

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

Dissertação de Mestrado

“Melhoria da Qualidade da Água em Bacias de Decantação
Localizadas em Área de Extração de Areia”

Autora: Cibele Teixeira Paiva
Orientador: Prof. Raul Zanoni Lopes Cançado

Maio / 2004

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

Cibele Teixeira Paiva

“MELHORIA DA QUALIDADE DA ÁGUA EM BACIAS
DE DECANTAÇÃO LOCALIZADAS EM ÁREA
DE EXTRAÇÃO DE AREIA”

Dissertação de Mestrado Apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica
e de Minas da UFMG

Área de concentração: Tecnologia Mineral
Orientador: Prof. Raul Zanoni Lopes Cançado

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
MAIO / 2004

À Bibia.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, com palavras de apoio e incentivo permitiram que este trabalho fosse concluído.

Agradeço especialmente:

Ao Prof. Raul Zanoni pela orientação e paciência nos momentos difíceis.

Ao Prof. Roberto Galery pelo encaminhamento, orientação e apoio ao longo de todo o curso.

À SANEAR, em especial ao Prof. Julião e à técnica Vani pela elaboração das análises e testes, pelo apoio e principalmente pelo carinho com que me receberam.

À Areia Menezes, que permitiu o uso de suas instalações, colaborando com o fornecimento de dados.

Ao Prof. Antônio Romano pelas primeiras idéias, acompanhamento nos trabalhos de campo e, em especial pela paciência e carinho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	05
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	07
3.1 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ELIMINAÇÃO DA TURBIDEZ	07
3.1.1 Superfícies e Interfaces	09
3.1.2 Adsorção	11
3.1.3 Teoria da Dupla Camada Elétrica (DCE)	12
3.1.4 Mecanismos de formação de cargas	18
3.1.5 Tensão superficial	19
3.1.6 Agregação e dispersão	21
3.1.7 Teoria DLVO	27
3.2 ELIMINAÇÃO DA TURBIDEZ DA ÁGUA	29
3.2.1 Flocculação	31
3.2.2 Sedimentação	36
3.3 PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE ELIMINAÇÃO DA TURBIDEZ DA ÁGUA	37
3.4 QUALIDADE DAS ÁGUAS	39
3.5 BACIAS DE DECANTAÇÃO E DE SEDIMENTAÇÃO	44
3.6 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICADA À QUALIDADE DAS ÁGUAS	44
3.6.1 Legislação Brasileira	45
3.7 O ALUMÍNIO EMPREGADO COMO COAGULANTE DE ÁGUAS	45
3.8 ASPECTOS FÍSICOS REGIONAIS	47
3.8.1 Aspectos gerais	47
3.8.2 Geomorfologia e fisiografia	48
3.8.3 Geologia regional	51

3.8.4	Recursos minerais	53
3.8.5	Generalidades sobre ambientes fluviais	54
3.8.6	Abastecimento de água	55
4.	METODOLOGIA	56
4.1	TRABALHOS DE CAMPO	62
4.1.1	Coleta de amostras	63
4.2	ENSAIOS LABORATORIAIS	65
4.2.1	Caracterização das amostras	65
4.2.2	Teste de sedimentabilidade	67
4.2.3	Ensaio para remoção de turbidez e sólidos em suspensão	68
4.3	TESTES COM REAGENTES EM CAMPO	69
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	71
4.4.1	Análises granulométricas	71
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1	ENSAIOS LABORATORIAIS	72
5.1.1	Caracterização das amostras	72
5.1.2	Teste de sedimentação	73
5.1.3	Ensaio para remoção de turbidez e sólidos em suspensão	73
5.1.4	Caracterização das amostras após a injeção dos reagentes na canaleta	74
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	75
5.2.1	Caracterização mineralógica	75
5.2.2	Caracterização granulométrica	75
5.3	GEOLOGIA DA ÁREA DE TRABALHO	77
5.3.1	Geologia local	77
6.	CONCLUSÕES	81
7.	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	84
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86

10. APÊNDICES 90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Perfil esquemático da lavra de areia.	04
Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo.	06
Figura 3.1: Representação esquemática da interface.	10
Figura 3.2: Modelo da Dupla Camada Elétrica.	13
Figura 3.3: Modelo da Dupla Camada Elétrica com adsorção não-específica.	15
Figura 3.4: Modelo da Dupla Camada Elétrica com adsorção específica.	16
Figura 3.5: Representação esquemática da variação da energia entre partículas com a distância.	26
Figura 3.6: Esquema da morfologia de polímeros adsorvidos.	33
Figura 3.7: Distribuição de tamanhos de partículas na água.	41
Figura 4.1: Planta esquemática da área de estudo.	56
Figura 4.2 – Foto 1: Ponto de descarga da areia para lavagem.	58
Figura 4.3 – Foto 2: Vista da segunda bacia de decantação.	59
Figura 6.1: Coluna estratigráfica proposta para a região do Triângulo Mineiro.	83

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela III.1: Característica do estado de estabilidade das partículas em função do potencial zeta.	27
Tabela III.2: Classificação dos floculantes poliméricos (Coelho <i>et al.</i> , 1993).	32
Tabela III.3: Formas de floculação. Modificado de Azevedo Neto (1974).	36
Tabela III.4: Velocidade de sedimentação de partículas. Adaptado de Azevedo Neto (1974).	37
Tabela III.5: Limites de tolerância para parâmetros de análises de água, de acordo com a DN010/86 – COPAM.	43
Gráfico V.1: Resultado da análise granulométrica da amostra FN.	76

RESUMO

A produção de areia para uso em construção civil possui uma demanda muito grande no estado de Minas Gerais. O mercado produtor tem procurado alternativas para o fornecimento deste bem mineral por outros processos que não seja a lavra em aluviões de rios, que se encontram em franca exaustão, e geraram um enorme passivo ambiental.

Este trabalho propõe medidas que visam diminuir a alta turbidez da água proveniente do processo de extração de areia em leitos de rios.

ABSTRACT

The consumption of sand for building has been increased in the last years in the state of Minas Gerais. The producers are in the search for alternatives to grow the production and reduce the environmental damages, because the chief source of sand in the state are the fluvial beds.

This work propose some measures concernig the reduction of the high turbidity in the stream waters affected by the mining activity.

1. INTRODUÇÃO

A produção de bens minerais para uso *in natura* na construção civil é uma das atividades de mineração mais importantes do Brasil, não só pelo volume produzido, mas também pela ampla distribuição geográfica dos centros produtores, já que o fenômeno da expansão urbana é generalizado. Geralmente um grande centro urbano em expansão centraliza regionalmente um foco de produção em grande escala.

Dentre estes recursos destaca-se a areia, pelas suas características intrínsecas: - mineração em planícies aluvionares ou no próprio leito fluvial; intervenção voluntária/involuntária em áreas de proteção ambiental, acarretando impactos por vezes de alto poder degradante.

Dentre os principais polos produtores do estado de Minas Gerais, o mais importante sem dúvida é o da Região Metropolitana de Belo Horizonte, que absorve em média 500.000 m³ de areia por mês. O que se verifica atualmente é uma crescente escassez, com aumento constante do custo por influência direta do transporte. A evolução da mineração de areia na região é, no mínimo, interessante. A cerca de 50-60 anos atrás, o mercado de construção civil era praticamente abastecido pelos aluviões do Ribeirão da Mata, nos municípios de Vespasiano, Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, a uma distância média de 20 Km do centro de Belo Horizonte. A exaustão destes depósitos, que deixou como herança um enorme passivo ambiental, pela destruição das várzeas férteis e das matas ciliares, obrigou o centro de produção a se deslocar para cerca de 50 Km, indo se concentrar na região de Esmeraldas, também em grande parte lavrando os aluviões. Esta região já tem mostrado crescentes sinais de exaustão de seus depósitos e os impactos ambientais locais são também de grande monta. Atualmente, o principal centro de produção de areia tende a se concentrar na região de Cachoeira da Prata, cerca de 120 Km ao norte de Belo Horizonte.

O mercado produtor tem procurado alternativas para o fornecimento de areia por outros processos; alguns deles não cogitáveis a algum tempo atrás. A produção de areia

artificial, por moagem de rochas facilmente desagregáveis é uma alternativa local, pois estas rochas não são disponíveis facilmente e o custo de beneficiamento pode ser alto se se levar em conta que alguns tipos de materiais podem conter argilas expansivas totalmente indesejáveis nas argamassas e no concreto. É de pouco tempo atrás a desastrosa experiência da utilização dos denominados saibros, produtos do intemperismo de rochas graníticas, diretamente na preparação de argamassas, o que acarretou danos consideráveis nas alvenarias, pela expansão de argilas. Os resíduos de centrais de britagem têm sido também utilizados, porém a produção é muito pequena, e os materiais nem sempre atendem às especificações do mercado.

Resta, como alternativa viável, a produção de areias diretamente dos leitos fluviais por dragagem embarcada. Este processo, paradoxalmente, é o mais correto do ponto de vista ambiental, pois não ocasiona grandes impactos nas planícies aluvionares e nem elimina vastos trechos de matas ciliares, e os impactos químicos e físicos nas águas, se existentes, podem ser satisfatoriamente minimizados.

Nas regiões que produzem e abastecem o mercado da Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH o processo de dragagem diretamente no leito fluvial é pouco difundido e a maior parte da produção é proveniente dos depósitos aluvionares. Porém, em algumas regiões de crescente expansão urbana, como é o caso do Triângulo Mineiro, principalmente nas áreas sob influência direta de Uberlândia, atualmente a segunda maior cidade de Minas Gerais fora da RMBH, esta forma de extração de areia se impõe como a única alternativa viável, por dois motivos principais. Primeiro, pela quase inexistência de depósitos aluvionares naturais, dado o profundo encaixamento dos principais rios. Segundo, pelas imensas áreas de inundação dos lagos das grandes represas hidrelétricas, o que resultou na quase extinção de trechos naturais dos rios, interferindo drasticamente na dinâmica fluvial. Destes motivos, resulta que a única forma possível de extração de areia na região do Triângulo Mineiro é nos lagos das barragens hidrelétricas. Neste aspecto, a dragagem de areia, além de representar uma atividade econômica importante, acarreta um impacto altamente positivo para a geração de energia elétrica, que é justamente o desassoreamento dos lagos. Este problema tem sido acrescido nos últimos tempos com a crescente perda de solos por devastação florestal e por práticas não adequadas de manejo agrícola.

A extração de areia nos lagos das barragens, conforme o esquema mostrado na figura 1.1, é feita por meio de dragas de sucção acopladas em barcaças, o que permite atingir uma considerável profundidade. As barcaças, uma vez cheias de areia, dirigem-se aos denominados 'portos de areia', onde são despejadas sob a forma de polpa, lavadas e algumas vezes classificadas. Todo o processo requer a utilização de água do próprio lago, que volta a ele com a turbidez muito elevada, pois o sistema de lavagem, com drenos e bacias de decantação geralmente não rigorosamente dimensionadas, não permite a sedimentação da matéria fina em suspensão. Ressalta-se que estas bacias aqui chamadas de 'bacias de decantação', na verdade não chegam ainda a sê-las pois a água quando à elas chega sofre apenas sedimentação, por ação da gravidade.

Desta forma, o mais importante impacto ambiental a ser levado em conta é a alta turbidez da água retornante das bacias, o que provoca um halo que, dependendo da época, gera um impacto visual de grande extensão, principalmente nos lagos onde a água permanece quase estagnada. Além do mais, a elevada turbidez da água pode acarretar impactos negativos, não mensurados, nos ecossistemas locais.

Este trabalho visa, portanto, procurar medidas que atenuem um impacto ambiental resultante da dragagem de areia em lagos de represas hidrelétricas, que é a excessiva turbidez da água retornante do processo de lavagem de areia, portanto proveniente das bacias de decantação. O enfoque principal é dado aos métodos de tratamento de água com vistas à eliminação de turbidez.

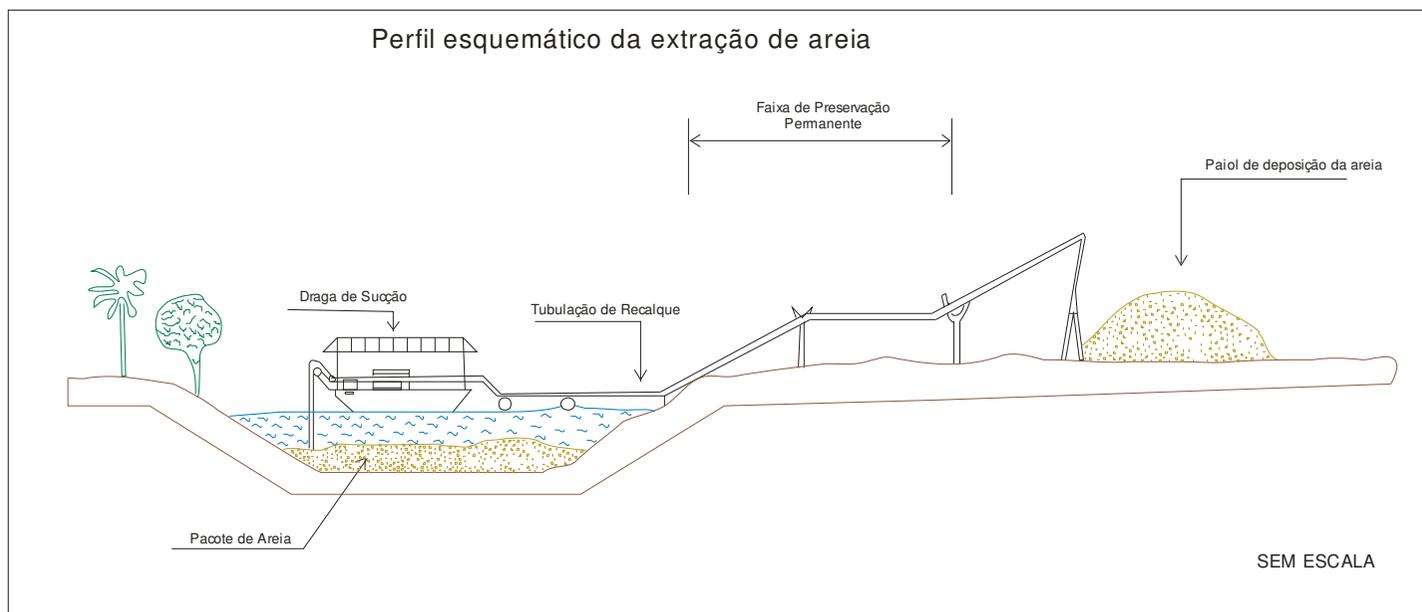


Figura 1.1 – Perfil esquemático da lavra de areia.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a busca de soluções para minimizar a turbidez da água na atividade de mineração de areia em leitos fluviais, utilizando uma 'área piloto', situada no leito do rio Araguari, no lago da Usina Hidrelétrica de Miranda, região do Triângulo Mineiro. Esta área dispõe de duas bacias de decantação que atualmente não são satisfatórias ao processo. A figura 2.1 mostra a localização desta área.

O trabalho visa então procurar alternativas para eliminação da turbidez das águas provenientes da lavagem de areia. A alternativa mais viável encontrada foi a utilização de produtos químicos inertes e insolúveis, para coagulação e floculação das partículas finas em suspensão. Também foi levada em conta a possibilidade de um redimensionamento com conseqüente melhoria das bacias atuais. Espera-se deste modo que as águas retornem ao leito do rio e/ou lago com a turbidez mínima, para satisfazer as exigências da legislação ambiental. Espera-se também que este trabalho possa contribuir de alguma forma para que os portos de areia que venham a se instalar sejam projetados com dimensões apropriadas, podendo adicionar reagentes adequadamente no seu processo de lavagem da areia. Assim sendo, uma atividade que, apesar de movimentar grandes quantidades de material lavrado em todo o país, ainda é praticada de maneira muitas vezes rudimentar; poderá então ser desenvolvida em acordo com a legislação ambiental, dando subsídios ao desenvolvimento sustentado.

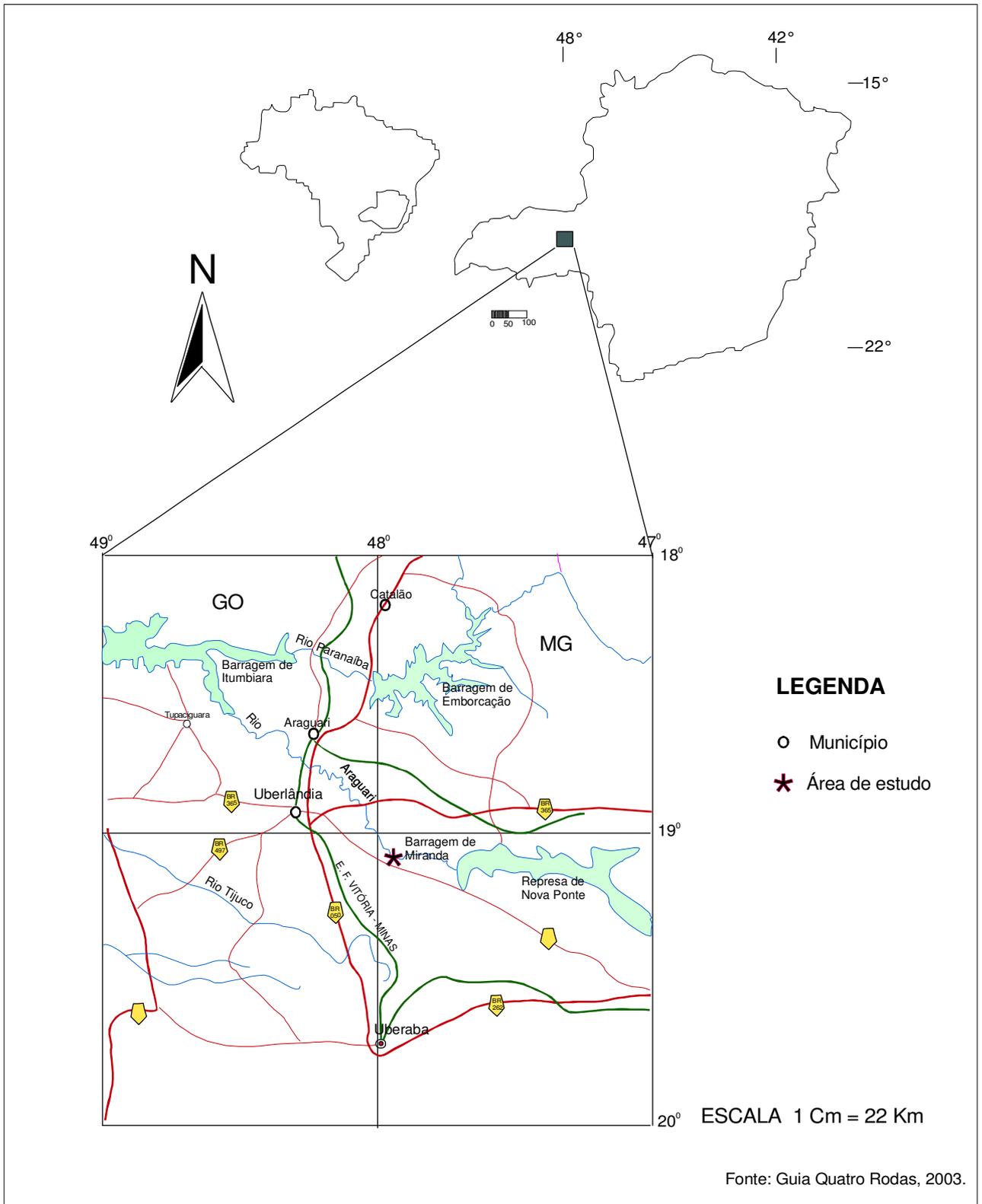


Figura 2.1 - Mapa de localização.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ELIMINAÇÃO DA TURBIDEZ

Os processos de tratamento de minérios para separação de partículas minerais estão relacionados aos fenômenos de agregação e dispersão destas partículas grosseiras a coloidais, contidas em uma solução denominada polpa. Esta última é conceituada como uma fase fluida constituída por partículas finas envolvidas em uma fase líquida que contém partículas grossas.

Ao se falar em tratamento de minérios dentro do enfoque deste trabalho, tem-se em mente o tratamento de minérios de granulometria fina ou tratamento de finos. Este processo sempre constituiu um desafio para os profissionais da área, sendo que, atualmente existe uma tendência de que os minérios a serem explorados sejam de teores mais baixos, conseqüentemente exigindo uma moagem mais fina, para liberação dos minerais. Isto somado à produção involuntária de finos provenientes de processos de cominuição, faz com que frações consideráveis de minérios não sejam aproveitadas ou sejam tratadas com baixa eficiência. Técnicas convencionais de separação baseadas na diferença de propriedades físicas dos minerais são ineficientes quando se trata de partículas de tamanho inferior a 20 μm (Coelho *et al.*, 1993).

O primeiro passo ao se abordar este assunto é estabelecer uma classificação de partículas por tamanho. Vários autores tentaram e até mesmo estabelecem classificações de partículas, existindo diversas controvérsias. Coelho *et al.* (1993) propõe uma classificação definida por diversos autores:

- *finos*: diâmetro de partículas entre 100 e 10 μm
- *ultrafinos*: diâmetro de partículas entre 10 e 1 μm
- *colóides*: diâmetro de partículas menores que 1 μm

- *lamas*: mistura de ultrafinos e colóides

Lins & Adamian (2000) apresentam uma classificação de minerais por tamanhos, baseada em sugestões e comentários de vários autores:

- *grossos*: > 500 μm
- *médios*: < 500 μm
- *finos*: < 100 μm
- *superfinos/pré-coloidais*: < 20 μm
- *ultrafinos/quase coloidais*: < 10 μm
- *coloidais*: < 1 μm
- *supercoloidais*: < 0,2 μm

Ainda segundo Lins & Adamian (2000), o limite inferior da faixa de tamanho no qual uma partícula deixa de ser coloidal é aquele em que as forças superficiais passam a ser negligenciáveis frente às de inércia e gravidade, e tal limite depende também das condições físico-químicas do meio em que se encontra a partícula. Os mesmos autores citam ainda que a expressão minerais coloidais foi sugerida para designar as lamas presentes nas polpas minerais, sejam as lamas primárias (naturais) – devidas ao intemperismo da rocha – ou secundárias (produzidas durante a cominuição). A forma das partículas também é importante, pois aquelas lamelares ou aciculares apresentam maior relação superfície/massa e, portanto, maior sensibilidade à forças superficiais que, por exemplo, partículas esféricas. Em um processo industrial as partículas dificilmente alcançam dimensões inferiores a 0,5 μm . Sendo assim as partículas supercoloidais não seriam normalmente encontradas nas lamas.

