineral, estando também fora da faixa ótima de manuseio por meio de bombas.

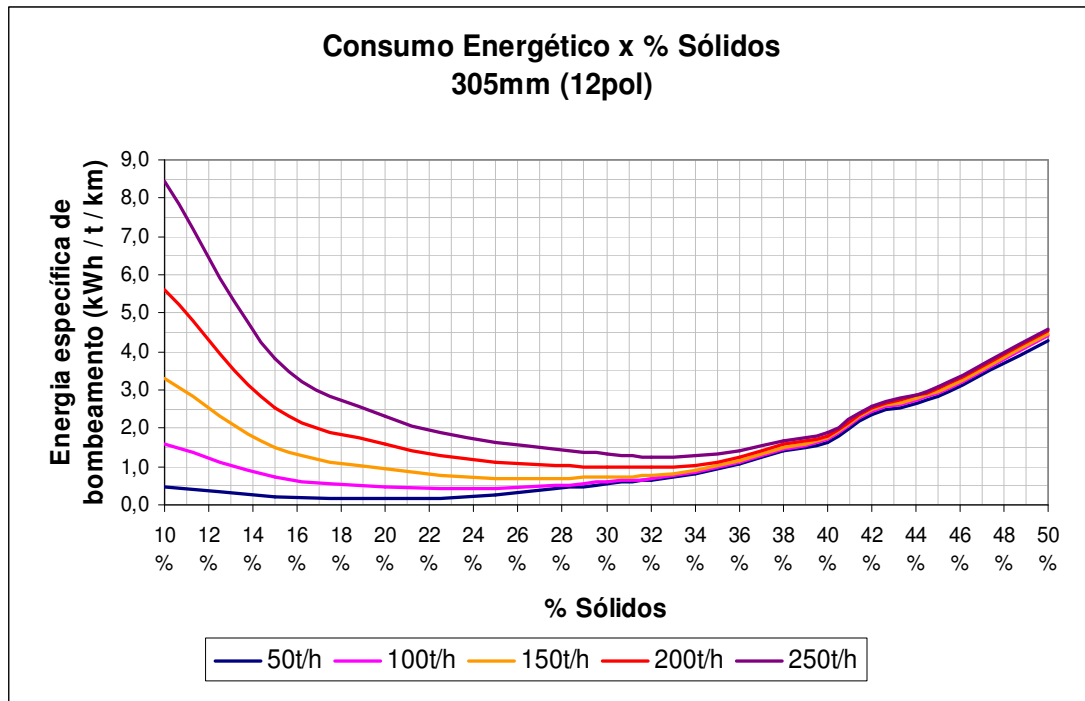


Figura 5.11: Consumo energético específico para em função da vazão de sólidos.

6. CONCLUSÕES

6.1 Caracterização

As amostras utilizadas compõem-se basicamente de partículas minerais com granulometria de argilas, com a predominância do mineral Gibbsita, Caulinita e Quartzo, com proporções menores de Goethita e Anatásio e Hematita.

Os teores de alumina aproveitável, sílica total e ferro total são 24,5%, 19,0% e 16,5% respectivamente.

O peso específico da amostra encontra-se com um valor próximo de 2,39g/cm³.

A área superficial específica da amostra encontra-se com um valor de 28,98m²/g.

O ponto de carga zero (PCZ) da amostra encontra-se no pH 6,2 estando as partículas com cargas negativas para valores de pH superiores a este e com carga positiva para valores de pH inferiores ao PCZ.

A distribuição granulométrica das partículas apresenta um d₅₀ de 9,0µm e um d₉₅ de 150µm, seguindo a distribuição de Rosin-Rammler com a forma final da equação conforme descrito abaixo.

$$Y = 100.e^{-(d/4,815)^{-0,621}}$$

6.2 Sedimentação

Segundo o modelo utilizado para o planejamento dos ensaios, os melhores resultados foram obtidos com o uso do floculante catiônico, sendo a velocidade de sedimentação calculada de 104,5mm/min e a porcentagem final de sólidos de 31,2%, com uma dosagem de 130g/t e o pH 5. Comparando os resultados

obtidos com o modelo com os resultados obtidos experimentalmente, os valores encontram-se dentro da margem de erro calculada de 8,9% e 6,5% para a velocidade de sedimentação e a porcentagem final de sólidos respectivamente.