Para melhor compreensão destes processos é necessária uma revisão em alguns conceitos da físico-química de interfaces e os fenômenos interfaciais.

3.1.1 Superfícies e Interfaces

Superfície: é a fronteira entre duas fases, denominada, em físico-química de interfases, de Interface.

Interface: é uma região compreendida entre duas fases, tridimensional e heterogênea, diferindo, portanto, da composição química das fases que a formam. A figura 3.1 mostra uma representação esquemática da interface. Existem cinco tipos de interfaces: sólido/líquido, sólido/sólido, sólido/gás, líquido/líquido e líquido/gás. Todos os tipos são importantes nos fenômenos de agregação e dispersão.

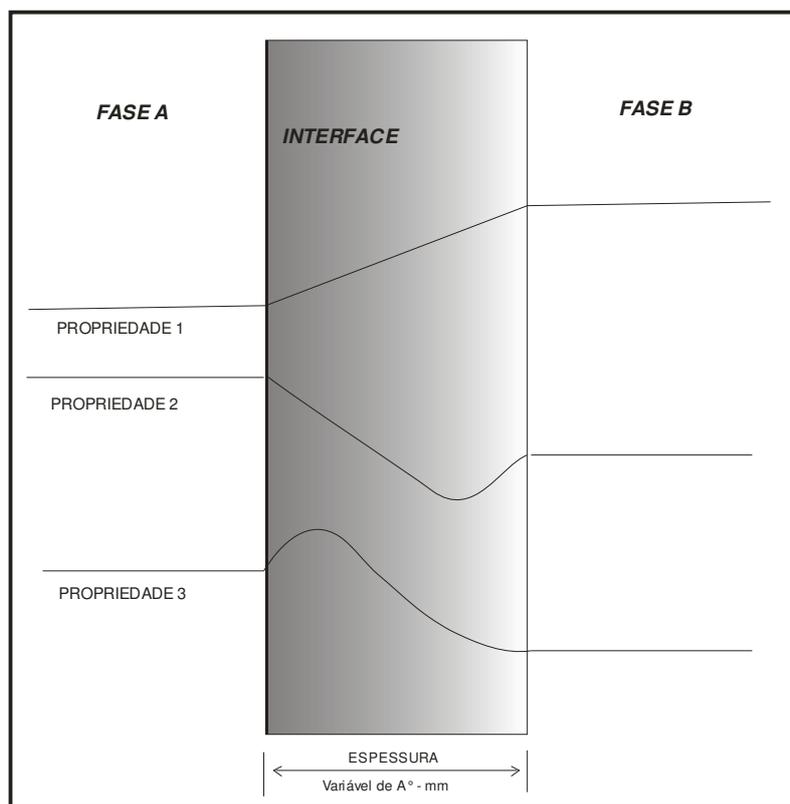


Figura 3.1 – Representação esquemática da interface.

Segundo Rabockai (1979), superfície e interface são conceitos geométricos, bidimensionais e aparentes. Aparentes porque entre duas fases não existe separação

nítida e brusca e sim uma região de transição contínua das propriedades de uma fase às propriedades da outra fase. Interfase é a região onde ocorre esta transição. O autor ainda define a interfase como uma região tridimensional e intermediária onde as propriedades de cada fase variam; quando no interior de cada fase estas propriedades poderiam não variar. Rabockai (1979) sugere ainda que os termos “interfase” e “interfásico” sejam empregados em relação aos sistemas físicos (reais). Os termos “interface” e “interfacial” para os denominados sistemas-modelo.

Os processos físico-químicos de separação de partículas minerais envolvem o estudo das propriedades de interfaces de partículas sólidas suspensas em um meio aquoso, na presença de reagentes químicos. São considerados então como conceitos básicos neste trabalho o estudo de fenômenos interfaciais relacionados à separação de partículas minerais ou partículas sólidas imersas em um meio aquoso.

Nos estudos dos fenômenos interfaciais, inicialmente deve-se levar em conta três fatores fundamentais.

- a) A transição de uma fase para outra é rápida; pois a interface não apresenta espessura maior que algumas camadas de moléculas, mesmo havendo um grande movimento cinético nesta.
- b) A existência de uma quantidade definida de energia livre por unidade de área interfacial (σ). Essa energia livre de superfície é considerada como sendo a variação de energia requerida para trazer moléculas do interior de uma das fases para a interface, por unidade de área. É expressa em ergs/cm^2 sendo matemática e dimensionalmente equivalente à tensão interfacial, expressa em dinas/cm ou ergs/cm^2 .
- c) Em muitos casos existe uma diferença de potencial através da interface isto é, uma fase é carregada em relação à outra. Nas dispersões e emulsões, onde uma das fases está mais finamente subdividida e, conseqüentemente apresenta maior área interfacial, este fator pode ser observado mais claramente.

Ainda devem ser considerados os três fatores descritos abaixo.

- a) De uma maneira geral, baixos valores de energia livre interfacial caracterizam uma interface relativamente fácil de ser formada e de difícil separação.
- b) Especificamente no processamento mineral, partículas muito finas e com grande superfície específica são produzidas nas etapas de lavra e cominuição de minérios.

Essas partículas adquirem energia sob a forma de energia superficial e energia de deformação que fica armazenada na subsuperfície. A eliminação desse acréscimo de energia é possível através da interação da nova superfície formada com o meio aquoso ou com outras partículas minerais (Somasundaran, 1980).

c) Variáveis associadas à campos e cargas e o relacionamento do sistema com as vizinhanças são efeitos que não podem deixar de ser considerados no caso de sistemas que contenham fases finamente subdivididas. Desta forma, a adsorção, que é uma das maneiras de se caracterizar uma interface, é um fenômeno melhor focado pela teoria da Dupla Camada Elétrica (DCE), onde efeitos de campos e cargas são considerados (Leja, 1983).

3.1.2 Adsorção

Adsorção é definida como uma concentração de íons ou moléculas na interface, sendo um processo espontâneo e exotérmico. A medida da adsorção é das maneiras de se caracterizar uma interface.

Adsorvato é aquele que se adsorve e adsorvente é a fase mais densa e sobre a qual ocorre a adsorção, podendo esta ocorrer através de vários mecanismos, sendo a atração eletrostática o mais simples deles. As classificações para a adsorção são diversas.

1 – Segundo a natureza da interação entre o adsorvato e o adsorvente.

- *Adsorção física (fisissorção)*: é originada por ligações físicas secundárias como ligações de van der Waals entre o adsorvato e o adsorvente. Neste tipo de adsorção pode ocorrer a formação de multicamadas.
- *Adsorção química (quimissorção)*: está relacionada com ligações químicas primárias, como ligações covalentes, dando origem a compostos de superfície, que podem apresentar propriedades físicas e químicas que não correspondem às dos compostos existentes na química clássica. Apenas uma camada elétrica pode ser formada nesse tipo de adsorção.

2 – Segundo a especificidade entre o adsorvato e o adsorvente.

- *Adsorção não específica*: ocorre em resposta à uma interação puramente eletrostática entre o adsorvato e o adsorvente. É rápida e rapidamente reversível, não podendo reverter o sinal da carga original do adsorvente.
- *Adsorção específica*: é atribuída a qualquer outro mecanismo de interação entre o adsorvente e o adsorvato que não seja o eletrostático, e que seja seletivo quanto ao sítio superficial. Espécies adsorvidas especificamente podem diminuir, anular ou até reverter a carga original do adsorvente. É relativamente lenta e irreversível.

3.1.3 Teoria da Dupla Camada Elétrica (DCE)

Dupla camada elétrica (DCE) é o nome da superfície gerada na interface sólido/água. É um fenômeno que ocorre entre superfícies de partículas eletricamente carregadas e a fase aquosa. A superfície das partículas atrai uma “atmosfera” de íons de carga oposta, denominados íons-contrários ou contra-íons. Parte dessa atmosfera é difusa, e o conjunto carga de superfície/carga difusa é designado “Dupla Camada Elétrica”.

A figura 3.2 mostra um esquema da DCE onde são distinguidas as seguintes regiões:

- *carga superficial*: limitada à superfície;
- *camada de Stern*: composta pelos íons especificamente adsorvidos em contato ou mais próximos da superfície;
- *camada difusa ou de Gouy*: composta pelos íons mais afastados da superfície, em relação aos da camada anterior, mas ainda relacionados à superfície, por interação eletrostática;
- *fase líquida*.

Segundo Parks (1973) a DCE também pode ser visualizada de duas formas diferentes, dependendo da presença de adsorção específica ou não.

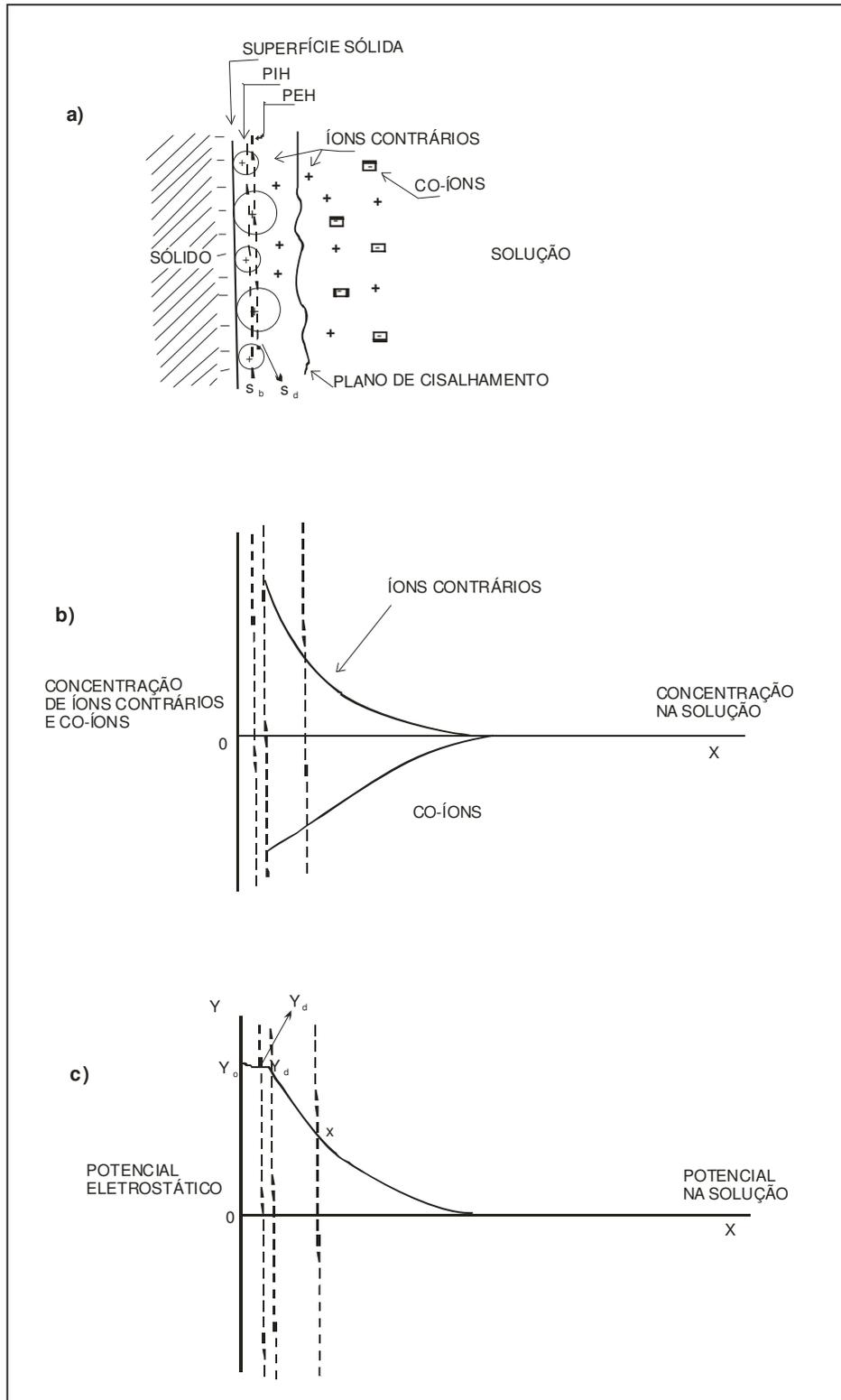


Figura 3.2 - a) Modelo da Dupla Camada Elétrica. (Parks, 1973); b) Concentração de íons contrários e co-íons; c) Distribuição do potencial eletrostático.

Adsorção não-específica

Quando as forças envolvidas na adsorção são somente de natureza eletrostática, a DCE é constituída apenas por duas zonas distintas de carga (figura 3.3): a carga de superfície e a carga da camada difusa ou de Gouy. Os íons contrários hidratados se encontram a uma distância de aproximação correspondente ao raio de hidratação. O plano que corta o centro desses íons contrários hidratados mais próximos da superfície é denominado Plano de Stern ou Plano Externo de Helmholtz (PEH). Ele divide os íons da DCE entre aqueles da camada de Stern e aqueles da camada de Gouy.

Adsorção específica

Na presença de adsorção específica, a DCE é considerada como constituída de três zonas de cargas (exceto no caso muito pouco provável da carga real de superfície ser neutralizada pela carga dos íons especificamente adsorvidos). Tais zonas de carga são: a carga superficial, a carga de íons adsorvidos especificamente (ou Plano Interno de Helmholtz - PIH) e a carga na camada difusa ou de Gouy (ver figura 3.4). Os íons especificamente adsorvidos na camada de Stern não se apresentam hidratados e conseguem aproximar-se mais da superfície que os íons hidratados adsorvidos não especificamente. Pode ocorrer adsorção superequivalente. Neste caso, o sinal da carga de superfície é revertido pelos íons adsorvidos especificamente.

Ponto isoelétrico (PIE): é o ponto em que a carga líquida no plano de cisalhamento é zero. Matematicamente, o PIE é o logaritmo negativo da atividade de um dos íons determinadores de potencial, para o qual a carga líquida no plano de cisalhamento é nula. Ions determinadores de potencial (IDP) são aqueles responsáveis pela carga de superfície.

Ponto de carga zero (PZC): é o logaritmo negativo da atividade de um dos IDP, correspondente, à carga real de superfície igual a zero.

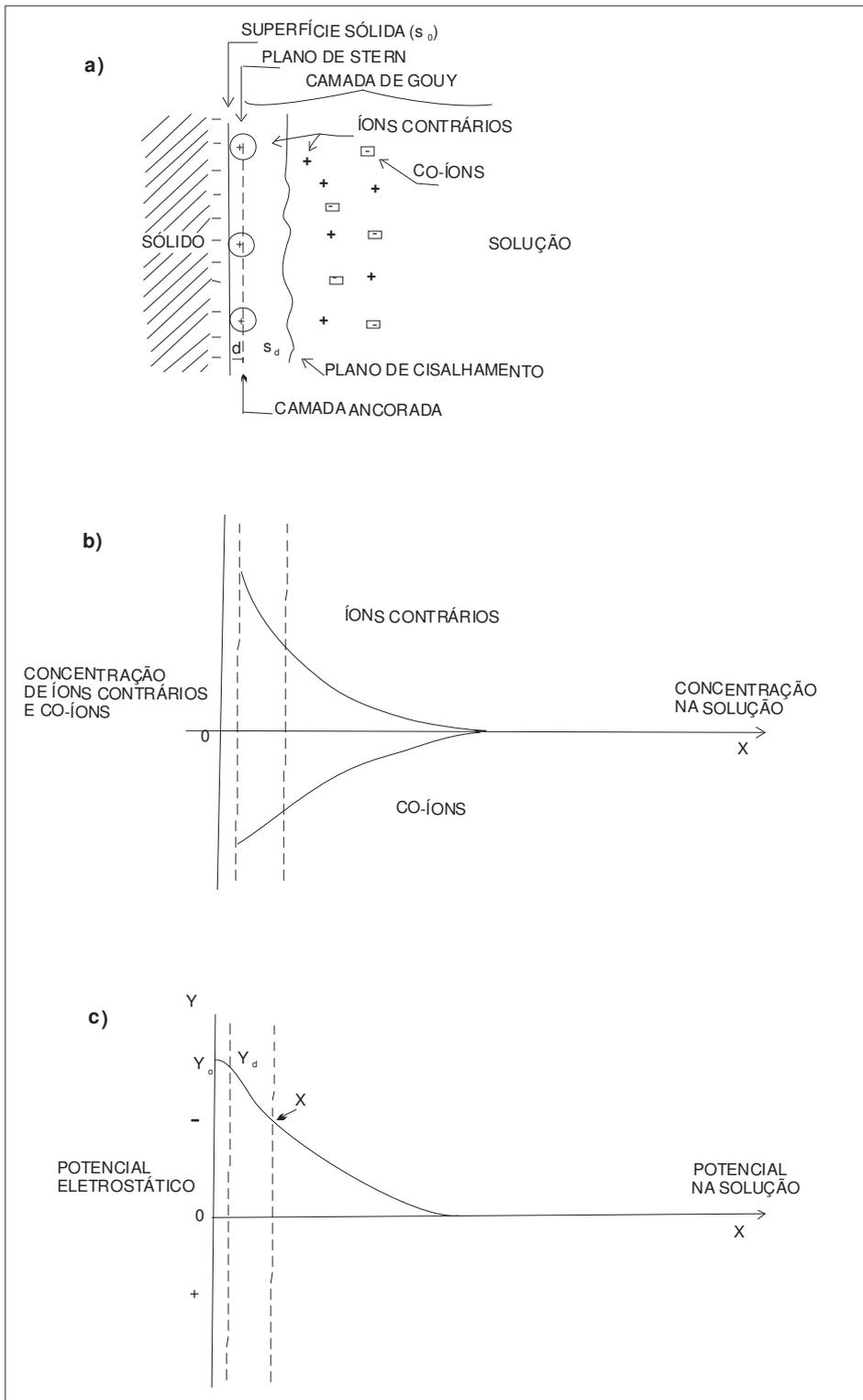


Figura 3.3 - a) Modelo da DCE com adsorção não-específica (Parks, 1973); b) Concentração de íons contrários e co-íons; c) Distribuição do potencial eletrostático.

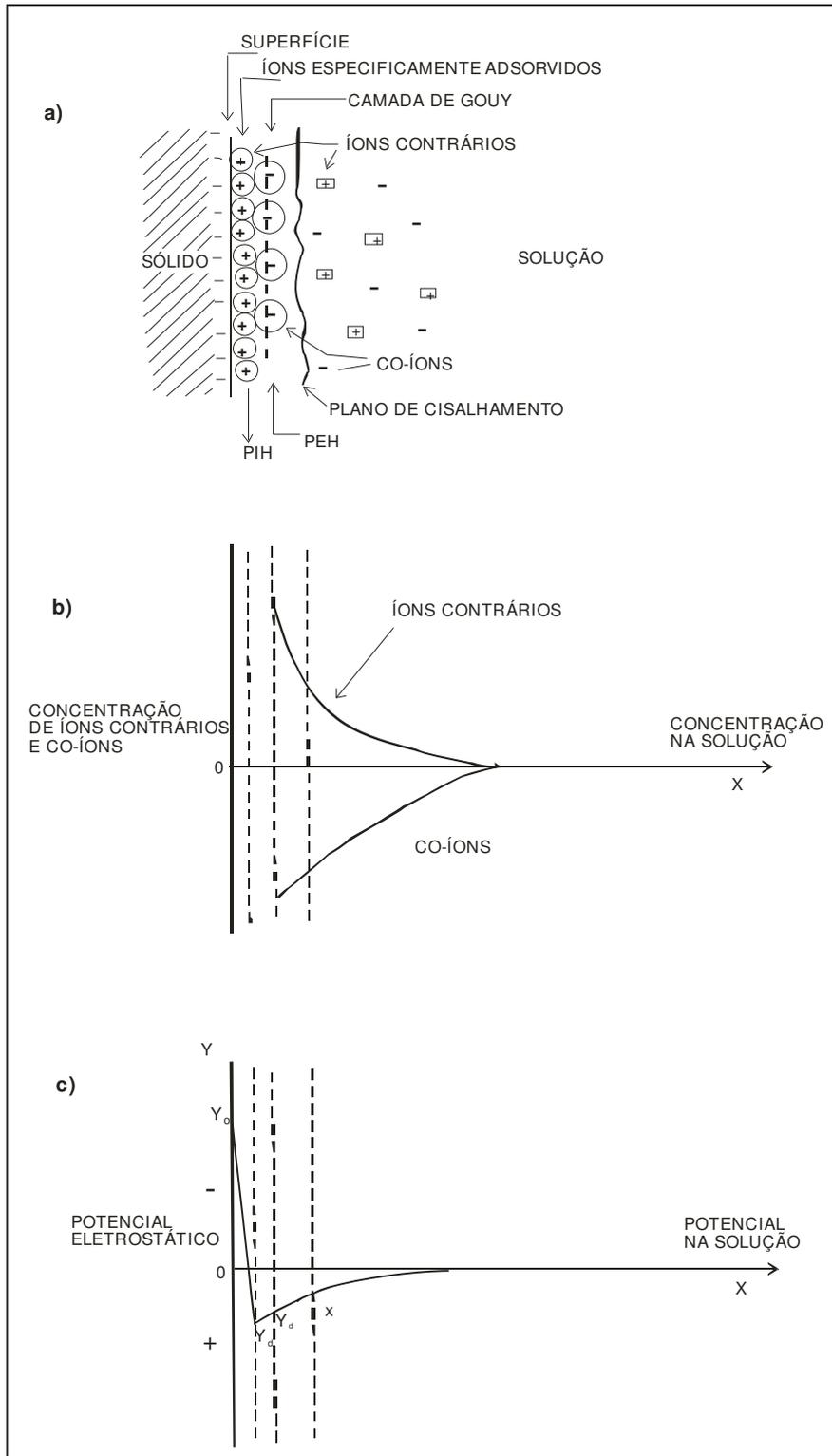


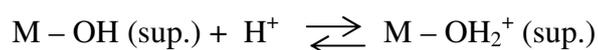
Figura 3.4 - a) Modelo da DCE com adsorção específica (Parks, 1973); b) Concentração de íons contrários e co-íons; c) Distribuição do potencial eletrostático.

Íons determinadores de potencial de 2ª ordem: são íons que reagem com os IDP e portanto afetam a carga de superfície das partículas. Quando a carga é determinada por tais íons, ou outros especificamente adsorvidos, a concentração dessas espécies que conduz ao potencial nulo é denominada concentração de reversão de carga (CRC). O ponto de reversão de carga (PRC) é o logaritmo negativo da CRC.

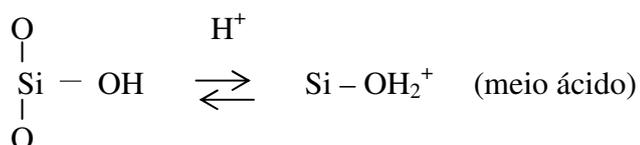
3.1.4 Mecanismos de formação de cargas

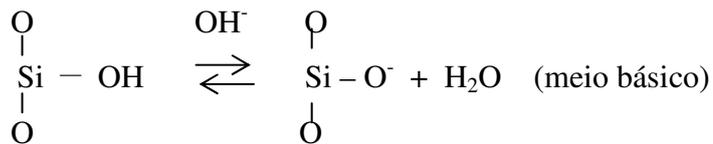
Os métodos eletrocinéticos comprovam a existência de carga elétrica de superfície. Essa carga pode ter várias origens, podendo ser intrínseca à estrutura e composição do sólido, ser resultante de interações sólido/água, ou ser totalmente extrínseca, resultante da adsorção específica de algum soluto presente no sistema (Parks,1985).

Óxidos tais como MgO, Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃ e TiO₂, formam superfícies hidroxiladas quando suas superfícies interagem com a água. A reação de cátions nas superfícies recém-formadas é equivalente a uma hidrólise superficial. Os grupos M-OH (onde M é o cátion metálico) funcionam como ácido de Brønsted e a carga pode se desenvolver por dissociação anfotérica ou hidrólise (Parks, 1985).



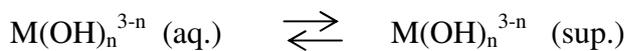
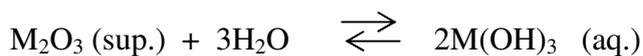
Cases (1968) afirma que este é principal mecanismo de formação de carga na superfície do quartzo. A superfície desse mineral é recoberta por uma monocamada de grupos hidróxidos que resulta da fixação de grupos OH⁻ por átomos de Si que estão em desequilíbrio na superfície. Assim sendo, a carga se desenvolve em meios ácido e básico das seguintes maneiras:





Para muitos óxidos e hidróxidos existem valores específicos de pH para os quais as tendências acima ocorrem. Hidróxidos mais solúveis podem ter sua carga desenvolvida por uma dissolução não-estequiométrica (Parks, 1985).

Outra possibilidade seria uma dissolução parcial que tornaria hidroxocomplexos em solução. Esses hidroxocomplexos podem ser reabsorvidos e serem assim responsáveis pelo desenvolvimento da carga. Dessa forma a carga se desenvolveria da seguinte maneira (Araújo, 1982):



3.1.5 Tensão superficial

Segundo Rabockai (1979) tensão superficial (γ) é o trabalho necessário para aumentar a área da superfície (interface, respectivamente), de uma unidade, num processo isotérmico e reversível.

A tensão superficial decresce com o aumento da temperatura, pois é necessário realizar trabalho sobre o sistema para se obter aumento da área de uma interface líquida no mesmo. Então, se a área for aumentada adiabaticamente, a temperatura cairá, e a tensão superficial aumentará, limitando posterior expansão da interface (princípio de Le Chatelier).

Segundo o mesmo autor, a tensão superficial deve aumentar com o aumento da pressão, não é possível aumentar a pressão sobre uma superfície líquida sem introduzir um segundo componente no sistema (ex.: um gás inerte). Com a presença deste gás surgem novos problemas (adsorção, aumento da densidade, *etc.*). De onde se conclui que o estudo do efeito da pressão sobre a tensão superficial é muito limitado experimentalmente.

O conceito químico de tensão superficial está relacionado com a facilidade ou dificuldade com que as espécies do interior da fase se dirigem para a interface para interagirem com espécies (moléculas) da outra fase. Se a tensão superficial é alta as espécies tendem a permanecer no interior da fase, se é baixa, elas se alojam na interface.

Tensão superficial de soluções

Rabockai (1979) analisa também como varia a tensão superficial em soluções, no caso em que é adicionado um soluto a um solvente (substância pura), em quantidades crescentes. O autor cita que existem substâncias que atuam no sentido de diminuir e outras de aumentar a tensão superficial em soluções aquosas, como as descritas abaixo.

a) *Álcoois e ácidos graxos (como solutos em soluções aquosas)*: diminuem a tensão superficial. A cadeia carbônica repele a água e tende a abandonar a solução. O trabalho necessário para levar estas moléculas à superfície é pequeno, e elas se acumulam na própria superfície, diminuindo as forças de coesão entre as moléculas de água, conseqüentemente, baixando a tensão superficial. (Caso em que ocorre a adsorção positiva).

b) *Sais iônicos (como solutos em soluções aquosas)*: aumentam a tensão superficial em relação à tensão superficial da água pura. O trabalho necessário para levar as moléculas do interior da solução à superfície é maior, tendo que vencer as forças íon-dipolo e van-der-Waals. A região interfacial é mais pobre em soluto que o interior da solução. (Ocorre adsorção negativa).

Ainda o mesmo autor define adsorção em termos de concentração do soluto na solução como as também descritas a seguir.

- a) *adsorção positiva*: ocorre quando as moléculas do soluto se acumulam na superfície, e a concentração nesta região será maior do que a concentração no interior da solução.
- b) *adsorção negativa*: quando a concentração do soluto na superfície é menor que no interior da solução.

3.1.6 Agregação e dispersão

Dispersão: é um termo usado quando se trata de partículas maiores (finos e ultrafinos). Coelho *et al* (1993) citam que o termo *suspensão* é usado quando partículas dispersas em um meio líquido possuem tamanho inferior a 1 μm (dimensões coloidais). Esses autores utilizam o termo dispersão devido à semelhança de comportamento entre ambos.

O estado de agregação de partículas sólidas em uma polpa está relacionado ao nível de estabilidade termodinâmica da dispersão.

Segundo os mesmos autores dispersões são classificadas como liofílicas quando existe uma afinidade partícula/solvente ou liofóbicas quando não existe esta afinidade. Podem ser classificadas também como hidrofílicas ou hidrofóbicas, quando o solvente é um meio aquoso. Dois mecanismos ocasionam a redução da estabilidade de uma dispersão: sedimentação e colisão/agregação (explicados posteriormente).

Ainda Coelho *et al* (1993), a desestabilização de uma dispersão pode ocorrer através de quatro processos diferentes, sendo que os três primeiros são relacionados a processamento em meio aquoso (que são as de interesse neste trabalho).

a) *Ligações hidrofóbicas*: ocorrem quando são adicionados surfatantes à polpa, que irão se adsorver na interface água/partícula, tornando esta última hidrofóbica. Isto faz com que possam surgir ligações de van-der-Waals entre as espécies hidrofóbicas adsorvidas nas partículas, formando agregados.

b) *Coagulação*: ocorre quando substâncias químicas (eletrólitos inorgânicos) são adicionadas com o objetivo de diminuir a repulsão eletrostática entre as partículas de uma polpa, possibilitando assim a formação de coágulos. Quando se formam coágulos de uma só espécie mineral se tem uma homocoagulação. Isto pode ocorrer em processos

de concentração otimizados, quando a polpa é muito pura, com alta concentração de minério. Quando ocorrem coágulos de mais de uma espécie mineral, se tem a heterocoagulação, processo bastante comum em Engenharia Sanitária.

c) *Floculação*: ocorre quando as partículas são ligadas umas às outras através de polímeros, originando flóculos. Os polímeros servem como pontes entre as partículas, conduzindo à formação dos flóculos. Em tratamento de água os polímeros são os principais agentes auxiliares de floculação, tanto os sintéticos como os naturais.

d) *Aglomerção*: as forças capilares de London-van-der Waals são responsáveis pela agregação de partículas.

Efeitos de agentes modificadores na agregação e dispersão

Agentes modificadores são substâncias químicas que podem ser adsorvidas, especificamente ou não, na interface partícula/água, ou mesmo podem atuar no sentido de modificar a química da solução. Essas substâncias têm por finalidade modificar a carga de superfície das partículas, promovendo convenientemente a agregação ou a dispersão entre elas. Os agentes modificadores inorgânicos mais utilizados são, respectivamente: modificadores de pH, sais contendo cátions (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Fe^{3+}), silicatos, polifosfatos e fluoretos (Coelho, 1984).

Reagentes químicos que aumentam a estabilidade de uma dispersão são chamados dispersantes. Tais reagentes são adsorvidos especificamente pelas partículas. Ao contrário, substâncias químicas (eletrólitos inorgânicos) que agem no sentido de diminuir a magnitude e o alcance das forças repulsivas entre as partículas, favorecendo a agregação, são denominadas coagulantes. (Coelho *et al.*, 1993).

Segundo os mesmos autores, de acordo com a regra de Schultze e Hardy, existe uma concentração mínima de eletrólitos para que ocorra coagulação em uma dispersão. Essa concentração é denominada de concentração crítica de coagulação (ccc) e pode ser estimada através da seguinte expressão:

$$\text{ccc} \propto 1/Z^6$$

onde Z é a valência do íon contrário presente nos eletrólitos indiferentes.

Ainda Coelho *et al.* (1993), é importante ressaltar que a coagulação em um sistema depende da frequência e da eficiência de colisões entre as partículas da polpa. Fatores como concentração de sólidos da polpa, temperatura, estado de agitação e taxa de sedimentação influenciam estes parâmetros.

Molhabilidade

Muitos termos são utilizados freqüentemente para descrever o processo em que uma fase sólida e uma fase líquida entram em contato e, conseqüentemente, uma interface sólido/gás é substituída por uma interface sólido/líquido. Em geral esse processo é referido como molhabilidade.

O conceito de hidrofobicidade/hidrofilicidade das partículas minerais está sempre associado à sua molhabilidade. Em geral, partículas hidrofóbicas são sempre menos molháveis pela água. E conseqüentemente suas dispersões são termodinamicamente instáveis. Por outro lado, partículas dispersam-se espontaneamente devido à sua molhabilidade.

Na prática mais de um tipo de molhabilidade podem estar associados à formação de interfaces sólido/líquido (Galery, 1985): Adesão, Espalhamento e Imersão, que são designados de acordo com o processo mecânico em que se apresentam.

a) *Adesão*: é caracterizada quando 1 cm² de uma superfície sólida plana (S) é colocada em contato com 1 cm² de superfície líquida plana (L) e a unidade de superfície de cada fase desaparece para formar uma unidade de água de uma nova interface sólido/líquido. O trabalho envolvido neste processo (W_a), levantado sob condições isotérmicas, foi calculado como sendo (Rabockai, 1979):

$$W_a = \gamma S/L - (\gamma S/V + \gamma L/V)$$

onde, $\gamma S/L$, $\gamma S/V$ e $\gamma L/V$ são as tensões interfaciais nas interfaces sólido/líquido, sólido/vapor e líquido/vapor, respectivamente (W_a é o trabalho reversível de adesão requerido para reestabelecer as condições iniciais).

b) *Espalhamento*: caracterizado quando uma gota de líquido se espalha sobre uma superfície sólida plana. Para cada unidade de área de superfície sólida que desaparece, uma unidade equivalente de área de superfície líquida e interface sólido/líquido é formada. O trabalho envolvido é:

$$W_s = (\gamma S/L + \gamma L/V) - \gamma S/V$$

c) *Imersão*: caracterizada quando ocorre a imersão total de um sólido com 1 cm^2 de superfície. Neste caso são envolvidas trocas de interfaces sólido/vapor por interfaces sólido/líquido sem nenhuma troca na extensão da superfície líquida. O trabalho imersional é dado por:

$$W_i = \gamma S/L - \gamma S/V$$

Estabilidade

A estabilidade de uma dispersão (ou seu grau de dispersão) é representada pela sua resistência à agregação e sedimentação com o tempo. Uma dispersão pode ser então considerada estável se não houver nenhuma mudança sensível no número total de partículas com o tempo. Esse conceito entretanto, é um tanto arbitrário, pois depende da escala de tempo sob o qual a observação é feita.

Existem alguns caminhos através dos quais o número de partículas em dispersão no meio aquoso pode vir a diminuir, que são a sedimentação e colisão e agregação.

a) *Sedimentação*: esse mecanismo é relevante em partículas de dimensões grosseiras, isto é, mais densas, que podem se sedimentar por efeito da gravidade, uma vez que somente a agitação térmica é suficiente para manter partículas de tamanho coloidal em suspensão.

b) *Colisão e agregação*: a colisão entre partículas é uma condição essencial para que ocorra a agregação. Movimento Browniano, agitação externa, viscosidade da polpa, temperatura, porcentagem de sólidos, tamanho das partículas, *etc*, são fatores que influenciam a quantidade e a eficiência das colisões entre partículas.

Para que a agregação ocorra é necessário além de tudo que, fatores relacionados com as forças de interação entre partículas sejam levados em conta.

Forças de interação entre partículas

No mínimo três tipos de forças de interação estão envolvidas na atração entre partículas (Galery, 1985):

- forças de atração London/van-der-Waals;
- forças coulômbicas associadas à DCE (atrativas ou repulsivas);
- forças estéricas (relacionadas com a hidratação ou camadas adsorvidas).

- *Forças de atração London/van-der-Waals*: são baseadas em interações eletrostáticas devido a dipolos interiores das partículas. Esses dipolos podem ser permanentes, no caso de partículas polares, ou induzidos nas partículas apolares. As interações entre dipolos são de caráter eletromagnético e pode-se afirmar que essas forças são sempre atrativas.

- *Forças Coulômbicas associadas à DCE*: num meio contendo íons, uma partícula carregada com a sua DCE é eletricamente neutra. Nenhuma força coulômbica líquida existe entre partículas carregadas a grandes distâncias. À medida que se aproximam, as partes difusas da DCE interpenetram-se dando origem à forças repulsivas que aumentam em magnitude à medida em que a distância entre as partículas diminui.

A distância na qual as forças repulsivas tornam-se significativas aumenta com a espessura da DCE. A força de repulsão aumenta com o aumento do potencial de superfície (P_0).

- *Forças estéricas*: estas forças estão relacionadas com a hidratação e com camadas adsorvidas. Podem ser atrativas ou repulsivas em função da preferência ou não dessas pelo meio aquoso. Atenção tem sido dada para a adsorção de íons poliméricos. Maiores aproximações (agregação) acontece quando esses íons são as espécies adsorvidas.

O interrelacionamento das forças de van-der-Waals e das forças coulômbicas constitui a base da teoria DLVO (Derjaguin – Landau - Verwey – Overbeek). De acordo com essa teoria, as condições de superfície (potencial zeta) devem ser determinadas para se obter as energias interpartículas representadas pelas curvas da figura 3.5. É possível então promover ou prevenir a agregação pelo controle da carga entre partículas fazendo com que as energias atrativas entre elas excedam ou não as energias repulsivas.

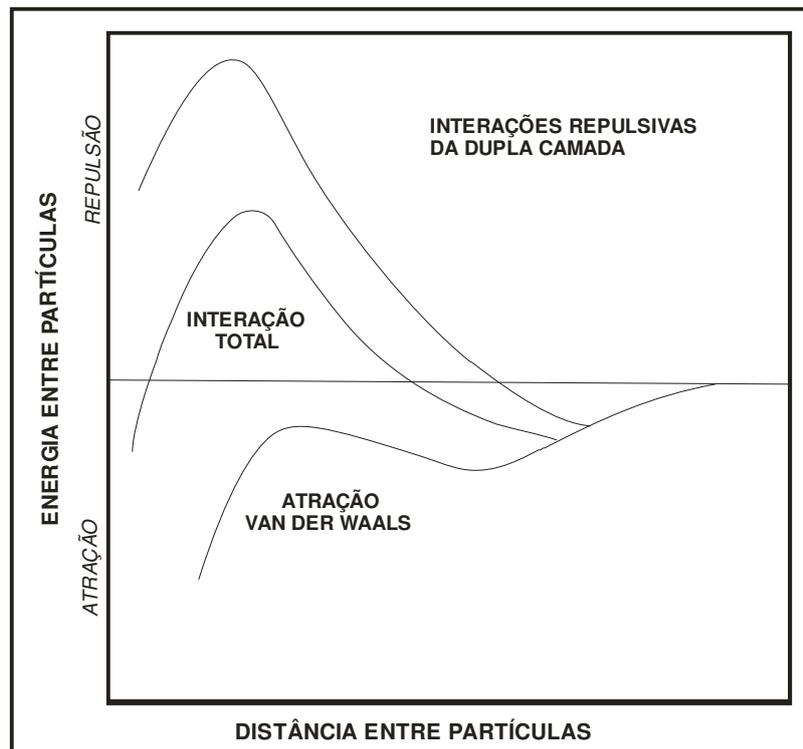


Figura 3.5 - Representação esquemática da variação da energia entre partículas com a distância.

Em geral, uma dispersão se torna estável por um período razoável de tempo se ocorrer: forças coulômbicas associadas à DCE ou, se forças estéricas (repulsivas) ultrapassarem as forças de van-der-Waals.

Na prática, entretanto, Riddick (1969) sugere que a estabilidade das dispersões seja classificada em função da magnitude do potencial zeta conforme a tabela III.1.

Tabela III.1 – Característica do estado de estabilidade das partículas em função do potencial zeta (Riddick, 1969).

Característica do estado de estabilidade	Potencial zeta (mV)
Faixa de agregação máxima	+ 3 a 0
Faixa de agregação forte	+ 5 a - 5
Limite de agregação	- 10 a - 15
Limite de estabilidade	- 16 a - 30
Faixa de estabilidade moderada	- 31 a - 40
Faixa próxima a uma boa estabilidade	- 41 a - 60
Faixa de estabilidade muito boa	- 61 a - 80
Faixa extremamente boa de estabilidade	- 81 a - 100

3.1.7 Teoria DLVO

A dispersão ou agregação de partículas finas suspensas em meio aquoso é determinada pela interação entre as partículas, quando estas colidem umas com as outras. Tais colisões são decorrentes do movimento Browniano, sedimentação e/ou de movimentos induzidos na polpa.

A energia de interação é proveniente das forças de van-der-Waals e das forças entre as duplas camadas elétricas das partículas. As forças de van-der-Waals são responsáveis pela atração das partículas, enquanto que o efeito resultante da interação entre as duplas camadas elétricas de partículas com cargas superficiais idênticas é a repulsão. A interação entre as partículas é esquematizada na figura 3.5.

Quando a componente correspondente às forças de van-der-Waals for maior que a componente de repulsão entre as partículas, ocorrerá agregação, e o sistema se tornará termodinamicamente instável. De forma análoga, quando a repulsão eletrostática prevalecer sobre as forças de van-der-Waals, haverá dispersão e, em consequência o sistema permanecerá termodinamicamente estável.

Coelho *et al.* (1993) mostram uma expressão simplificada para a energia potencial repulsiva (V_R) segundo Reerink e Overbeek:

$$V_R = \frac{\beta \cdot \epsilon \cdot k^2 \cdot T^2 \cdot a \cdot \gamma^2}{Z^2} \cdot \exp [- KH], \text{ onde:}$$

H = distância mais curta entre esferas de raio a;

β = uma constante;

Z = carga de íon contrário;

ϵ = constante dielétrica do meio;

k = constante de Boltzman;

K = comprimento recíproco de Debye-Huckel;

T = temperatura absoluta;

γ = obtido pela expressão abaixo:

$$\gamma = \frac{\exp [Z e \Psi_d / 2KT] - 1}{\exp [Z e \Psi_d / 2KT] + 1}$$

e = carga do elétron;

Ψ_d = potencial no plano de Stern.

Considerando os raios das partículas iguais a a e a distância entre partículas $H \ll a$, pode-se obter uma expressão simplificada para a energia de atração de London/van der Waals:

$$V_A = \frac{A}{12} \cdot \frac{a}{H}$$

onde:

A = constante de Hamaker, cujo valor depende da natureza do material que constitui as partículas e o meio, como: número de átomos contidos nas partículas, polarizabilidade, *etc.*

A intensidade da barreira energética que se opõe à agregação depende de alguns fatores, tais como a magnitude do potencial da superfície mineral e do alcance das forças de repulsão.