Novamente, de acordo com modelamento, o floculante aniônico apresentou uma velocidade de sedimentação de 6,6mm/min e uma porcentagem final de sólidos de 24,3%, para uma dosagem de 110g/t e pH 7 e comparando com os resultados experimentais da velocidade de sedimentação e da porcentagem final de sólidos, os mesmos se encontram dentro da margem de erro de 8,3% para a velocidade de sedimentação e 7,1% para a porcentagem final de sólidos.

Já o floculante não iônico apresentou uma velocidade de sedimentação de 24,3mm/min e uma porcentagem final de sólidos de 28,0%, sendo a dosagem de 120g/t e o pH 7. Novamente os resultados experimentais encontram-se dentro da margem de erro calculada para cada pelo modelo, com 5,2% e 6,7% para a velocidade de sedimentação e a porcentagem final de sólidos respectivamente.

Do ponto de vista da carga superficial das partículas em suspensão pode-se observar que existe uma relação entre esta e o princípio ativo de cada floculante (catiônico, aniônico e não iônico), possivelmente, devido às Forças de van der Waals. Os melhores resultados foram obtidos quando as partículas e o floculante apresentavam o mesmo sinal de carga, ou seja, sem atração eletrostática. Para valores de pH abaixo do PCZ, com as partículas carregadas positivamente os melhores resultados foram obtidos com o uso do floculante catiônico. O mesmo ocorre para valores de pH acima do PCZ, onde as partículas encontram-se carregadas negativamente e o floculante aniônico apresenta os melhores resultados. No caso do floculante não iônico, os melhores resultados eram esperados para o pH no PCZ, porém as respostas encontradas diferiram um pouco sendo apresentados para o pH 7.

6.3 Reologia

Segundo o modelo de Bingham a polpa em estudo apresenta elevação significativa da tensão de escoamento a partir de uma porcentagem de sólidos aproximada de 28-32%.

Observando os resultados apresentados nos ensaios de sedimentação e reologia, pode-se concluir que as polpas floculadas apresentaram-se como polpas de alta densidade.

Os floculantes não apresentaram impacto significativo na reologia da polpa dentro das condições estabelecidas para os ensaios. Sua influência não pode ser determinada de forma clara devido à baixa porcentagem de sólidos no qual foram realizadas as medidas, sendo necessário a realização de medidas com porcentagens de sólidos mais elevadas, dentro da faixa de transição polpa-pasta.

No que diz respeito ao modelamento utilizando o modelo de Darby et al. (1992), as condições ótimas de manuseio encontram-se na faixa de 30-34% de sólidos, com uma tensão de escoamento entre 6,8 e 10,5Pa e a viscosidade entre 1,3 e 1,7cP.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Variar a porcentagem de sólidos dos ensaios de sedimentação de forma a avaliar seu impacto na velocidade de sedimentação e porcentagem de sólidos do material floculado.

Ampliar a faixa de pH e dosagem nos ensaios de sedimentação.

Variar o pH da polpa sem a adição de floculantes para avaliar a influência deste na reologia da polpa.

Avaliar o impacto dos floculantes na reologia da polpa floculada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A.C.; GALERY, R., Técnicas para analisar dispersão/agregação. In: IIMEETING OF THE SOUTHERN HEMISPHERE ON MINERAL TECHNOLOGY, 1987, Rio de Janeiro. Proceedings of the II Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. Rio de Janeiro: Recitec, 1987. v. 1, p. 234-248.

ARAUJO, A.C., SOUZA, C. C., AMARANTE, S. C. Rejeitos adensados para disposição em superfície - Nova tecnologia em minério de ferro. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, Ouro Preto, Anais. Ouro Preto, ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, pp. 610-619, 2003.

ARCHIBALD, J.F. Beneficial impacts of paste tailings on environmental hazard mitigation and engineering performance improvement. 2005.

BARNES, H.A., HUTTON, J.F., WALTERS, K. An Introduction to rheology. 1ed. New York: Elsevier, Rheology Series 3, pp 199, 1989.

BESRA, L., SENGUPTA, D.K., ROY, S.K. Influence of unadsorbed and weakly adsorbed flocculants on separation properties of kaolin suspensions. International Journal of Mineral Process, 2005.

BOGER, D.V., NGUYEN, Q.D. Application rheology to solving tailings disposal problems. International Journal of Mineral Process, Vol 54, pp 217-233, 1998.

BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S. Statistics for experimenters. Wiley, New York, 1978.

COUSSOT, P. Mudflow rheology and dynamics. New York: A. A. Balkema Publishers, pp 272, 1997.