Os fenômenos de agregação e dispersão em tratamento de minérios, quando baseados na teoria DLVO são atribuídos à fatores que influenciam as características elétricas das partículas minerais em uma polpa; que podem ser dentre outros: adição de um eletrólito

indiferente, mudança na concentração dos índices determinadores de potencial (IDP) da polpa, variação da força iônica da solução, *etc* (Coelho *et al.*, 1993).

3.2 ELIMINAÇÃO DA TURBIDEZ DA ÁGUA

Os processos de agregação com eliminação da turbidez da água ocorrem quando substâncias químicas (coagulantes) são adicionadas com o objetivo de diminuir a repulsão eletrostática entre as partículas sólidas, possibilitando assim a formação de coágulos. No caso em estudo tem-se um processo de heterocoagulação.

Os coagulantes mais efetivos usados para eliminação da turbidez da água são:

- a) sulfato de alumínio - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times n \text{H}_2\text{O}$ em que $n = 14,3$ ou 18
- b) sulfato férrico - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \times 9 \text{H}_2\text{O}$
- c) sulfato ferroso clorado - $\text{FeCl}_3 \times \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
- d) cloreto férrico - $\text{FeCl}_3 \times 6 \text{H}_2\text{O}$
- e) hidroxí-cloreto de alumínio - $\text{Al}_x(\text{H}_2\text{O})_{(6x-2y)} (\text{OH})_y \text{Cl}_{(3x-y)}$ ou $\text{Al}_n (\text{OH})_m \text{Cl}_{3n-m}$

Existem ainda os coagulantes naturais que estão presentes nas águas *in natura* como, por exemplo, o magnésio. Quando estes coagulantes estão presentes em quantidades suficientes, provocam a agregação das partículas em suspensão com um simples ajuste de pH.

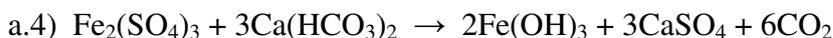
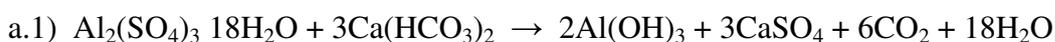
Auxiliares de coagulação

Em processos de eliminação da turbidez da água às vezes é necessário o emprego de substâncias auxiliares no processo de coagulação. Geralmente são produtos alcalinos como CaO , Na_2CO_3 e NaOH . Estes álcalis são empregados na coagulação quando a água natural apresenta alcalinidade total muito baixa e, ainda, para ajustar o pH ótimo

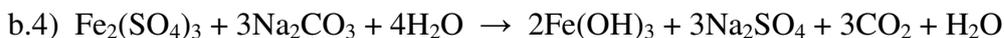
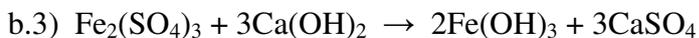
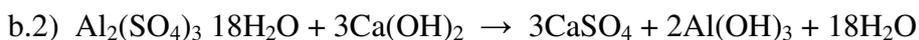
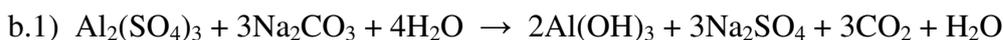
no qual se dá a coagulação. Algumas vezes esses auxiliares são ácidos, como o ácido sulfúrico e o ácido fosfórico, também usados para ajuste de pH.

Quando se adicionam coagulantes à água para se conseguir a coagulação, verifica-se que sulfato de alumínio, sulfato ferroso ou sulfato férrico reagem com a alcalinidade natural da água, ou adicionada, para formar polímeros como hidróxido de alumínio ou hidróxido de ferro, de acordo com as reações seguintes (Azevedo Neto, 1974):

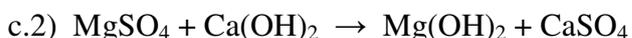
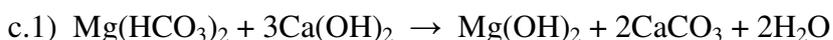
a) *reações com alcalinidade natural:*



b) *reações com alcalinidade adicionada*



c) *reações com coagulantes naturais:*



Os hidróxidos formados por essas reações possuem carga superficial positiva, e neutralizam as cargas negativas dos colóides em suspensão na água, formando flocos relativamente densos que precipitam, deixando a água praticamente livre de turbidez.

3.2.1 Floculação

Segundo Coelho *et al.* (1993) floculação é um fenômeno que ocorre quando polímeros são adsorvidos na superfície dos minerais de uma dispersão, provocando a formação de agregados denominados flóculos.

Em se tratando de floculação, a carga do polímero e o seu peso molecular são de grande importância. Um floculante polimérico pode ser classificado de acordo com seu peso molecular (Coelho *et al.*, 1993), conforme tabela III.2.

Tabela III.2 – Classificação dos floculantes poliméricos (Coelho *et al.*, 1993).

Descrição	Faixa (g/mol)
Baixo	$10^4 - 10^5$
Médio	$10^5 - 10^6$
Alto	$10^6 - 5 \cdot 10^6$
Ultra-alto	$> 5 \cdot 10^6$

Adsorção de polímeros na superfície

Segundo Coelho *et al.* (1993) existem muitos estudos sobre adsorção de polímeros de alto peso molecular na interface mineral/água. A partir desses estudos os autores citam que é possível concluir que existem pontos de fixação dos polímeros na superfície, dando origem a segmentos (denominados “trains”, “loops” e “tails”), mostrados na figura 3.6.

Coelho *et al.* (1993), descrevem que a adsorção de polímeros na superfície mineral em geral é atribuída a três diferentes tipos de ligações. Qualquer um deles, ou a combinação

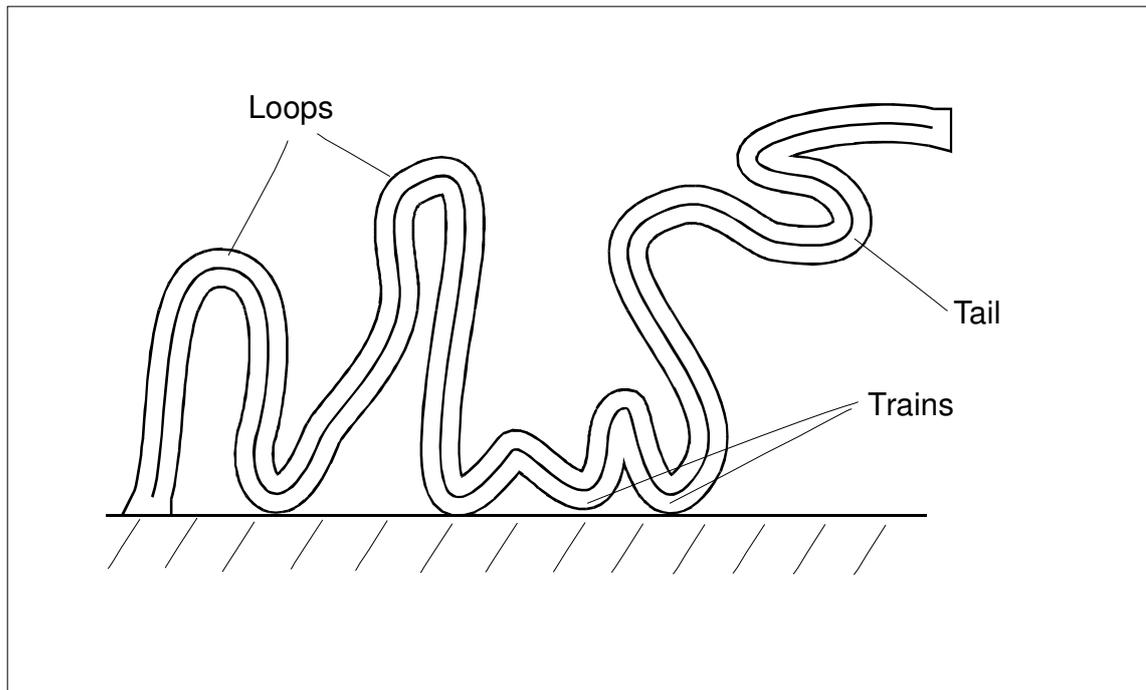


Figura 3.6 - Esquema da morfologia de polímeros adsorvidos.

dos três pode ser responsável pelo fenômeno, dependendo do sistema mineral/floculante bem como da composição do meio aquoso. Os tipos de ligação são:

- *ligações eletrostáticas*: quando a superfície e o polieletrólito possuem cargas de sinais opostos;
- *ligações de hidrogênio*: quando os polímeros que contêm átomos de hidrogênio unem-se à átomos fortemente eletronegativos (O, N, S) da superfície dos minerais;
- *ligações covalentes e iônicas*: quando ocorre a quimissorção de um tipo mais específico de polímero na superfície mineral.

Segundo Araújo & Galery (1987), o nível de adsorção dos floculantes na superfície dos minerais depende principalmente de fatores como:

- peso molecular do floculante;
- tipo de ligação e densidade de sítios reativos polares ao longo da cadeia;
- concentração de floculante;
- natureza da superfície mineral.

Mecanismos de floculação

A floculação por polímeros é atribuída a dois mecanismos: neutralização de cargas e formação de “pontes”.

Pearse & Barnett (1980) citam que o mecanismo de neutralização de cargas baseia-se na adsorção de um floculante com carga oposta àquela da superfície das partículas minerais presentes em uma dispersão; sendo esta uma maneira bastante efetiva de desestabilizar a suspensão.

A ligação eletrostática é o mecanismo predominante pelo qual polímeros podem se adsorver em partículas minerais, usualmente carregadas em solução. Moléculas poliméricas, quando se adsorvem em partículas opostamente carregadas, podem neutralizar a carga de superfície das partículas e diminuir as forças repulsivas entre as mesmas, o que favorece a agregação, devido às forças atrativas de London-van-der-Waals. Em adição, esses polímeros com grupos carregados adsorvem-se na superfície, podendo formar sítios opostamente carregados, “manchas” através das quais ocorre a formação de agregados ou flóculos (Coelho *et al.*, 1993).

Através do mecanismo de formação de pontes um floculante polimérico de cadeia longa adsorve-se na superfície mineral, deixando segmentos de sua cadeia estendidos para o seio da solução. Esses segmentos, por sua vez, podem adsorver-se em outras partículas da dispersão. Dessa forma, duas ou mais partículas podem ser agrupadas através de pontes poliméricas (Pearce & Barnett, 1980). Para formar pontes entre as partículas é necessária a presença de “*loops*” e “*tails*” nos polímeros adsorvidos, além de sítios de adsorção disponíveis em outras partículas (Coelho *et al.*, 1993).

Segundo os mesmos autores existem fatores que podem afetar a eficiência dos floculantes, sendo os principais descritos abaixo.

a) Concentração do floculante: normalmente existe uma dosagem ótima de floculante que possibilita uma floculação máxima das partículas de uma dispersão. Grandes concentrações de polímeros podem agir no sentido de reestabilizar o sistema, com a formação de uma camada protetora. Alguns autores sugerem que a dosagem para uma

floculação ótima seria quando a metade da área superficial dos sólidos é coberta pelo floculante.

b) *Agitação do sistema*: é fundamental para dispersar o floculante, garantir a adsorção do polímero na superfície dos sólidos e aumentar a taxa de colisão entre as partículas, requisitos básicos para que haja a floculação. Agitação em excesso pode provocar o rompimento dos flóculos já formados. Já a pouca agitação provoca uma adsorção excessiva dos floculantes em alguns sólidos, enquanto os outros ficam sem cobertura.

c) *Peso molecular do polímero*: quando o peso molecular é muito baixo o comprimento da cadeia polimérica pode não ser suficiente para formar “pontes” entre as partículas. Se o peso molecular for muito alto a dissolução dos polímeros pode não ser eficaz, além do fato de que sua fabricação se torna mais cara.

d) *pH e força iônica da suspensão*: ambos podem afetar a carga de superfície das partículas em suspensão, bem como a conformação dos polímeros na solução, influenciando o processo de floculação.

e) *Concentração de sólidos*: a quantidade de flóculos formados geralmente aumenta com a concentração de sólidos, devido ao grande número de colisões entre as partículas, favorecendo a formação de “pontes” entre as mesmas. Em baixas concentrações de sólidos, a eficiência da floculação é bastante reduzida, em virtude da pequena taxa de colisões entre as partículas.

A tabela III.3 mostra as diversas maneiras de se efetuar a floculação de uma água com o uso de coagulantes convencionais e dos polieletrólitos. Águas de alta turbidez floculam com menores concentrações de coagulantes que as de baixa turbidez. Águas de turbidez relativamente alta floculam com o uso de apenas polieletrólitos catiônicos. A tabela mostra também que o uso de polieletrólitos dispensa a adição de álcalis à água mesmo quando sua alcalinidade natural for baixa, o que demonstra que os polieletrólitos ampliam a faixa de pH ótimo para a floculação de uma água. Os números apresentados nesta tabela não são valores absolutamente rígidos e definitivos. Eles dão apenas uma orientação de como se deve proceder aos testes para eliminação da turbidez em águas.

Finalizando, os polímeros do tipo aniônicos geralmente são biodegradáveis e os do tipo catiônicos não o são, portanto o seu uso deverá ser evitado.

Tabela III.3 - Formas de floculação. Modificado de Azevedo Neto (1974).

Turbidez ppm SiO ₂	Coagulante principal (ppm)	Coadjuvante (ppm)	Alcalinidade natural (ppm) CaCO ₃	Alcalinidade adicionada Ca(OH) ₂ ; Na ₂ CO ₃ ; NaOH (ppm)	Floculação e sedimentação
50 – 60	Al ₂ (SO ₄) ₃ 15 – 20	-	Suficiente Insuficiente	- 5 – 10	Rápida
50 – 60	Al ₂ (SO ₄) ₃ 10 – 15	Polieletrólito catiônico 0,1 – 10	-	-	Flocos grandes Rápida
50 – 60	-	Polieletrólito catiônico 1,0 – 5,0	-	-	Rápida
50 – 60	Pequeno excesso de carga positiva	Polieletrólito aniônico 1,0 – 5,0	-	-	Flocos grandes e sedimentação rápida
20 – 30	Al ₂ (SO ₄) ₃ 25 – 40	-	Suficiente Insuficiente	- 5 – 10	Relativamente rápida
20 – 30	Al ₂ (SO ₄) ₃ 15	Polieletrólito catiônico 0,1 – 1,0 e/ou bentonita 10 – 15	-	- Se necessário	Rápida
20 – 30	Al ₂ (SO ₄) ₃ 15 – 20	Polieletrólito catiônico 0,1 – 1,0	-	-	Relativamente rápida
20 – 30	Al ₂ (SO ₄) ₃ 15	Polieletrólito catiônico 1,0 – 5,0 aniônico 1,0 – 5,0	-	-	Rápida
20 – 30	-	Bentonita 15 Polieletrólito catiônico 1,0 – 5,0	-	-	Rápida

3.2.2 Sedimentação

Processo físico que compreende nada mais que a decantação de partículas em suspensão apenas por efeito da gravidade. As partículas mais grossas podem ser eliminadas da água simplesmente por processos físicos mas, aquelas mais finas, necessitam de floculação para obter-se partículas maiores e posteriormente sedimentar-se. A

capacidade de permanecer em suspensão por determinado tempo é função tanto do tamanho como do peso específico de cada partícula. A tabela III.4 mostra os tempos relativos de sedimentação de esferas de diferentes tamanhos. Observa-se que as velocidades de sedimentação da matéria coloidal em suspensão finamente dividida (aproximadamente de 0,001 a 1 μ m) são tão lentas, que é praticamente impossível eliminá-las da água por sedimentação apenas.

Tabela III.4 – Velocidade de sedimentação de partículas. Adaptado de Azevedo Neto (1974).

Diâmetro das partículas, mm	Ordem de tamanho	Tempo necessário para sedimentação*
10	Cascalho	0,3 segundos
1	Areia grossa	3 segundos
0,1	Areia fina	38 segundos
0,01	Limo	33 segundos
0,001	Bactérias	55 horas
0,0001	Partículas coloidais	230 dias
0,00001	Partículas coloidais	6 anos, 4 meses
0,000001	Partículas coloidais	Mínimo de 63 anos

* estes cálculos se baseiam em uma esfera de densidade 2,65 para sedimentar a 0,30 m.

3.3 PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE ELIMINAÇÃO DA TURBIDEZ DA ÁGUA

Nos processos de eliminação da turbidez da água são empregados reagentes químicos que atuam como coagulantes / floculantes e também como auxiliares na coagulação. É imprescindível se conhecer para cada tipo de reagente a ser utilizado, sua fórmula química, procedência, forma de fornecimento, disponibilidade e custo do produto na região. Di Bernardo *et al.* (2002) citam os principais coagulantes químicos comumente utilizados no tratamento de água para eliminação da turbidez.

Cal hidratada

Uso: ajuste do pH de coagulação e correção do pH final.

Fórmula química: Ca(OH)_2 .

Fornecimento: pó.

Massa específica aparente: 0,56 a 0,80 Kg/L.

Concentração de óxido de cálcio (porcentagem massa /massa Ca(OH)_2): 62 a 74.

Tempo de uso da suspensão a 10 mg/ml: 1 mês.

Cal virgem

Uso: ajuste do pH de coagulação e correção do pH final.

Fórmula química: CaO .

Fornecimento: pó, pulverizado, granulado ou pedra (nas estações de tratamento de água).

Massa específica aparente: 0,80 a 1,2 Kg/L.

Concentração de óxido de cálcio: > 90%.

Tempo de uso da suspensão a 10 mg/ml: 1 mês.

Polímeros naturais

Uso: auxiliares de floculação.

Fornecimento: pó.

Tipos: mandioca, batata, aratuta, milho *etc.*

Tempo de uso da solução: 3 dias

Polímeros sintéticos

Uso: auxiliares de coagulação e/ou floculação

Fornecimento: pó ou emulsão.

Tipos: catiônico, aniônico e não-iônico.

Tempo de uso da solução: 1 semana.

Cloreto férrico PA

Uso: coagulação.

Fórmula química: $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$.

Fornecimento: pó.

Massa molar: 270,5 g.

Porcentagem teórica de Fe_2O_3 (massa/massa): $\cong 59,1\%$.

Porcentagem teórica de Fe (massa/massa): $\cong 20,7\%$.

Tempo de uso da suspensão a 2 mg/ml: 1 semana.

Sulfato de alumínio PA

Uso: coagulação.

Fórmula química: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times n\text{H}_2\text{O}$, em que $n= 14,3$ ou 18 .

Fornecimento: pó ou granulado.

Tempo de uso da suspensão a 20 mg/ml: 1 semana.

3.4 QUALIDADE DAS ÁGUAS

A poluição dos corpos d'água se manifesta através de alterações nas características físicas, químicas e biológicas da água. Para controle destas características, são adotadas em vários países, inclusive no Brasil, normas da Standard Methods for Examination of Water e Wastewater APHA-AWWA-WPCF.

As alterações físicas na água normalmente se manifestam por meio de alterações na turbidez, cor, número e tamanho de partículas em suspensão, temperatura, condutividade elétrica, viscosidade, tensão superficial dentre outros; as químicas por alterações no pH, demanda bioquímica de oxigênio-DBO, demanda química de oxigênio-DQO, toxicidade, *etc.* Já as de natureza biológica se manifestam freqüentemente por alterações nas espécies do fitoplâncton e zooplâncton.

Em Minas Gerais a Fundação Estadual do Meio Ambiente-FEAM, propõe para as atividades desenvolvidas em leitos de rios ou às suas margens, um programa de monitoramento básico da qualidade das águas superficiais, tomando como base parâmetros e limites estabelecidos na Deliberação Normativa nº 010/COPAM, de 16 de dezembro de 1986. Os parâmetros considerados mais relevantes para controle da qualidade das águas superficiais são: turbidez, sólidos totais, condutividade elétrica, pH, óleos e graxas coliformes fecais, DBO, DQO, oxigênio dissolvido-OD, nitrogênio

amoniaco e o índice de qualidade das águas - IQA. Acrescenta-se a estes parâmetros vários outros, muitas vezes dependendo do tipo de atividade que se desenvolve com frequência ao longo do rio ou bacia hidrográfica. São ressaltados neste trabalho, os parâmetros – turbidez, sólidos totais ou sólidos dissolvidos, DBO, OD e pH.

Turbidez

Este parâmetro mede a resistência da água à passagem da luz. É uma característica das águas correntes, podendo aumentar nos períodos chuvosos. Em águas dormentes apresenta geralmente valores baixos.

A turbidez decorre naturalmente da presença de material em suspensão, plânctons, microorganismos, argilas e siltes nas águas. Sua principal fonte é o aporte de partículas de solos provenientes da superfície da bacia hidrográfica, em função de desmatamentos, processos erosivos e atividades de mineração. Pode também advir do lançamento de efluentes que contenham material fino.

O aumento da turbidez afeta esteticamente os corpos d'água, podendo causar distúrbios aos ecossistemas aquáticos devido à redução da penetração da luz. Também aumenta os custos de processos de tratamento para fins de abastecimento de água.

As substâncias que provocam a turbidez ou aumento dela nas águas superficiais, apresentam uma variedade de tamanhos que oscilam entre os suficientemente grandes para se sedimentarem com relativa facilidade e aqueles suficientemente pequenos para permanecerem em suspensão durante longos períodos de tempo. Di Bernardo *et al.* (2002) apresentam na figura 3.7, um quadro com a distribuição de tamanhos de partículas normalmente presentes na água.