DALY, J.J., GILBERT, R.B., LONG, J.H. Effect of waste settlement on slope lining systems. In: Geosynthetics '95 Conference. Nashville, USA, 1995.

DANA - HURLBUT. Manual de Mineralogia, 2ª Edición, Editorial Reverté, Barcelona, pp 443 – 461, 1960.

DARBY, R., MUN, R., BOGER, D.V. Predicting friction loss in slurry pipelines. Chemical Engineering (August), pp 116-119, 1992.

DAVIES, M.P. Impounded mine tailings: What are the failures telling us? CIM Distinguished Lecturer Series, 2000

DORR-OLIVER EIMCO. Deep cone paste thickener catalog, 2003.

ERSOY, B. Effect of pH and polymer charge density on settling rate and turbidity of natural stone suspensions. International Journal of Mineral Process, Vol 75, pp 207-216, 2005.

FARINATO, R.S., RAVISHAKAR, S.A., CHEN, H.T. Rational polymer design for solid-liquid separations in mineral processing applications. International Journal of Mineral Process, Vol 72, pp 75-86, 2003.

FERREIRA, E.E., BRANDÃO, P.R.G., KLEIN, B., PERES, A.E.C. Reologia de suspensões minerais: Uma revisão. REM: Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, 58(1): 83-87, jan – mar, 2005.

FITCH, B, Current Theory and Thickener Design, Ind. Eng. Chem., 58(10); 18-28, 1966.

FOGWILL, G. Recent advances in paste thickening implemented in Ekapa Mining. GL&V South Africa – Internal Report, 2005.

FUESTERNAU, D.W., PRADIP. Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals. *Advances in Colloid and Interface Science* 114-115, pp 9-26, 2005.

HERNANDEZ, C.A.O., ARAUJO, A.C., VALADÃO, G.E.S., AMARANTE, S.C. Pasting characteristics of hematite/quartz system. *Mineral Engineering Vol 18*, pp 935-939, 2005.

HOGG, R. Flocculation by polymers: Mechanisms, dynamics and process design. *Journal of Ore Dressing*, v. 6, issue 11, 11 pp. 2004, <http://www.oredressing.net/pdf/11/hogg.pdf>

JEWELL, R. Paste & Thickened Tailing (P&TT) in the Australian mining industry. In: *High Density & Paste 2002 Seminar*, Apr-2002, Santiago - Chile, Apresentação digital.

JOHNSON, S.B., FRANKS, G.V., SCALES, P.J., BOGER, D.V., HEALY, T.W. Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensions. *International Journal of Mineral Process*, Vol 58, pp 267-304, 2000.

LITZENBERGER, C.G. Rheological study of kaolin clay slurry, M.Sc Thesis in Chemical Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, 2003.

MITCHELL, T.K., NGUYEN, A.V., EVANS, G.M. Heterocoagulation of chalcopyrite and pyrite minerals in flotation separation. *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol 114-115, pp 227-237, 2005.

MULAR, A. L., ROBERTS R. B. A simplified method to determine isoelectric points of oxides. *Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, Canada, pp. 438 – 439, 1966.

NAIK, P.K., REDDY, P.R.R., MISRA, V.N. Interpretation of interaction effects and optimization of reagent dosages for fine coal flotation. *International Journal of Mineral Process*, Vol 75, pp 83-90, 2005.

NEWMAN, P., WHITE, R., CADDEN, A., *Paste – The future of tailings disposal?* Golder Associates (UK) Ltd, England, 2003.

NGUYEN, Q.D., BOGER, D.V., Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annual Review Fluid Mech.*, Vol 24, pp 47-88, 1992.

NGUYEN, Q.D., BOGER, D.V., Application of rheology to solving tailing disposal problems. *International Journal of Mineral Process*, Vol 54, pp 217-233, 1998.

PAWLIK, M.; LASKOWSKI, J.S. Evaluation of flocculants and dispersants through rheological tests. In: *Polymers in Mineral Processing. 38th Annual Conference of Metallurgists of CIM*, Quebec, Canada, pp 541-55, August, 1999.

PEARSE, M.J., An overview of the use of chemical reagents in mineral processing. *Minerals Engineering*, v.18, pp. 139-149, 2005.

POSSA, M.V., LIMA, J.R.B. *Comportamento reológico de polpas de minério*, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, vol 77, pp 4, 2000.

RALSTON, J., JENKINS, P., HUYNH, L. Modification of the rheological properties of concentrated slurries by control of mineral-solution interfacial chemistry. *International Journal of Mineral Process*, Vol 59, pp 305-325, 2000.