Sólidos totais

As partículas sólidas ou “sólidos” são naturalmente encontradas nas águas devido ao desgaste das rochas por intemperismo. Grandes concentrações decorrem normalmente

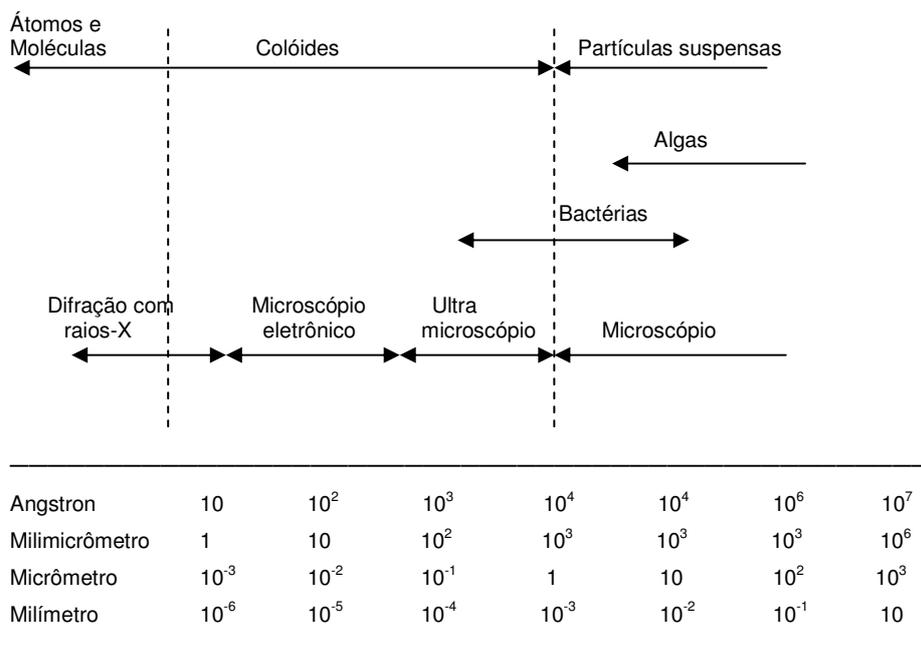


Figura 3.7 - Distribuição de tamanho de partículas na água. Adaptado de Di Bernardo *et al.* (2002).

do carreamento de solos pelas águas pluviais, devido à processos erosivos e desmatamentos na bacia hidrográfica, do lançamento de esgotos domésticos, efluentes industriais e da dragagem para remoção de areia e atividades de garimpo.

Excesso de sólidos na água pode causar alterações de sabor e problemas de corrosão em tubulações de distribuição. Em águas utilizadas para irrigação, pode gerar problemas de salinização do solo. Os sólidos em suspensão aumentam a turbidez das águas, prejudicando seus aspectos estéticos e a produtividade do ecossistema pela diminuição da penetração da luz.

Potencial de hidrogênio – pH

É a relação numérica que expressa o equilíbrio entre íons (H⁺) e (OH). Alterações naturais advêm da presença de ácidos carbônicos e húmicos dissolvidos. As maiores

alterações no pH são normalmente provocadas por despejos industriais e águas residuárias de minerações.

Águas com pH baixo ou elevado são agressivas, podendo causar corrosão em tubulações. Alterações bruscas de pH (<5,0 ou >9,0) podem causar o desaparecimento de espécies aquáticas.

Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO

É a quantidade de oxigênio consumida na oxidação biológica da matéria orgânica. É o parâmetro mais usual de indicação de poluição orgânica. Ocorre naturalmente nas águas em nível reduzido em função da degradação de matéria orgânica (folhas, animais mortos, fezes de animais). Aumentos de DBO são provocados por despejos de origem predominantemente orgânica. Altos índices podem gerar a diminuição e até a extinção do oxigênio presente nas águas. Nestas condições, os processos aeróbicos de degradação orgânica podem ser substituídos por outros anaeróbicos, gerando alterações substanciais no ecossistema, inclusive com a extinção de formas de vida oxigênio-dependentes.

Oxigênio Dissolvido - OD

Este parâmetro é fundamental para a manutenção das comunidades aquáticas aeróbicas. Provém naturalmente de processos cinéticos e fotossintéticos. Varia em função da temperatura da água e pressão atmosférica. Reduções significativas nos teores de oxigênio dissolvido são provocadas por despejos principalmente de origem orgânica.

A tabela III.5 mostra os limites estabelecidos de cada um dos parâmetros descritos, de acordo com a DN 010/86-COPAM, para as coleções de águas de Classe 3, Classe 4 e para efluentes. Neste trabalho deverão ser considerados os limites estabelecidos para o lançamento de efluentes nos corpos d'água mas, como o limite para o parâmetro turbidez não é bem definido nesta deliberação, considerou-se o limite estabelecido para

a Classe 3. Ressalta-se que, de acordo com as análises realizadas pela FEAM nas suas campanhas de monitoramento, o rio Araguari apresenta valores de alguns parâmetros que podem classificá-los como Classe 3 ou 4 dependendo do trecho analisado. Para o lançamento de efluentes deverão ser considerados alguns valores estabelecidos para a Classe 3.

Tabela III.5 – Limites de tolerância para parâmetros de análises de água, de acordo com a DN 010/86-COPAM.

PARÂMETRO	Limites DN010/86 - COPAM		
	Classe 3	Classe 4	Efluentes
Turbidez	= até 100 UNT	-	-
Sólidos totais	sólidos dissolvidos totais: 500 mg/l	sólidos dissolvidos totais:	sólidos em suspensão = 100 mg/l (diário) = 60 mg/l (média mensal)
pH	de 6,0 a 9,0	de 6,0 a 9,0	entre 6,5 a 8,5 ($\pm 0,5$)
Oxigênio dissolvido - OD	não inferior a 4,0 mg/l de O ₂	superior a 2,0 mg/l de O ₂	-
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO	até 10 mg/l de O ₂	=	máximo de 60 mg/l de O ₂
Demanda Química de Oxigênio - DQO			máximo de 90 mg/l
Alumínio (Al)	teor máximo: 0,1 mg/l	-	-

3.5 BACIAS DE DECANTAÇÃO E DE SEDIMENTAÇÃO

Os termos: “bacias de decantação” e “bacias de sedimentação” são freqüentemente empregados em estações de tratamento de água e em várias outras áreas afins, mas muitas vezes estes termos se confundem por suas funções.

Bacia de decantação

É aquela onde se dá a decantação dos sólidos em suspensão por injeção de reagentes coagulantes ou floculantes.

Bacia de sedimentação

É o local onde a água fica em repouso por algum tempo para que ocorra a sedimentação dos sólidos em suspensão somente por processo gravimétrico.

3.6 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICADA À QUALIDADE DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

Diversas entidades estão envolvidas no estabelecimento de parâmetros de análises de água, com a finalidade de se determinar e manter a qualidade de águas superficiais. Em todo o mundo os limites de tolerância são estabelecidos principalmente de acordo com a finalidade de uso das águas.

No Brasil foram adotados como referências diversos modelos e a experiência desenvolvida principalmente pelos países da Comunidade Européia e Estados Unidos.

3.6.1 Legislação Brasileira

No Brasil os órgãos ambientais estaduais adotam programas próprios de monitoramento da qualidade das águas superficiais.

No estado de Minas Gerais adota-se como referência a DN 010/86-COPAM. É esta deliberação que estabelece normas e padrões para a qualidade das águas e lançamento de efluentes nas coleções de águas estaduais. Também faz a classificação das coleções de água em classes específicas de acordo com as finalidades de uso.

3.7 O ALUMÍNIO EMPREGADO COMO COAGULANTE DE ÁGUAS

Como o alumínio, hoje em dia, é considerado um elemento totalmente indesejável em águas de superfície para consumo humano, por causa da possível correlação entre ele e certas doenças cerebrais, e alguns de seus sais são largamente utilizados no tratamento das águas de consumo corrente, algumas considerações serão feitas.

1 – Patnaik (2001) faz algumas considerações acerca de diversas substâncias químicas e seu grau de toxicidade em relação ao corpo humano. No caso do alumínio o autor cita que este elemento é apontado como causador de encefalopatia com degeneração neurofibrilar (uma provável causa do mal de Alzheimer). No entanto, faz também as seguintes considerações:

“O sistema nervoso é uma parte vital do corpo, alguns mecanismos protetores, principalmente a barreira hemato-encefálica (BBB – *blood-brain barrier*) e, em uma menor extensão, a barreira hemato-neurológica (BNB – *blood-nerve barrier*) protegem o sistema nervoso contra substâncias químicas tóxicas presentes no sangue.

Apesar de tais barreiras, algumas substâncias podem penetrar no cérebro e causar efeitos adversos em graus diferentes. Isto pode acontecer parcialmente devido à ausência da barreira hemato-encefálica em alguns locais, ou onde as células produzem hormônios ou onde elas agem como receptores hormonais. Substâncias que são altamente lipofílicas podem atravessar a barreira hemato-encefálica e afetar o cérebro. Entre tais substâncias estão incluídas muitas substâncias orgânicas e organometálicas que são lipossolúveis. Por outro lado muitos sais inorgânicos ionizáveis que são hidrofílicos (com nenhuma afinidade com relação aos lipídios) não podem penetrar a barreira hemato-encefálica e não mostram qualquer efeito no sistema nervoso central.

A permeabilidade de um composto através da barreira hemato-encefálica também depende do diâmetro molecular. Moléculas maiores, com um diâmetro aproximadamente acima de 5 nm são impermeáveis com relação ao endotélio no cérebro.”

2 – O alumínio é um elemento abundante e comum na superfície do planeta, ocorrendo praticamente em todos os ambientes geológicos da crosta continental e em menor quantidade nas águas continentais e marinhas. Ele representa cerca de 8% da composição total da litosfera e ocorre primariamente nas rochas graníticas substituindo o silício nas estruturas dos silicatos, sendo posteriormente reciclado para as rochas sedimentares e metamórficas. Nas águas de superfície sua concentração varia entre 1 a 0,01 ppm.

O alumínio é um elemento refratário aos agentes atmosféricos, ocorrendo portanto como único elemento nos resíduos finais de intemperismo das rochas magmáticas, sedimentares e metamórficas. Nestas condições, ele ocorre sob a forma de hidróxidos, sendo os mais comuns em clima tropical úmido a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_2$) e a bohemita (AlOOH). Uma vez formados, os hidróxidos de alumínio, com misturas em proporções variáveis de hidróxidos de ferro, são praticamente insolúveis, formando carapaças, por vezes muito espessas, no nível do solo.

Pouco se conhece sobre a solubilidade dos sais de alumínio, havendo mais informações para o caso da alumina (Al_2O_3), cujo controle é o pH. Em condições de pH entre 4 e 9, onde se situam praticamente todas as águas de superfície, a alumina é praticamente insolúvel. Em se considerando um sistema SiO_2 e Al_2O_3 , o que é o mais comum em níveis de solos, tropicais ou não, o $\text{pH} < 4$ favorece a solubilização da alumina, ao passo que a sílica se solubiliza pouco. Nestas condições, as concentrações de ambos os óxidos (aproximadamente $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 = 1/2$) favorece a formação de minerais caulínicos.

Em condições de pH entre 8 e 10, onde tanto a sílica quanto a alumina são fortemente solúveis, porém a quantidade do primeiro óxido é muito maior que a do segundo, favorece-se a formação de argilas montmoriloníticas ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 = 1/4$). Conseqüentemente, mesmo em condições extremas de pH, praticamente não existe alumínio em solução pois ele, em presença de sílica, se incorpora rapidamente na estrutura de novos minerais.

Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio utilizado no tratamento de águas é obtido pelo ataque de ácido sulfúrico sobre a bauxita (mistura de gibbsita e bohemita) resultando em um sal de fórmula $Al_2(SO_4)_3$. Dependendo do método de fabricação e da qualidade da bauxita utilizada (presença de hidróxidos de ferro e de titânio), o produto apresenta maior ou menor grau de pureza. A determinação deste grau de pureza é expressa em percentagem de alumina (Al_2O_3). Ainda, dependendo do método de fabricação, poderá resultar que o sulfato de alumínio seja sólido ou em suspensão. Quando sólido, ele se apresenta em blocos de cristais aglomerados.

3.8 ASPECTOS FÍSICOS REGIONAIS

3.8.1 Aspectos gerais

A área escolhida para teste localiza-se no rio Araguari. No aspecto hidrográfico este rio é um importante afluente da margem esquerda do rio Paranaíba. Recebe, na “ponta do nariz” do Triângulo Mineiro, o rio Grande e, é a partir desta junção que passa a ser denominado rio Paraná. As bacias hidrográficas dos rios Paranaíba e Grande são responsáveis por grande parte da energia elétrica produzida no sudeste do Brasil.

Com relação ao clima, a área se situa em uma região com grande volume de precipitação pluviométrica, em torno de 1.600 mm anuais; a temperatura média do mês mais quente (janeiro) é de 24° C e a do mês mais frio (julho) é de 16° C. O clima é do tipo mesotérmico úmido, classificado como Cwa, de Köppen, o que corresponde a um clima tropical de altitude.

No aspecto vegetacional, localmente se verifica que a vegetação original foi quase inteiramente substituída por culturas extensivas de café e soja, além de campos de pastagens. Os remanescentes florestais mostram uma vegetação de grande porte, do tipo

mata ombrofólia úmida, com manchas de cerrado e cerradão. Esse tipo de vegetação mais exuberante ainda pode ser visto nas matas ciliares que existem em alguns trechos das margens dos grandes rios.

3.8.2 Geomorfologia e fisiografia

A área estudada está situada na parte setentrional da Bacia Sedimentar do Paraná, quase no limite com as rochas metassedimentares neoproterozóicas do Grupo Araxá. Trata-se de uma região de transição entre dois domínios fisiográficos bem contrastantes onde podem ser caracterizados três tipos principais de feições morfológicas, a saber:

- chapadas ou planalto cimeiro;
- zonas de escarpas;
- planalto dissecado.

Chapadas ou planalto cimeiro

Trata-se de uma extensa superfície de forma tabular nivelada entre 800 e 1.000 metros, mais constantemente em torno da cota de 900 metros, com poucas ondulações. As cotas mínimas marcam a base da cobertura sedimentar superior e as máximas o topo do último evento de agradação de relevo. Neste contexto, dois patamares distintos podem então ser evidenciados: - o primeiro em torno de 900 metros e o segundo de aproximadamente 950 metros. Além da diferença de cotas devida à cobertura sedimentar, as variações de cota abaixo de 900 metros refletem também episódios sucessivos do vulcanismo basáltico comum nesta região.

Esta superfície tabular foi estruturada durante o denominado ciclo Sulamericano, iniciado no fim do Cretáceo e o grande responsável pelos traços macroestruturais da América do Sul, segundo King (1956).

O tipo morfológico mais característico do planalto cimeiro é o chapadão, grandes superfícies de forma tabular aproximadamente nivelado em 950 metros, topos mais ou

menos planos, com diferenças métricas de cotas, e encostas geralmente de vertentes muito suaves, sem escarpamentos bruscos, Isto revela a constituição litológica do substrato: - arenitos cretácicos continentais pouco consolidados e muito susceptíveis à erosão laminar.

O nível inferior é moldado sobre os basaltos, cujo topo está fortemente marcado pela cota de 900 metros na região de Uberlândia. O último derrame basáltico é um bom marcador da inclinação do relevo. Para o sul, em direção ao estado de São Paulo, seu topo inclina-se suavemente, situando-se a aproximadamente 700 metros em Uberaba. Para oeste, em direção ao estado de Goiás a inclinação é também suave. porém mais acentuada, de modo que, na região de Ituiutaba, o topo do último derrame basáltico está nivelado em torno de 400 metros.

Na região estudada, freqüentemente nota-se um relevo de transição entre os patamares: - extensas rampas coluvionares que transgridem sobre os contatos litológicos.

Essas rampas coluvionares materializam o retrabalhamento da superfície sulamericana no fim do Terciário e início de Quaternário.

A rede de drenagem instalada sobre o planalto cimeiro tem um padrão fortemente retangular e sobre o patamar inferior varia entre os tipos sub retangular e treliça, isto é, menos influenciado pelo fraturamento, tão típico nos arenitos.

Zonas de escarpas

A zona de escarpas situa-se entre o planalto cimeiro e os vales dissecados pelos grandes canais de drenagem e está estruturada sobre os derrames basálticos compreendidos pelas cotas de 650 a 850 metros. Estas escarpas são mais notáveis no extremo setentrional da bacia sedimentar, principalmente na estrada de Araguari até Caldas Novas, onde existem paredões verticais de até 150 metros. Em direção oeste, região de Ituiutaba, os escarpamentos são bem atenuados, restringindo-se ao longo dos canais de drenagem onde constituem cachoeiras, hoje em grande parte submersas pelos lagos das grandes barragens hidrelétricas. Na região do trabalho, é possível observar-se diversas

cachoeiras, em parte submersas pelo lago da represa de Miranda, com desníveis de até 20 metros.

O padrão de drenagem predominante na zona de escarpas é o tipo treliça a sub dendrítico. O mais característico é que, em se tratando de uma formação litológica impermeável, o limite arenito superior, topo do derrame basáltico, é a zona de surgência do lençol freático, o que se traduz em uma grande quantidade de pequenos cursos d'água alimentando as grandes drenagens.

Planalto dissecado

O planalto dissecado vai desde a cota de 650 até cerca de 400 metros no curso médio do rio Paranaíba e corresponde aos grandes corredores de erosão causados pelos grandes cursos de drenagem. O substrato litológico deste domínio é o das rochas metamórficas e magmáticas neoproterozóicas, granitos, gnaisses e xistos diversos. Não existem grandes diferenças de altitudes, a não ser algumas cristas quartzíticas mais resistentes e alguns pontões graníticos com cotas superiores a 800 metros.

Os tipos morfológicos geralmente presentes neste domínio são: - colinas de topos ondulados; colinas de topos pouco ondulados e escarpas abruptas; pontões graníticos com típica exfoliação esferoidal constituindo pequenos pães de açúcar e colinas amplas de topo geralmente achatado. Localmente, ao norte de Araguari, um pequeno domínio de rochas calcárias mostra um relevo cárstico pouco evoluído.

Neste domínio, a rede de drenagem desenvolve-se segundo um padrão sub dendrítico a sub retangular, neste último caso quando existe um certo encaixamento dos cursos d'água às fraturas antigas, o que não é, todavia, muito freqüente.

Ao longo dos cursos de drenagem mais importantes encontram-se planícies de inundação (várzeas ou varjões) desenvolvidos sobre os depósitos aluvionares quaternários de areias e argilas. São, no entanto, pouco expressivos, e só aparecem mais freqüentemente no domínio do curso do rio Paranaíba.

Este tipo de relevo, outrora intensamente aproveitado para práticas agrícolas extensivas, foi transformado em área de inundação dos lagos das grandes represas hidrelétricas, e poucos são atualmente visíveis, a não ser nos períodos de grandes estiagens.

3.8.3 Geologia regional

A região do Triângulo Mineiro nunca despertou o interesse de empresas mineradoras, pois não dispõe de potencial mineral metálico que motivasse grandes projetos de prospecção e pesquisa, o que sempre foi o motivo condutor do conhecimento geológico básico. A maior parte dos trabalhos de prospecção regional centrou-se na descoberta de novos focos de diamantes, pelos quais a região sempre foi conhecida. Por este motivo, quase todo o conhecimento da geologia desta região é de cunho acadêmico, desenvolvido em teses de mestrado e doutorado, interessando os aspectos sedimentológicos, estratigráficos e paleontológicos. Não existe nenhum mapa geológico disponível em escala maior que 1:250.000, a maior parte da região sendo conhecida apenas em escala 1:1.000.000. As referências bibliográficas mais conhecidas são as de: Barbosa *et al.* (1970); Schobbenhaus *et al.* (1975); Schobbenhaus *et al.* (1984); Pedrosa Soares *et al.* (1994); Dardenne (2000) e CPRM (2003). Destacam-se ainda os trabalhos de Barbosa (1955) e Hasui (1969); este último interessando exclusivamente a sedimentação e vulcanismo mesozóicos da Bacia Sedimentar do Paraná.

O Triângulo Mineiro e suas adjacências, sul de Goiás e norte do estado de São Paulo representa a parte mais setentrional da Bacia Sedimentar do Paraná e tem um arcabouço geológico estruturado sobre rochas antigas, cujas idades variam desde o Arqueano até o Neoproterozóico. As pesquisas mais recentes, principalmente as de cunho geocronológico, têm considerado que todas as rochas precambrianas regionais são em realidade pertencentes à uma mesma bacia sedimentar que desenvolveu-se entre o Meso e o Neoproterozóico e foram profundamente deformadas durante o ciclo Brasileiro a aproximadamente 650 Ma. Esta idade foi estabelecida através de datação radiométrica U-Pb em granitos cálcio alcalinos gerados durante este ciclo.

As rochas precambrianas são relacionadas ao Grupo Araxá, uma seqüência litológica de alto a médio grau metamórfico que domina toda a região que vai desde o sul do estado de Minas Gerais até o norte de Goiás. Trata-se de uma sucessão de rochas por vezes monótona que inclui grandes espessuras de xistos diversos, quartzitos, mármore calcíticos, filitos, rochas vulcânicas básicas e ultrabásicas.

No domínio da Bacia Sedimentar do Paraná as rochas mais importantes e mais amplamente distribuídas são relacionadas ao vulcanismo basáltico do tipo toleítico continental acontecido durante o Jurássico e o Cretáceo e denominado de Formação Serra Geral. São freqüentes os arenitos intertrapeanos em camadas desde decimétricas até métricas e que representam períodos de aquiescência do vulcanismo. A Formação Botucatu, de arenitos eólicos não é bem representada, ocorrendo em espessuras importantes somente ao sul, mais para o centro da bacia. No entanto, finas e descontínuas camadas podem ser encontradas abaixo do basalto esporadicamente distribuídas na região.

Sobrepostos a estes derrames encontra-se uma seqüência psamítica fina de arenitos vermelhos continentais, por vezes representando *fácies* de transição continental-marinha ricos em carbonatos de cálcio e localmente fossilíferos (fosséis de répteis e crocodilianos) como em Peirópolis, município de Uberaba. Esta seqüência é correlata ao *Fácies* Marília da Formação Bauru, apresentando também alguns níveis ricos em cinzas vulcânicas denominados *Fácies* Uberaba.