ROUDNEV, A., GRZINA, A., BURGESS, K.E. *Weir slurry pumping manual*. Cap 4-8, 2002.

SHERIDAN, M.S., NAGARAJ, D.R., FORNASIERO, D., RALSTON, J. The use of factorial experimental design to study collector properties of N-allyl-O-alkyl thiocarbamate collector in the flotation of a copper ore. *Minerals Engineering*, Vol 15, pp 333-340, 2002.

SHOU, G., Feasibility of using centrifugal pumps to transport thickened tailings. International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Melbourne, Australia, May 2003.

SILVA, D.R., FILHO, W.L.O. Estudos experimentais do processo de ressecamento de um rejeito fino de mineração. *REM: Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, Vol 56(4): pp 261-265, out. dez. 2003.

SLOTEE, J.S., Evaluating paste thickeners for surface stacking tailings. *Mining Environmental Management*, September 2001.

SLOTEE, J.S., West Tech paste thickening, Apresentação digital. Belo Horizonte – Brasil, March 2005.

SWORSKA, A., LASKOWISKI, J.S., CYMERMAN, G. Flocculation of the Syncrude fine tailings Part I. Effect of pH, polymer dosage and Mg^{2+} and Ca^{2+} cation. *International Journal of Mineral Process*, Vol 60, pp 143-152, 2000.

SWORSKA, A., LASKOWISKI, J.S., CYMERMAN, G. Flocculation of the Syncrude fine tailings Part II. Effect of hydrodynamic conditions. *International Journal of Mineral Process*, Vol 60, pp 153-161, 2000.

THERIAULT, J.A., FROSTIAK, J., WELCH, D. Surface disposal of past tailings at the Balyanhulu gold mine, Tanzania. Golder Associates, Internal Report, 2003.

VALADÃO, G.E.S. Separação sólido-líquido. Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, Belo Horizonte, pp 50-53, 2004.

VAN DEVENTER, J.S.J., LUCKEY, G.C. Sustainability in the minerals industry: Threat or opportunity? In: XXII International Mineral Processing Congress, Cape Town – África do Sul, *Anais do Congresso*. Cape Town, Setembro-2003.

APÊNDICE I
Difratometria de Raios-X

Interpretação dos sinais do difratogramas obtido para amostra testada.

Original scan: am06491 Date: 21/06/06 15:01

Description of scan:

REJEITO-ALTA TEMP

Used wavelength: K-Alpha

K-Alpha1 wavelength (Å): 1,54060

K-Alpha2 wavelength (Å): 1,54439

K-Alpha2/K-Alpha1 intensity ratio : 0,50000

K-Alpha wavelength (Å): 1,54060

K-Beta wavelength (Å):

d-spacing Relative Intensity

(Å)	(%)	
7,17931	4,94	CAOLINITA
4,82166	100,00	GIBBSITA
4,35657	38,14	CAOLINITA + GOETHITA
4,11697	14,57	CAOLINITA
3,52482	9,26	ANATÁSIO
3,33635	90,64	QUARTZO
3,17089	7,22	QUARTZO
2,69793	13,08	GOETHITA + HEMATITA
2,44899	40,08	GOETHITA + QUARTZO
2,40989	24,23	GIBBSITA
2,37964	35,54	ANATÁSIO + GIBBSITA
2,27648	9,47	QUARTZO
2,23594	20,83	QUARTZO + GOETHITA
2,15971	20,35	
2,12112	8,11	QUARTZO
2,04318	23,43	GIBBSITA
1,98924	20,76	QUARTZO
1,91156	13,01	ANATÁSIO
1,81457	26,89	QUARTZO
1,79959	16,66	

1,74781	23,38	GIBBSITA
1,71572	15,28	GOETHITA + ANATÁSIO
1,69307	23,28	HEMATITA + GIBBSITA
1,66843	21,38	ANATÁSIO + QUARTZO
1,58279	4,51	
1,53980	29,24	QUARTZO
1,48450	14,71	ANATÁSIO + HEMATITA
1,45494	26,41	QUARTZO
1,43922	11,90	
1,40487	6,29	
1,38128	20,82	QUARTZO
1,37198	6,57	QUARTZO
1,36042	5,57	
1,28581	5,60	QUARTZO
1,25497	17,55	QUARTZO
1,22644	3,39	
1,20934	7,53	
1,19965	12,51	QUARTZO
1,18157	4,56	QUARTZO
1,14471	2,39	QUARTZO