Ainda durante o Mesozóico aconteceu na região o mais importante vulcanismo de natureza ultrabásica-alcálica-carbonatítica do Brasil com constituição de notáveis edifícios vulcânicos e diátrems como em Araxá, Tapira, Serra Negra, Salitre, Pântano, Catalão, Iporá, além de outros de menores dimensões. Este vulcanismo gerou importantes depósitos econômicos de nióbio, terras raras, titânio e apatita.

As chapadas são geralmente cobertas por depósitos, por vezes espessos, de coluviões e eluviões cascalhosos e coberturas detrito lateríticas, algumas vezes muito endurecidas (tapiocanga). Os depósitos coluvionares e eluvionares representam antigos canais de drenagem soerguidos por ocasião do retrabalhamento da superfície sulamericana.

O aluviões recentes são muito mal representados por causa do caráter juvenil da rede de drenagem.

3.8.4 Recursos minerais

A região do Triângulo Mineiro não dispõe de recursos minerais notáveis além de cascalho, areia e argila para construção civil e cerâmica vermelha. A única exceção são os diamantes pelos quais a região é mundialmente conhecida. A atividade de extração continua sendo tradicionalmente garimpeira, com instalação de balsas de dragagem e tratamento *in situ*, por meio de jígues, bicas canadenses, e apuração final em peneiras. O rio Araguari, no trecho estudado tem atividade constante de garimpagem, sendo encontradas por vezes pedras de grande valor, de cores raras, como o rosado e o amarelo canário.

A fonte principal dos diamantes dos rios continua sendo os conglomerados basais da Formação Bauru, conhecidos regionalmente pelo nome de tauá, já que fontes primárias (kimberlíticas ou lamproíticas) nunca foram encontradas.

3.8.5 Generalidades sobre ambientes fluviais

Os rios são os principais vetores de transporte dos sedimentos que se formam pela desagregação intempérica das rochas expostas nas área continentais.

Três estágios são reconhecidos na evolução de um sistema de drenagem: - juventude, maturidade e senilidade. O estágio jovem caracteriza-se por cursos d'água de grande energia erosiva e ocorre nas regiões montanhosas; o estágio maturo tem um baixo gradiente, possui amplas planícies de inundação com depósitos de acreção lateral denominados de barras de meandro; o estágio senil caracteriza-se por planícies deltáicas com um padrão de drenagem anastomosado onde não se distinguem os diversos cursos tributários.

Os diversos tipos de depósitos fluviais encontrados ao longo de um curso d'água são os seguintes (Suguio, 1980):

- *depósitos de canal*: são formados pela energia de transporte no canal do rio e incluem depósitos residuais, barras de meandros, barras de canais e depósitos de preenchimento;
- *depósitos marginais*: são formados nas margens dos canais durante as épocas de cheias e compreendem essencialmente os depósitos de diques marginais;
- *depósitos de planícies de inundação*: são constituídos por sedimentos finos depositados durante as épocas de enchentes nas lagoas marginais formadas nas planícies; os ambientes pantanosos são característicos neste tipo de ambiente e os sedimentos finos são geralmente argilas caulínicas ricas em matéria orgânica.

De posse destas considerações pode-se afirmar que a ocorrência de areia em um leito fluvial é tipicamente classificada como depósito de canal.

No aspecto da constituição de um depósito de areia citam-se fatores que o controlam, que são resumidamente os seguintes:

- existência de rochas portadoras de quartzo granulado, portanto de áreas-fonte, ao longo de uma grande extensão do curso d'água;
- intemperismo químico e físico pronunciado destas rochas, que facilitem a desagregação da areia;
- gradientes de declive adequados ao longo do curso d'água, que permitam erosão, transporte e sedimentação da areia.

3.8.6 Abastecimento de água

Grande parte do abastecimento público e industrial da região é feito através da captação de água subterrânea, em sua quase totalidade proveniente do aquífero da Formação

Bauru. Existe, entretanto, uma grande carência de estudos hidrogeológicos e mesmo geológicos abrangendo a região, já que o acervo de dados dos poços perfurados é mínimo porque muito pouco ou quase nada foi registrado pelas empresas responsáveis pelas perfurações.

O município de Uberlândia, no entanto, apesar da existência desta vasta rede de poços subterrâneos, tem no rio Uberabinha a sua principal fonte de abastecimento. A captação se situa a montante da cidade, nas proximidades da área de estudos. Apesar de tudo, como na maioria dos municípios brasileiros, o acervo de dados acerca da qualidade da água tanto superficiais quanto subterrâneas, é bastante restrito.

4. METODOLOGIA

A área de estudo, descrita na Introdução deste trabalho, foi escolhida pelas suas características de produtividade relativamente alta em relação às demais na região e localização estratégica - lago da usina hidrelétrica de Miranda - onde os problemas de impactos ambientais são mais evidenciados.

O esquema de lavra apresentado na figura 4.1 mostra que a extração de areia neste local é feita por dragas de sucção acopladas em barcaças que, uma vez cheias, dirigem-se ao porto, onde descarregam a areia sob forma de polpa composta por uma mistura de água e areia.

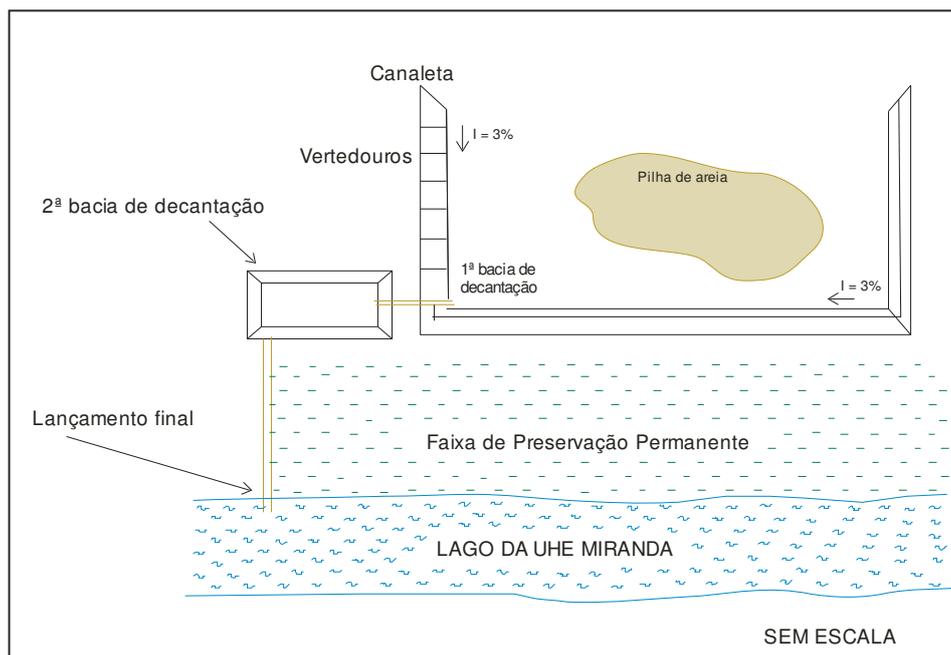


Figura 4.1 – Planta esquemática da área de estudo.

A polpa é lançada por uma tubulação, formando grandes cones de deposição (figura 4.2 - foto 1).



Figura 4.2 - foto 1 - Ponto de descarga da areia para a lavagem.

A água drenada se direciona para uma 1ª bacia de decantação que em realidade nada mais é do que um sistema de barramento com seis vertedouros dispostos em série e com uma inclinação em torno de 3%. Estes vertedouros conduzem a água para uma canaleta que por sua vez à direciona para uma 2ª bacia de decantação.

Na bacia, a água mostrada na figura 4.3 - foto 2 se estaciona e o material em suspensão, com o passar do tempo é sedimentado, permitindo então uma clarificação parcial antes que ela retorne à margem do lago por meio de uma tubulação. A clarificação por este processo é bastante dificultada, especialmente na estação seca (meses de maio a setembro) quando a produção aumenta e o tempo de sedimentação diminui, em consequência do aporte de um número maior de barcaças ao porto.



Figura 4.3 - foto 2 – Vista da 2ª bacia de decantação.

A produção diária média no período chuvoso era de 100 m³, aumentando para 150 m³ no período seco. Atualmente houve um aumento na demanda, e o que se verificou foi uma produção média de 400 m³ ao dia no período seco (meses de junho a setembro de 2003) e cerca de 300 m³ ao dia nesta última estação.

A partir do que foi exposto determinou-se uma metodologia de trabalho visando a melhoria da qualidade da água no lançamento final, com um posterior dimensionamento de futuras bacias de decantação a serem construídas nesta área e em outras de extração de areia nas mesmas condições. A metodologia a ser empregada consta essencialmente de três etapas de trabalhos de campo e três de testes de laboratório. A primeira etapa no campo foi realizada durante a estação das chuvas, no período de dezembro de 2002 a janeiro de 2003; a segunda foi realizada nos meses de julho e agosto de 2003. A terceira etapa constou de uma viagem rápida de apenas três dias ao local de trabalho para realização dos testes *in loco* com os reagentes.

Antes da descrição detalhada de cada etapa de trabalho é necessário que se façam algumas considerações importantes.

1 -

No processo de eliminação da turbidez da água tem-se uma polpa constituída pela mistura de água com areia (fração sólida). Esta fração tem constituição variada, com predomínio de minerais de quartzo, minerais argilosos e até mesmo alguma matéria orgânica proveniente do rio (ver item Resultados – Caracterização mineralógica). Foi constatado pelos exames em campo que a polpa feita no momento em que é lançada do barco tem uma constituição aproximada de 50% de água e 50% de fração sólida. Aproximada porque pode sofrer pequenas variações em função de diversos fatores.

Esta polpa perde densidade a partir do momento em que a areia é despejada no paiol de deposição no paiol de deposição, ou seja, ela chega às bacias de decantação, com uma densidade bem abaixo da inicial. Ela é constituída, em sua maioria, por partículas de granulometria média a fina (ver item Resultados – Caracterização granulométrica).

Portanto tem-se uma polpa com as seguintes características:

- densidade aproximada: $1,6 \text{ g/cm}^3$
- fração sólida: 50%
- fração líquida: 50%

2 -

A capacidade atual de cada bacia de decantação.

- *1ª bacia*: sistema de barramento, sem capacidade medida.
- *2ª bacia*: em torno de 100.000 litros de água.

Dimensões:

- *2ª bacia*: 17,0 m de comprimento
3,5 m de largura
1,0 m de profundidade ou altura
- canaleta: 50,0 m de comprimento
1,0 m de largura
0,60 m de profundidade

3 -

Convencionou-se tratar a polpa com o volume exagerado de 100.000 litros para cada descarga do barco, pelos seguintes motivos:

- no dia em que foi feito o teste, trabalhou-se com o barco maior carregado com a capacidade máxima de 50 m³ de areia, portanto tendo-se uma polpa com mesmos volumes de água e areia.
- quando o volume da polpa for menor pode-se perfeitamente adaptar as dosagens de reagentes para o volume de polpa a ser tratada.

4 -

Atualmente existem quatro barcos em operação, dois maiores e dois menores; esperando-se que a capacidade seja ampliada em pelo menos mais um barco. A capacidade de cada barco é de 50 m³ de areia nos barcos maiores e, em torno de 40 m³ nos menores. As operações de carga e descarga variam em termos de número e quantidade de areia. O tempo de carregamento varia em função de vários fatores como: distância do porto ao local de extração, profundidade do banco de areia, condições do local, capacidade da draga, experiência do operador e até mesmo condições meteorológicas. Isto tudo faz com que o número de descargas ao dia varie em torno de 2 a 3 nos barcos menores e 1 a 2 nos maiores. O tempo de descarga dos barcos menores é de cerca de 30 minutos, e dos maiores 40 minutos.

5 -

O que se verifica de imediato é que as atuais condições de lavra não são satisfatórias somente em termos ambientais mas também na logística de operações; havendo às vezes dois barcos para descarregarem ao mesmo tempo. O intervalo de chegada entre um barco e outro muitas vezes é curto, conseqüentemente diminuindo o período de decantação do material em suspensão na polpa. Portanto a água retorna ao lago praticamente nas mesmas condições em que chega à 1ª bacia.

4.1 TRABALHOS DE CAMPO

1ª Etapa

Nesta etapa os trabalhos serviram aos seguintes propósitos:

- avaliação geológica da área de pesquisa, com dimensionamento prévio do potencial de produção de areia, mapeamento de margens do lago, dos depósitos de superfície e dos bancos sedimentares de fundo; também serviu para uma caracterização preliminar do meio físico com vistas ao controle ambiental;
- coleta de amostras de água e sedimentos nos diversos pontos.

2ª Etapa

Esta segunda etapa foi realizada na estação seca e constou das seguintes atividades:

- conclusão dos trabalhos de campo para descrição da geologia regional e local;
- amostragem de água;
- visitas à minerações e diversos locais de extração de areia para verificação das condições de lavra na região, no que diz respeito principalmente aos impactos ambientais causados por esta atividade.

3ª etapa

Esta etapa constou somente de uma viagem ao local de trabalho para testar em campo os reagentes com as dosagens pré-estabelecidas durante a 2ª etapa de ensaios. Foram coletadas amostras de água para análises em apenas dois pontos— 2ª bacia de decantação e no lançamento final (mais precisamente no rio, no local em que a água chega).

4.1.1 Coleta de amostras

Foram coletadas amostras em 5 pontos. A quantidade de água coletada em cada ponto e a finalidade é descrita a seguir.

Ponto 1: lago da barragem em dois locais:

1ª etapa

1a)- a montante do lançamento final foram coletados 1 frasco contendo 200 ml de água para análise de pH e 1 frasco de 5 litros para análise de turbidez.

1b)- a jusante do lançamento final foram coletados 1 frasco contendo 200 ml de água para análise de pH e 1 frasco de 5 litros para análise de turbidez.

2ª etapa

1c)- a montante do lançamento final foram coletados 1 frasco contendo 200 ml de água para análise de pH e 1 frasco de 5 litros para análise de turbidez e demais parâmetros.

1d)- a jusante do lançamento final foram coletados 1 frasco contendo 200 ml de água para análise de pH e 1 frasco de 5 litros para análise de turbidez e demais parâmetros.

Ponto 2: 1ª bacia de decantação

1ª etapa

- coletado um frasco contendo 40 litros de água para realização de todos os ensaios laboratoriais.

Ponto 3: canaleta

1ª etapa

- coletados 40 litros de água para realização de todos os ensaios laboratoriais.

2ª etapa

- coletados 40 litros de água para realização de todos os ensaios laboratoriais.

Ponto 4: 2ª bacia de decantação

1ª etapa

- coletados 40 litros de água para realização de todos os ensaios laboratoriais.

2ª etapa

- coletados 40 litros de água para realização de todos os ensaios laboratoriais.

Ponto 5: lançamento final

1ª etapa

- coletados 1 frasco contendo 200 ml de água para análise de pH e 1 frasco de 5 litros para análise de sólidos em suspensão.

2ª etapa

- coletados 1 frasco contendo 200 ml de água para análise de pH e 1 frasco de 5 litros para análise de sólidos em suspensão e demais parâmetros.

Na 2ª etapa foram coletadas amostras para os ensaios de tratabilidade somente na canaleta e na 2ª bacia. Não se justificaria mais a realização dos ensaios em amostras de outros pontos uma vez que, já estava definido que os reagentes seriam adicionados na canaleta e direcionados para a 2ª bacia. Os trabalhos da 3ª etapa estão descritos no item 4.3.

O procedimento para a coleta das amostras seguiu o padrão estabelecido pelo laboratório de análises de água da SANEAR – Engenharia Sanitária Ltda, com as recomendações descritas a seguir:

1º – Etiquetagem dos frascos anotando os seguintes dados:

- nome do ponto de coleta;
- hora da coleta;
- condições do tempo;
- natureza da amostra (efluente ou água superficial).

2º – Procedimentos de coleta

- em cada ponto de coleta o frasco foi cheio e esvaziado três vezes com a própria amostra, após o que ele foi cheio definitivamente com o cuidado de se deixar pelo menos 3 cm de espaço vazio antes de fechá-lo.

- para as análises de DBO e DQO foi necessário coletar a amostra evitando ao máximo a formação de bolhas, e enchendo completamente o frasco.

4.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais seguiram os mesmos procedimentos para todas as etapas. A realização dos ensaios em três etapas teve como finalidade a quantificação e a verificação de uma possível variação dos parâmetros determinados, de uma estação para outra, e verificação dos resultados após a adição dos reagentes na canaleta. Todos os ensaios laboratoriais foram realizados no laboratório da SANEAR e são descritos juntamente com os equipamentos utilizados, nos próximos itens.

4.2.1 Caracterização das amostras

A caracterização inicial das amostras foi feita somente na 1ª e 2ª etapas. Na 1ª etapa foram medidos os parâmetros: pH, turbidez e sólidos em suspensão. Na 2ª etapa, além destes, foram analisados os parâmetros alumínio total, ferro total, OD, DBO e DQO. Não foram analisados outros parâmetros pelos seguintes motivos:

- a lavra de areia não sofre nenhum tipo de tratamento, a não ser a classificação do material pela granulometria, não se justificando então a realização de análises para determinação de outros parâmetros de contaminação;
- o objetivo principal deste trabalho – eliminar a turbidez da água – pode ser atingido somente com o controle destes parâmetros.

Na 1ª etapa, a caracterização das amostras teve como objetivo verificar a situação atual das águas nos diversos pontos na estação chuvosa e, principalmente, se os valores encontrados para cada parâmetro estavam de acordo com os limites estabelecidos pela legislação.

As análises na 2ª etapa tiveram os mesmos objetivos, além de se fazer ajustes mais refinados nas dosagens de reagentes, permitindo que se fossem utilizadas dosagens menores, para a realização dos testes em campo.

Análises de pH

Os valores de pH foram obtidos por medida elétrica através de potenciômetro (pHmetro). As características gerais deste aparelho são:

- marca – Micronal;
- modelo - B374;
- potência - 80W;
- voltagem - 9V (bateria);
- indicador digital;
- resolução - 0,01 para pH e 1 para mV;
- gamas de medição - pH: 0,00 – 14,00 e mV: 0 – 1999,9.

- Medição

Na medição dos valores de pH foram seguidas as etapas seguintes:

- mergulhar o eletrodo limpo na solução a ser medida;
- ajustar a temperatura com o potenciômetro, de acordo com a temperatura da solução a ser medida;
- ler o valor do pH no indicador digital.

Medida de turbidez

A turbidez foi medida com o uso de um turbidímetro, cujas características técnicas são as seguintes:

- marca – Hach;
- modelo - 2100 P;
- voltagem - 220V;
- frequência -50 – 60Hz;
- faixa de leitura - 0,01 – 1000;
- unidade de medida – UNT;
- precisão - $\pm 2\%$.

- Medição

A medição dos valores de turbidez foi feita de acordo com o procedimento:

- fazer a calibragem do aparelho;
- homogeneização da amostra agitando-a pelo menos umas 20 vezes e colocando-a em uma cubeta até a marca indicada;
- colocar a cubeta no aparelho, observando-se a posição que coincide a marca da cubeta com aquela especificada no aparelho;
- proceder a leitura no visor do aparelho.

Medida de sólidos em suspensão

Para a determinação da concentração de sólidos em suspensão foi feita a medição gravimétrica utilizando-se uma membrana de 0,45 μ m. O ensaio seguiu, resumidamente, os seguintes passos:

- pesagem da membrana seca;
- filtração da amostra através da membrana;
- secagem e dessecagem em estufa;
- pesagem da membrana impregnada com o material retirado na filtração.

Os resultados da concentração são obtidos pelo cálculo da diferença de peso entre a membrana seca no início do ensaio e a membrana impregnada com material retirado na filtração. E também leva-se em consideração o volume de água da amostra antes e depois da filtração. A unidade de medida é mg/l.

4.2.2 - Teste de sedimentabilidade

O teste de sedimentabilidade é feito através da dosagem de 1 litro de água da amostra em um recipiente de acrílico na forma de um cone graduado. Este cone é mantido na posição invertida, isto é, com a base maior voltada para cima e enchido com a água. Na escala do cone foram feitas as leituras das medidas do volume de sólidos sedimentados em diversos tempos, até que se completassem 24 horas. A partir de 30 minutos foram coletadas pequenas doses de água para a determinação do volume de sólidos em suspensão.

4.2.3 Ensaios para remoção de turbidez e sólidos em suspensão

Os ensaios foram feitos através do teste de jarros, tendo como auxiliares o turbidímetro e o aparelho de espectrometria de absorção atômica para a análise do teor de alumínio e ferro após dosagem dos reagentes. Inicialmente foi feito o teste de jarros.

Teste de jarros

O teste de jarros é um método ainda bastante empregado em estações de tratamento de água para a determinação das dosagens dos coagulantes a serem utilizados. Este tipo de ensaio determina a condição ideal para floculação de uma água, caracterizada pelo tempo e agitação necessários para tanto. Uma vez determinada a dosagem dos coagulantes, deve-se verificar qual o tempo e qual o gradiente de velocidade ótima para se flocular a água em análise. Além disso, deve-se verificar se a floculação obtida fornece uma água que, após a sedimentação, apresentará uma grande redução de turbidez.

O teste de jarros deve reproduzir, tanto quanto possível, as condições reais do projeto no que concerne o tempo de mistura e velocidade de agitação.

Nesse teste determina-se também o pH ótimo de floculação de uma água. Quando os resultados indicarem uma turbidez ideal (ou a mínima), utilizando-se de uma quantidade mínima de produtos químicos e, em tempo razoavelmente curto; pode-se dizer que ela está se passando dentro da zona de pH ótimo. Uma ótima floculação também pode ocorrer em um tempo menor do que o anterior, porém necessita de uma maior quantidade de produtos químicos. Esta floculação também ocorre dentro da zona de pH ótimo.

Uma vez efetuados os testes e escolhido entre eles um que seja satisfatório, pode-se estimar, por cálculo, as razões de injeção de cada solução nos tanques ou bacias de decantação.

O aparelho para o teste de jarros, consta fundamentalmente de um misturador com seis pás, cuja velocidade de agitação pode ser regulada para reproduzir aquela a que a água será submetida no local. O volume de água utilizado no teste foi de 1 litro.

A velocidade de agitação foi de 40 rpm, sendo imprimida uma velocidade de 105 rpm em vários testes, com o objetivo de se verificar o comportamento do reagente nesta velocidade. Os tempos de agitação variaram de 1 a 15 minutos, e de decantação, de 10 a 30 minutos.

4.3 - TESTES COM REAGENTES EM CAMPO

Os testes de campo foram feitos a partir dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais da 1ª e 2ª etapa, no mês de agosto de 2003. A partir destes ensaios decidiu-se pelas dosagens do sulfato de alumínio de 10 mg/l e 7,5 mg/l para serem testadas na área de lavra. Foram feitos então dois testes.

1º teste

Adição de sulfato de alumínio - 7,5 mg/l de Al_2SO_4

Foi utilizada uma caixa d'água com capacidade para 500 litros onde foram preparados 500 litros de solução.

- Preparo da solução

o preparo da solução foi em uma caixa d'água com capacidade para 500 litros. Para a dosagem de 7,5 mg/l foram pesados 7,5 mg para cada ml de solução ou seja, 7,5 g de sulfato de alumínio para cada litro de solução. Foram necessários então 3.750 g ou 3,750 Kg do reagente para preparo de 500 litros de solução.

Para eliminação da turbidez de 100.000 litros de água (capacidade da 2ª bacia de decantação) foram injetados 500 litros da solução na canaleta. Isto fez com que a água sofresse uma agitação no percurso até a bacia, além da agitação manual de 40 minutos

que foi feita na bacia. O tempo de agitação foi de 40 minutos pelo fato de ser manual, através de remos, não havendo portanto uma uniformidade.

Ponto 1: 2ª bacia de decantação

- coletados após duas horas e trinta minutos de sedimentação da água, 200 ml de água para análise de pH e, mais um frasco de 5 litros para análise de turbidez, sólidos em suspensão, alumínio total.

Ponto 2: lançamento final

- coletados imediatamente após o lançamento da mesma água proveniente da 2ª bacia, 200 ml de água para análise do pH, e mais 5 litros para análise de turbidez, sólidos em suspensão, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, alumínio total.

2º teste

Adição de sulfato de alumínio - 10 mg/l de Al_2SO_4

Foi utilizada uma caixa d'água com capacidade para 500 litros onde foram preparados 500 litros de solução.

- Preparo da solução

o preparo da solução foi em uma caixa d'água com capacidade para 500 litros. Para a dosagem de 10 mg/l foi pesado 10 mg para cada ml de solução ou seja, 10 g de sulfato de alumínio para cada litro de solução. Foram necessários então 5 Kg do reagente para preparo de 500 litros de solução.

Para eliminação da turbidez de 100.000 litros de água também foram injetados 500 litros da solução na canaleta. Foram seguidos os mesmos passos do 1º teste, e coletadas amostras após 2 horas e trinta minutos de decantação, nas mesmas quantidades e nos mesmos locais.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

4.4.1 Análises granulométricas

O exame visual foi feito *in loco* com diversas amostras de granulometrias variadas.

Para as análises granulométricas foram coletadas duas amostras, uma denominada de Grossa – GR e a outra de Fina - FN. A amostra FN nada mais é do que o material decantado na 2ª bacia, e possui granulometria variando de areia fina a argila. A amostra GR foi coletada na 1ª bacia de decantação, sendo proveniente da lavagem direta da areia no momento em que é descarregada do barco.

As análises granulométricas foram feitas no laboratório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ENSAIOS LABORATORIAIS

5.1.1 Caracterização das amostras

Observa-se pelos resultados das análises mostrados no Apêndice I que, tanto na primeira como na segunda etapa:

- os valores de pH atendem aos limites estabelecidos pela legislação, em todos os pontos amostrados;
- os valores determinados para turbidez e sólidos em suspensão no leito do rio estão dentro dos limites estabelecidos pela legislação em ambas as estações do ano;
- os valores encontrados para o parâmetro sólidos em suspensão, nas bacias de decantação e na canaleta, estão bem acima dos limites estabelecidos pela legislação em ambas as etapas de análises;
- os valores de OD no leito do rio são satisfatórios e assim permanecem após o lançamento;
- para a DBO os valores encontrados estão satisfatórios tanto no rio quanto no lançamento após a lavagem da areia;
- os valores encontrados para as análises de teor de alumínio e ferro na 2ª bacia de decantação estão dentro dos limites permitidos. Esta análise também foi feita com o intuito de se comparar o teor destes elementos antes e depois da adição dos reagentes.

Diante do exposto acima se pode realmente constatar que a situação no que diz respeito ao parâmetro “sólidos em suspensão”, é no mínimo inaceitável não havendo nenhuma variação no decorrer do ano.

5.1.2 Teste de sedimentação

Os resultados do teste de sedimentação são mostrados no Apêndice II. A conclusão imediata a partir dos resultados acima é de que os sólidos em suspensão permanecem acima do limite estabelecido, mesmo após 24 horas de sedimentação, tanto na estação seca quanto na cheia, inclusive com valores bem próximos. Isto vem corroborar a idéia de que sem o auxílio de substâncias coagulantes não será possível a sedimentação da matéria fina em suspensão.

5.1.3 Ensaios para remoção de turbidez e sólidos em suspensão

Os resultados de todos os ensaios estão relacionados no Apêndice III. São apresentadas a seguir as conclusões destes ensaios na 1ª e 2ª etapas, quando são utilizados cada um dos reagentes.

a) Canaleta

Ensaios utilizando o sulfato de alumínio

- Os ensaios de números 6 ao 15 na 1ª etapa mostraram que o uso do sulfato de alumínio somado a um polímero, não se justifica, pois apesar de apresentar bons resultados de turbidez, o ensaio nº 15 mostra que, com uma agitação inicial mais intensa, o uso somente do sulfato de alumínio atenderia aos propósitos, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.
- Na 2ª etapa procurou-se refinar o processo utilizando dosagens menores do reagente, com uma agitação maior, em tempo também maior.
- A conclusão imediata é de que com a agitação maior os resultados são muito melhores se comparados com os da 1ª etapa.
- Nos testes com agitação maior pode-se concluir também que a dosagem adequada do reagente para teste em campo estaria em torno de 10 a no mínimo 5 mg/l.

Ensaio utilizando cal e sulfato de alumínio

- Os resultados apresentados na 1ª e 2ª etapa de testes mostraram que o uso da cal não se justifica, pois necessitaria de uma dosagem maior do sulfato de alumínio para que fossem atingidos valores ótimos para a turbidez. Além de dificultar a operação nas bacias de decantação, com o uso de dois reagentes, e tornar o processo mais caro.

Ensaio utilizando cloreto férrico

- Os resultados encontrados para todos os ensaios nas duas etapas mostraram que somente com o uso de uma dosagem um pouco maior que a do sulfato de alumínio se poderia obter valores ótimos para a turbidez, porém o pH se torna mais ácido.

b) 2ª bacia de decantação

Ensaio utilizando sulfato de alumínio

- Os resultados permitem concluir que o sulfato de alumínio na dosagem de 10 mg/l poderia ser o ideal, variando de acordo com o tempo de agitação, da mesma forma que ocorreu com a amostra proveniente da canaleta.

Ensaio utilizando cal e sulfato de alumínio

- Os resultados tanto na 1ª como na 2ª etapa mostram que o uso da cal como reagente em conjunto com o sulfato de alumínio também não se justifica.

Ensaio utilizando cloreto férrico

- Os resultados obtidos após o uso do cloreto férrico se mantiveram dentro dos limites pré-estabelecidos, porém na maioria das vezes o pH se torna mais ácido.

5.1.4 Caracterização das amostras coletadas após injeção dos reagentes na canaleta

- As amostras coletadas na 2ª bacia de decantação e no lançamento final após a injeção dos reagentes na canaleta, mostram que a dosagem de 10 mg/l de sulfato de

alumínio é a ideal. Apesar da dosagem de 7,5 mg/l também apresentar a turbidez final dentro dos limites pré-estabelecidos, este resultado se aproxima muito do limite máximo permitido para este parâmetro.

- As análises feitas para a dosagem do alumínio total, pH, OD e DBO após a injeção dos reagentes, atendem perfeitamente aos limites estabelecidos.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

5.2.1 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi feita visualmente e com o uso de lupa binocular.

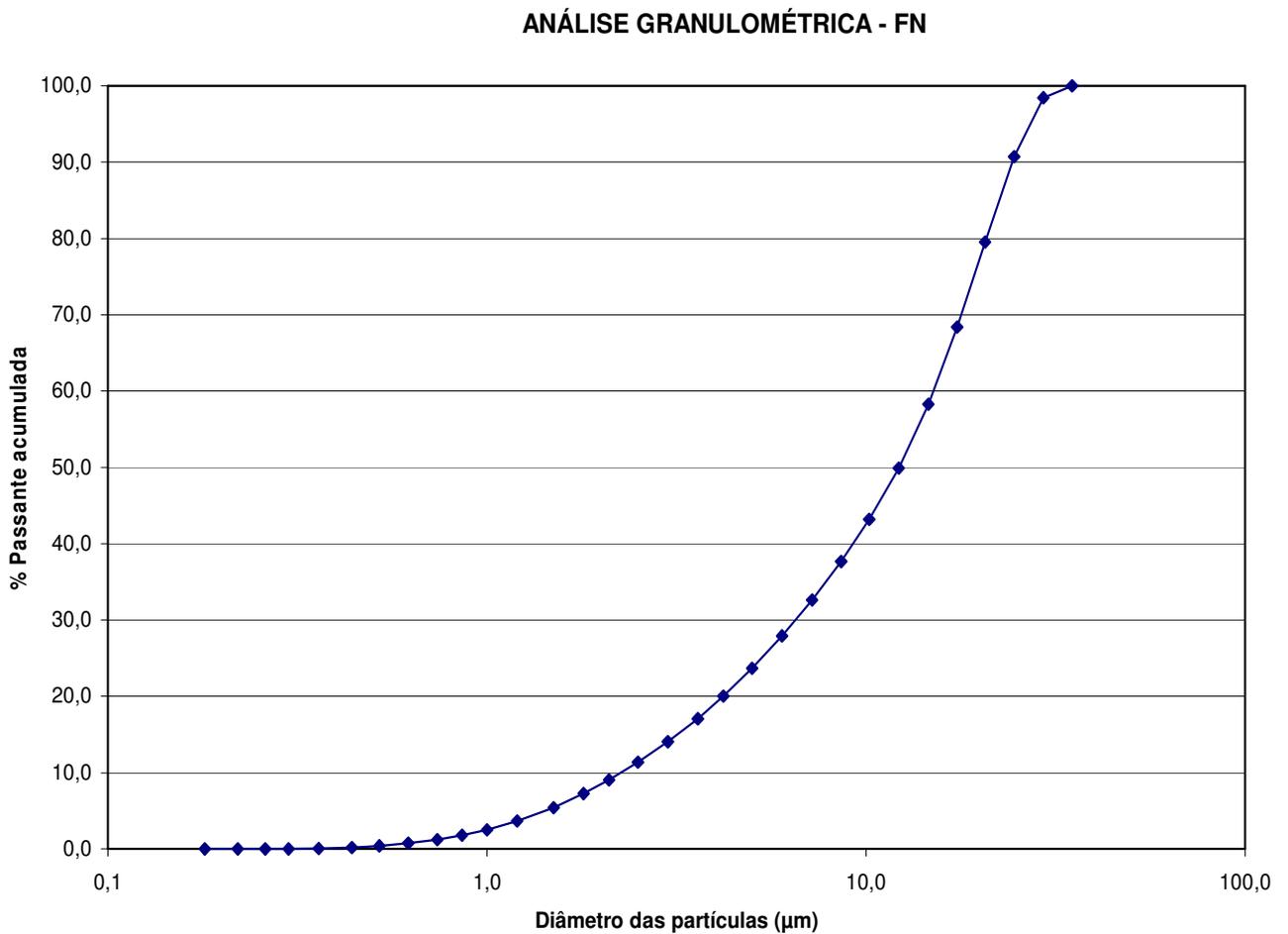
Foi identificado um material composto por mais de 95% de quartzo, sob a forma de grãos com grau de arredondamento médio a alto e geralmente de esfericidade baixa. O feldspato é relativamente raro, ocorrem alguns minerais escuros (provavelmente óxidos de ferro e titânio), e por vezes uma maior quantidade de muscovita, sobretudo nas frações de granulometria mais grosseira, o que faz supor áreas-fonte relativamente próximas, pois a mica tende à uma diminuição mais rigorosa, diretamente proporcional à extensão do percurso fluvial. É interessante observar que em amostras de diversos pontos do rio esta quantidade de muscovita é constante, e é mais comum somente nas frações caracterizadas como de areia grossa. A cor dominante do material é amarelo claro a creme acinzentado.

5.2.2 Caracterização granulométrica

O gráfico V.1 mostra os resultados das análises granulométricas do material coletado na 2ª bacia de decantação, de granulometria mais fina.

Observando-se a curva granulométrica da fração passante, classifica-se o material grosseiro (cerca de 10% do material entre 2 mm e 8 mm) como sendo da granulometria de cascalho médio a fino; o restante do material, cerca de 90% está compreendido na granulometria variando entre areia grossa a fina (2 mm a 0,08 mm).

Gráfico V.1 – Resultado da análise granulométrica da amostra FN.



A fração fina está toda situada abaixo de 0,05 mm que corresponde à faixa de silte e argila, contando-se 90% de fração silte e somente 10% do material situando-se na fração argila. A curva granulométrica mostra um bom selecionamento somente na fração mais grosseira entre 0,05 e 0,01mm, para os demais intervalos a dispersão é mais visível. O percentual do material nas diversas faixas granulométricas finas é o seguinte:

- | | |
|---|------------------|
| - partículas finas entre 0,05 e 0,01 mm | 45% do material; |
| - partículas ultrafinas entre 0,01 e 0,001 mm | 52% do material; |
| - colóides para partículas abaixo de 0,001 mm | 3% do material. |

Este resultado vem mais uma vez corroborar a idéia de que a eliminação da turbidez por processo meramente gravitacional não é possível.

5.3 GEOLOGIA DA ÁREA DE TRABALHO

5.3.1 Geologia local

A área estudada é um canal de drenagem fluvial muito importante e que drena uma vasta área, desde a Serra da Canastra até sua embocadura com o Rio Paranaíba. A constituição de seus sedimentos fluviais sofre portanto a contribuição de áreas-fonte das mais diversas ao longo de todo o seu trecho, principalmente dos metassedimentos do Grupo Araxá, e de rochas granitóides. Não é de se desprezar também a contribuição psamítica proveniente dos arenitos da Formação Bauru, que são muito facilmente erodíveis e transportados durante a época das chuvas. A retração da área das chapadas constituídas por estes arenitos é bastante pronunciada, principalmente se se leva em conta a atuação antrópica, com desmatamentos e práticas agrícolas pouco cuidadosas com relação à perda de solo.

De um modo geral pode-se destacar as seguintes unidades litológicas em um plano geral, porém restritas à área abrangida pelo trecho de rio estudado:

- unidades precambrianas – rochas do Grupo Araxá e rochas intrusivas graníticas;
- unidades sedimentares mesozóicas – basaltos e arenitos do Grupo São Bento e arenitos da Formação Bauru;

- unidades cenozóicas – coberturas detrito lateríticas coluvionares e eluvionares, depósitos aluvionares recentes.

Unidades precambrianas

Na área estas unidades ocorrem somente em um pequeno trecho a montante do porto de areia, no local denominado de “Garimpinho”, e a jusante, no local conhecido como Pau Furado.

No primeiro local, em uma espécie de janela de embasamento sob a cobertura basáltica, ocorrem rochas xistosas e quartzíticas um pouco gnaissificadas em afloramentos muito intemperizados, onde se vê geralmente um saprólito de cor vermelha amarronzada.

No segundo ponto de ocorrência também ocorrem xistos de composição biotítica e muscovítica com minerais de metamorfismo (cianita e estauroлита). Neste último local um grande corpo de granito leucocrático de granulação grosseira corta os metassedimentos; porém encontra-se em franco estado de intemperismo, com geração de um saprólito de cor clara, rico em material caulínico e quartzo granular. Todas estas rochas são indubitavelmente pertencentes ao Grupo Araxá.

Unidades mesozóicas

A maior parte do trecho do rio onde se situa o empreendimento está sobre os basaltos da Formação Serra Geral que ocorrem desde a cota de mais ou menos 850 metros, Considerando que o rio corre mais ou menos na cota de 650 metros, cerca 200 metros de espessura de basalto podem ser estimados, em pelo menos 3 derrames consecutivos. Estes derrames são visualizados por quebras significativas na continuidade dos relevo, configurando patamares, onde por vezes existem finos leitos de arenitos intertrapeanos, e níveis de amígdalas preenchidas por ágata, quartzo e minerais secundários. Na localidade de Pau Furado, dois níveis destes arenitos foram mapeados.

O basalto é, via de regra, pouco intemperizado com nítida exfoliação esferoidal o que produz blocos arredondados de dimensões geralmente centimétricas. A exfoliação é facilitada por causa da sempre presente disjunção poliédrica nos afloramentos.

Um aspecto comum nos afloramentos basálticos é a ocorrência de camadas espessas de material com alteração hidrotermal. Este fenômeno, pós vulcânico é produzido por circulação de água quente e gera argilas muito plásticas algumas vezes de composição nontronítica.

Os arenitos da Formação Bauru (*Fácies Marília*) não são bem representados na região, não sendo encontrado nenhum afloramento, porém eles aparecem em furos de sondagem para água, em espessura nunca inferior a 50 metros. Trata-se de um material semiconsolidado de cores variegadas por oxidação, matriz geralmente muito argilosa e níveis cascalhosos que representam conglomerado basal. A erosão destes arenitos é, em parte, responsável pela recarga de areia nos leitos dos rios.

Unidades cenozóicas

A mais importante é a unidade de idade terciária-quadernária representada por sedimentos coluvionares e coberturas detrito lateríticas.

Os sedimentos coluvionares são, sem dúvida, os mais importantes, pois eles cobrem invariavelmente todas as chapadas da região, não apenas como cobertura, mas também transgredindo sobre o contato do arenito superior com o basalto, configurando extensas rampas. Por vezes eles são também encontrados no meio das chapadas formando canais sinuosos onde o material areno cascalhoso constituinte pode ter mais de 15 metros de espessura. Estes canais são facilmente interpretáveis como antigos leitos fluviais que não foram esgotados nem exumados durante o processo de soerguimento regional. Este fato materializa o retrabalhamento da superfície sulamericana e o reajustamento da rede de drenagem a partir do fim do Terciário.

Estes depósitos coluvionares são constituídos geralmente por uma grande quantidade de seixos centimétricos de alto grau de arredondamento, o que denota grande transporte

fluvial, Estes seixos são, em grande parte provenientes do conglomerado basal da Formação Bauru, o que tem provocado erros de interpretação sobre seu correto posicionamento estratigráfico. Os depósitos podem ter espessura excedendo 15 metros, geralmente métricos, de material incoeso, cores entre o vermelho e o vermelho escuro e matriz laterítica. A contribuição destes depósitos para a recarga em areia dos cursos de drenagem é patente, dado suas características, tais quais: - falta de coesão, grande quantidade de seixos, matriz geralmente arenosa e forma de distribuição no relevo, geralmente nas encostas mais íngremes e nas rampas coluvionares.

Em alguns locais onde os depósitos são classificados como eluviais a quantidade de seixos é bem menos e de angulosidade muito maior. O material eluvionar é geralmente mais coeso podendo ser encontrado em alguns locais uma carapaça endurecida de canga laterítica constituída por pisolitos centimétricos formados por precipitação de ferro coloidal em superfície (tapiocanga, como conhecido regionalmente).

Os depósitos aluvionares são pouco expressivos, pois maior parte deles ficou submersa quando do enchimento dos lagos da represa hidrelétrica de Miranda.

6. CONCLUSÕES

1- A partir dos resultados obtidos com os testes em laboratório e no local, foi possível se concluir o descrito nos próximos itens.

1.1) O sulfato de alumínio é o reagente mais adequado para o caso estudado, por suas características próprias:

- a) *fácil manuseio*: neste tipo de lavra é muito importante, pois a mão-de-obra não é especializada e, em alguns casos, não se tem nem mesmo energia elétrica nos locais onde a lavra é feita.
- b) *preço acessível*: a areia não é um produto de alto valor agregado, portanto o preço do reagente no mercado, que é de baixo custo, não irá onerar em muito o preço final do m³ de areia.

1.2) A dosagem ideal do sulfato de alumínio é:

$$10 \text{ mg/l} - (\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O} - 2\%)$$

- a) esta dosagem é a mais indicada pelo fato de que neste tipo de lavra não se tem um controle rigoroso da quantidade de areia que é extraída portanto, também não se tem também do volume de polpa gerado. O cálculo é feito a partir da capacidade de cada barco.
- b) Portanto, deve-se trabalhar com uma dosagem que apresentou resultados que não se aproximaram tanto dos limites de tolerância.

1.3) As condições atuais de lavra na área de estudo não estão adequadas ao processo no que diz respeito ao seguinte:

- a) o volume de areia extraída e a quantidade de barcos que aportam é muito alto para uma área que conta apenas com duas bacias de decantação de dimensões relativamente pequenas.
- b) é necessário a construção de pelo menos mais duas bacias de decantação com as mesmas dimensões da 2ª bacia, tendo-se três bacias ligadas em série. Estas bacias serão ligadas uma à outra através de um vertedouro ou comporta que será aberta

assim que um barco aporte, fazendo com que a água saia para a bacia seguinte e assim sucessivamente até a última bacia. A partir daí ela retornará ao lago após 2 horas e trinta minutos. Obrigatoriamente a agitação manual será feita na primeira bacia.

1.4) No material decantado, conforme análises granulométricas realizadas, predominam as frações granulométricas argila e silte.

2 - A partir dos estudos e trabalhos de campo realizados na região foi possível construir uma coluna geológica para a região do Triângulo Mineiro, modificada a partir de trabalhos anteriores e da aquisição de novos dados (Figura 6.1).

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	- aluviões recentes constituídos por cascalho, areia e argila
	TERCIÁRIO-QUATÉRNÁRIO	- coberturas detrito lateríticas e canga (tapiocanga) - depósitos cascalhosos de coluviões
<i>VULCANISMO ULTRABÁSICO-ALCALINO-CARBONATÍTICO</i>		
MESOZÓICO	CRETÁCEO	<p style="text-align: center;"><u>Formação Bauru</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Fácies Marília</i>: lentes calcárias, arenitos vermelhos argilosos, arenitos calcíferos e conglomerados • <i>Fácies Uberaba</i>: tufo vulcânicos
	JURÁSSICO-CRETÁCEO	<p style="text-align: center;"><u>Grupo São Bento</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Formação Serra Geral: derrames basálticos, arenito intertrapeano • Formação Botucatu: arenitos eólicos
<i>GRANITOGÊNESE CÁLCIO ALCALINA</i>		
NEO PROTEROZÓICO	<p style="text-align: center;"><u>Grupo Araxá</u></p> <p>Gnaisses, xistos diversos a cianita, granada, estauroлита e sillimanita, lentes quartzíticas, lentes de calcários calcíticos e mármore, filitos, rochas metabásicas e metaultrabásicas</p>	

Figura 6.1 - Coluna estratigráfica proposta para a região do Triângulo Mineiro.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

A relevância deste trabalho é mostrar que em várias bacias hidrográficas de grandes proporções como é o caso estudado, a atividade minerária produz impactos ambientais mínimos em contraposição à outras atividades industriais e agrícolas. Nestas bacias a mineração quase sempre é uma atividade que gera impactos localizados e, neste tipo de lavra mais especificamente, os impactos podem ser amplamente minimizados e a água utilizada no processo pode ser devolvida ao leito em condições que atendam à legislação ambiental vigente. Além do mais, é relevante mostrar que esta atividade pode ser desenvolvida de maneira que gere mais impactos positivos do que negativos.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalho futuro o estudo do emprego do material decantado nas bacias. De acordo com o resultado das análises granulométricas este material poderia ser empregado como agregado na indústria dado o alto teor de minerais de quartzo que foi verificado. Para isto será necessário o estudo químico mais aprofundado. Com isto o problema gerado para a disposição deste material estaria resolvido.

Sugere-se ainda o estudo de outros tipos de reagentes para eliminação da turbidez pois, em locais diferentes, com por exemplo águas com pH mais ácido e bacias hidrográficas muito poluídas, este reagente poderia não ser o mais adequado.

Por fim poderia ser feito também o estudo do uso de algum tipo de filtro nestas bacias que poderia otimizar o processo, diminuindo o tempo de decantação, fator importante neste tipo de lavra, ou diminuir a dosagem do reagente.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. C. 1982. Influência dos Íons de Alumínio e Caulinta na Flotação Catiônica de Quartzo e Hematita. Tese de Mestrado, CPGEM-UFMG.

ARAÚJO, A. C. & GALERY, R. 1987. Técnicas para Analisar Dispersão/Agregação. XII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Rio de Janeiro.

AWWA-AMERICAN WORKS WATER ASSOCIATION. 1975. Control de Calidad y Tratamiento del agua, trad. Inst. de Est. de Administracion, Madrid, 1975: 734 p.

AZEVEDO NETO, J.M. de. 1974. Técnica de abastecimento e tratamento de água. *in* CETESB, São Paulo, vol II: 589-1000.

BARBOSA, O., BRAUN, O. P. G., CARTNER-DYER, R., CUNHA, C. A B. R. 1970. Geologia da Região do Triângulo Mineiro, DFPM, DNPM, Bol. 136: 140 p.

CASES, J. M. 1968. Les Phénomènes Phisico-Chemique a L'Interface. Application au Procedé de la Flotation. Faculté des Science de L'Université de Nancy, 119 p.

COELHO, E. M. 1984. Separação de Minerais de Rochas Fosfáticas e de Minérios de Ferro por Flotação e Agregação Seletiva. Tese de Concurso para Professor Titular do Departamento de Engenharia Química. Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG; 232 p.

COELHO, E. M., VALADÃO, G. E. S., BRANDÃO, P. R. G. & GALERY, R. 1993. Curso: Floculação seletiva – Teoria e Prática. Convênio: Departamento de Engenharia de Minas/UFMG – Fundação Christiano Ottoni – Companhia Vale do Rio Doce. Belo Horizonte.

DARDENNE, M. A. 2000. The Brasília Fold Belt. Tectonic Evolution of South America. 31th IGC, Rio de Janeiro: 231-263.

FEAM-FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2000 – Qualidade das Águas Superficiais do Estado de Minas Gerais em 2000 – Projeto Águas de Minas. Monitoramento das Águas Superficiais de Minas Gerais. Belo Horizonte – Outubro de 2001, FEAM / IGAM.(Inclui 1 mapa temático).

GALERY, R. 1985. Influência do Estado de Dispersão na Flutuabilidade do Sistema Willemita/Dolomita. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte. Escola de Engenharia da UFMG, 92 p.

HASUI, Y. 1969. O Cretáceo do Oeste Mineiro. Soc. Bras. Geol. São Paulo: 18 (1): p. 39-56.

KING, L.C. 1956. Geomorfologia do Brasil Oriental. Ver. Bras. Geografia, 18(2): p. 147-265.

LEJA, J. 1983. Surface Chemistry of Froth Flotaion. Plenum Press, New York, 758 p.

LINS, F. F. & ADAMIAN, R. 2000. Minerais Coloidais, Teoria DLVO Estendida e Forças estruturais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, (Série Tecnologia Mineral,78), 29 p.

MARTINS-NETO, M.A.; ALKMIM, F.F. 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. *In*: Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais, SBG/MG – Belo Horizonte: p. 34-54.

PARKS, G. A. 1985. Adsorption in the Marine Enviroment. *In*: SKIRROW, G.; RILEY, J. P. editores, Chemical Oceanography, 2^a ed., New York, Academic Press, Vol. 1: p. 241 – 308.

PEARSE, M. J.; BARNETT, J. 1980. Chemical Treatments for Thickening and Filtration. Filtration & Separation. Sept./Oct. p. 460 – 470.

PEDROSA SOARES, A.C. 1994. Coordenação da Nota Explicativa do Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais em escala 1: 1.000.000. COMIG, Belo Horizonte.

PURCHAS, D. B. 1977. Solid Liquid Separation Equipment Scale-up. Upland Press Ltd. Croydon, England.

RABOCKAI, T. 1979. Físico-Química de Superfícies. Secretaria Geral da OEA, 128 p.

RIDDICK, T. M. 1969. Control of Emulsion Stability Through Zeta Potential. Presented at the Annual Seminar of the Society of Cosmetics Chemists, St. Louis, Missouri, 19 p.

SCHOBENHAUS, C., OGUINO, K., RIBEIRO, C.L. OLIVA, L.A., TAKANOHASHI, J.T. 1975. Carta Geológica do Brasil ao milionésimo, Folha Goiânia (SE-22). DNPM, Brasília: 85 p, 1 mapa.

SCHOBENHAUS, C., CAMPOS, D.A., DERZE, G.R., ASMUS, H.E. 1984. Geologia do Brasil. Texto Explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente, incluindo depósitos minerais; escala 1: 2.500.000. DNPM, Brasília: 501 p, 1 mapa.

SGARBI, G.N.C.; SGARBI, P.B.A.; CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A.; PENHA, U.C. 2001. Bacia Sanfranciscana: o registro fanerozóico da bacia do São Francisco. *in*: Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais, SBG/MG – Belo Horizonte: p. 93 – 138.

SOMASUNDARAN, P. 1980. Principles of Flocculation, Dispersion, and Selective Flocculation, *in*: Somasundaran, P. Fine Particle Processing, vol.2. New York. p. 946 - 976.

STANDARD METHODS: for examination of water and wastewater. 19^a ed, Baltimore, APHA, 1992.

SUGUIO, K. 1980. Rochas sedimentares, propriedades, gênese, importância econômica. Editora Edgard Blücher, São Paulo: 500 p.

PATNAIK, PRADIOT 2001. Propriedades nocivas das substâncias tóxicas - Guia Geral – Vol. 1 – 1ª ed. Em português – Trad. Ricardo Maurício Soares Baptista – BH: Ergo , 202 – 569 p.

10 APÊNDICES

APÊNDICE IV

Teste em campo -

Caracterização das amostras coletadas após a injeção dos reagentes na canaleta

a) Rio Araguari – Lago da UHE Miranda,

- *montante do lançamento*

Parâmetro	Unidade	Resultado
1ª etapa		
pH	-	7,76
Turbidez	UNT	3,78
2ª etapa		
pH	-	7,03
Sólidos em suspensão	mg/l	< 0,50
OD	mg/l	8,37
DBO	mg/l	1,30

- *jusante do lançamento*

Parâmetro	Unidade	Resultado
1ª etapa		
pH	-	7,39
Turbidez	UNT	4,61
2ª etapa		
pH	-	6,93
Sólidos em suspensão	mg/l	0,80
OD	mg/l	8,90
DBO	mg/l	2,29

b) canaleta

Parâmetro	Unidade	Resultado
1ª etapa		
pH	-	7,16
Sólidos em suspensão	UNT	2198,00
2ª etapa		
pH	-	6,89
Sólidos em suspensão	mg/l	494,00

c) 1ª bacia de decantação

Parâmetro	Unidade	Resultado
1ª etapa		
pH	-	7,03
Sólidos em suspensão	mg/l	2282,00

d) 2ª bacia de decantação

Parâmetro	Unidade	Resultado
1ª etapa		
pH	-	6,98
Sólidos em suspensão	mg/L	917,50
2ª etapa		
pH	-	6,63
Sólidos em suspensão	mg/l	506,00
Alumínio total	mg/l	30,22
Ferro total	mg/l	63,50

e) lançamento final

Parâmetro	Unidade	Resultado
1ª etapa		
pH	-	6,65
Sólidos em suspensão	mg/l	868,00
2ª etapa		
pH	-	6,82
Sólidos em suspensão	mg/l	634,00
OD	mg/l	8,31
DBO	mg/l	2,64

Os testes de sedimentação foram realizados nas amostras provenientes da canaleta e das bacias de decantação. Os resultados são mostrados a seguir.

a) canaleta

TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO (minutos)	SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS (ml/l)	SÓLIDOS EM SUSPENSÃO (mg/l)
1ª etapa		
0	< 0,10	-
5	0,90	-
10	1,40	-
15	1,90	-
20	2,00	-
25	2,50	-
30	2,70	508,00
60	3,00	454,00
120	3,50	424,00
24 horas	4,00	390,00
2ª etapa		
0	< 0,10	-
5	0,50	-
10	0,80	-
15	1,00	-
20	1,10	-
25	1,20	-
30	1,30	286,00
60	1,50	278,00
120	1,50	220,00
24 horas	1,80	180,00

b) 1ª bacia de decantação

TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO (minutos)	SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS (ml/l)	SÓLIDOS EM SUSPENSÃO (mg/l)
1ª etapa		
0	< 0,10	-
5	2,20	-
10	3,00	-
15	3,50	-
20	3,80	-
25	4,00	-
30	4,25	480,00
60	5,10	424,00
120	5,30	360,00
24 horas	6,00	330,00

c) 2ª bacia de decantação

TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO (minutos)	SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS (ml/l)	SÓLIDOS EM SUSPENSÃO (mg/l)
1ª etapa		
0	< 0,10	-
5	0,20	-
10	0,40	-
15	0,60	-
20	0,60	-
25	0,70	-
30	0,70	298,00
60	1,00	228,00
120	1,20	216,00
24 horas	1,80	206,00
2ª etapa		
0	< 0,10	-
5	0,20	-

10	0,40	-
15	0,50	-
20	0,60	-
25	0,70	-
30	0,80	276,00
60	0,80	256,00
120	0,80	214,00
24 horas	0,80	180,00

1ª ETAPA

a) Canaleta

a.1) Ensaio utilizando o sulfato de alumínio

Ensaio n° 01

Adição de sulfato de alumínio até pH 7,07	5,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	1080,00
20	1060,00
30	1050,00

Ensaio n° 02

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,88	10,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	960,00
20	950,00
30	930,00

Ensaio n° 03

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,54	20,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	124,33
20	82,23
30	80,87

Ensaio n °04

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,04	30,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	32,80
20	20,17
30	14,53
Sólidos em suspensão após 30 minutos de decantação:	
11,20 mg/l	

Ensaio n °05

Adição de sulfato de alumínio até pH 5,69	40,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	24,20
20	11,37
30	7,98
Sólidos em suspensão após 30 minutos de decantação:	
7,60 mg/l	

Ensaio n °06

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	27,37
20	18,03
30	9,24
Após 30 minutos de decantação:	
Volume de lodo gerado	28,00 ml/l
Sólidos em suspensão	5,71 mg/l
Alumínio total	< 0,10 mg/l

Ensaio n °07

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ .18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	5 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	33,87
20	17,76
30	15,30
Após 30 minutos de decantação:	
Sólidos em suspensão	8,00 mg/l

Ensaio n °08

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ .18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	3 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	43,17
20	29,90
30	22,93
Após 30 minutos de decantação:	
Sólidos em suspensão	9,50 mg/l

Ensaio n °09

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,04	30,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ .18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	3 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	36,17
20	22,93
30	18,70

Ensaio n ° 10

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ .18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	2 minutos (40 rpm)
Adição de polímero Adesol G9047	0,20 ml/l – (0,10%)
Tempo de agitação	1 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	80,00
20	70,00
30	50,00

Ensaio n ° 11

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ .18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	2 minutos (40 rpm)
Adição de polímero Adesol G9047	0,50 ml/l – (0,10%)
Tempo de agitação	1 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	50,00
20	40,00
30	35,00

Ensaio n ° 12

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ .18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	2 minutos (40 rpm)
Adição de polímero Adesol G9047	1,00 ml/l – (0,10%)
Tempo de agitação	1 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	48,00
20	40,00
30	34,00

Ensaio n ° 13

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	2 minutos (105 rpm)
Adição de polímero Adesol G997	0,50 ml/l – (0,10%)
Tempo de agitação	1 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	36,00
20	22,00
30	20,00

Ensaio n ° 14

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Adição de polímero Adesol G997	0,50 ml/l – (0,10%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	1 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	10,00
20	8,00
30	5,00

Ensaio n ° 15

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	2,00
20	1,50
30	1,00

a.2) Ensaio utilizando cal e sulfato de alumínio

Ensaio n° 01

Adição de cal até pH 10,07	30,00 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio até pH 7,42	75,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	13,38
20	8,92
30	4,98

Ensaio n° 02

Adição de cal até pH 10,07	30,00 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio até pH 7,21	87,50 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	14,43
20	7,61
30	3,30

Ensaio n° 03

Adição de cal até pH 10,07	30,00 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio até pH 6,99	100,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	9,39
20	5,77
30	5,41
Após 30 minutos de decantação:	
Sólidos em suspensão	4,40 mg/l

a.3) Ensaio utilizando o cloreto férrico

Ensaio n°01

Adição de cloreto férrico até pH 7,41	5,00 mg/l – (FeCl ₃ – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	608,33
20	605,33
30	590,67

Ensaio n°02

Adição de cloreto férrico até pH 6,93	10,00 mg/l – (FeCl ₃ – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	31,43
20	22,17
30	18,90

Ensaio n°03

Adição de cloreto férrico até pH 6,25	12,50 mg/l – (FeCl ₃ – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	28,60
20	23,67
30	20,53
Após 30 minutos de decantação:	
Sólidos em suspensão	10,00 mg/l
Ferro total	<0,05 mg/l

Ensaio n °04

Adição de cloreto férrico até pH 5,22	15,00 mg/l – (FeCl ₃ – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	20,00
20	8,30
30	7,73

b) 2ª bacia de decantação

b.1) Ensaios utilizando o sulfato de alumínio

Ensaio n °01

Adição de sulfato de alumínio até pH 7,02	5,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	1213,30
20	1086,67
30	1076,67

Ensaio n °02

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,88	10,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	967,00
20	867,67
30	834,33

Ensaio n °03

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,55	20,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	54,00
20	39,70
30	31,00

Ensaio n °04

Adição de sulfato de alumínio até pH 5,58	30,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	32,90
20	21,70
30	12,90

Ensaio n °05

Adição de sulfato de alumínio até pH 4,80	40,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	32,37
20	20,53
30	12,73
Após 30 minutos de decantação:	
Volume de lodo gerado	7,73 mg/l

Ensaio n °06

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,15	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	26,37
20	18,06
30	9,02
Após 30 minutos de decantação:	
Volume de lodo gerado	30,00 ml/l

Ensaio n°07

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,15	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	5 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	32,60
20	21,50
30	16,88

Ensaio n°08

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,15	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	3 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	46,07
20	28,00
30	22,10

Ensaio n°09

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,71	25,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	3,00
20	2,80
30	2,60
Após 30 minutos de decantação:	
Sólidos em suspensão	1,50 mg/l

b.2) Ensaio utilizando cal e sulfato de alumínio

Ensaio n ° 01

Adição de cal até pH 10,07	20,00 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio até pH 7,62	30,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	215,67
20	201,67
30	194,67

Ensaio n ° 02

Adição de cal até pH 10,07	20,00 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio até pH 7,04	40,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	10 minuto (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	35,40
20	30,17
30	26,47

b.3) Ensaio utilizando cloreto férrico

Ensaio n° 01

Adição de cloreto férrico até pH 6,66	10,00 mg/l – (FeCl ₃ – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	22,10
20	13,30
30	7,80

Ensaio n° 02

Adição de cloreto férrico até pH 5,64	12,50 mg/l – (FeCl ₃ – 2%)
Tempo de agitação	10 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	16,93
20	13,83
30	6,46
Após 30 minutos de decantação:	
Sólidos em suspensão	8,00 mg/l
Ferro total	<0,05 mg/l

2^A ETAPA

a) Canaleta

a.1) Ensaio utilizando o sulfato de alumínio

Ensaio n° 01

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,25	15,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	58,67
20	35,17
30	15,93

Ensaio n° 02

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,25	10,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	62,27
20	39,47
30	16,20

Ensaio n° 03

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,18	5,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)
Tempo de agitação	10 minutos (20 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
30	214,67

Ensaio n°04

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,10	5,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)
Tempo de agitação	10 minutos (20 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
30	210,50
60	203,39
120	198,70

Ensaio n°05

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,10	7,50 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)
Tempo de agitação	10 minutos (20 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
30	159,32
120	98,12

Volume de lodo gerado	ml/l	8,00
-----------------------	------	------

Parâmetro	Unidade	Resultado
Sólidos em suspensão	mg/l	8,80
OD	mg/l	8,20
DBO	mg/l	1,38
DQO	mg/l	22,30
Alumínio total	mg/l	< 0,10

a.2) Ensaio utilizando cal e sulfato de alumínio

Ensaio n°01

Adição de cal	12,50 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio	45,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	42,00
20	28,33
30	20,00

Ensaio n°02

Adição de cal	12,50 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio	35,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	10,07
20	6,43
30	4,53

Volume de lodo gerado	ml/l	9,00
-----------------------	------	------

Parâmetro	Unidade	Resultado
Sólidos em suspensão	mg/l	8,00
OD	mg/l	8,36
DBO	mg/l	0,74
DQO	mg/l	< 1,00
Alumínio total	mg/l	< 0,10

a.3) Ensaio utilizando cloreto férrico

Ensaio n ° 01

Adição de cloreto férrico até pH 6,50	5,00 mg/l – (FeCl ₃ – 2,0%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
30	161,33

Ensaio n ° 02

Adição de cloreto férrico até pH 6,07	15,00 mg/l – (FeCl ₃ – 2,0%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	50,55
20	48,33

Parâmetro	Unidade	Resultado
Ferro total	mg/l	< 0,05

b) 2ª bacia de decantação

b.1) Ensaio utilizando o sulfato de alumínio

Ensaio n ° 01

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,60	5,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)
Tempo de agitação	10 minutos (20 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
30	171,00

Ensaio n° 02

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,58	10,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	37,50
20	23,30
30	16,00

Volume de lodo gerado	ml/l	6,00
-----------------------	------	------

Parâmetro	Unidade	Resultado
Sólidos em suspensão	mg/l	3,60
OD	mg/l	8,33
DBO	mg/l	1,99
DQO	mg/l	4,51
Alumínio total	mg/l	< 0,10

Ensaio n° 03

Adição de sulfato de alumínio até pH 6,35	15,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	27,60
20	15,18
30	8,87

Ensaio n°04

Adição de sulfato de alumínio até pH 5,99	20,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	32,70
20	28,60
30	22,20

b.2) Ensaio utilizando cal e sulfato de alumínio

Ensaio n°01

Adição de cal até pH 10,11	12,50 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio até pH 7,40	35,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	20,50
20	10,53
30	4,80

Ensaio n°02

Adição de cal até pH 10,19	18,75 mg/l – (Ca (OH) ₂ – 0,5%)
Adição de sulfato de alumínio até pH 7,04	50,00 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	14,57

20	6,31
30	2,42

Volume de lodo gerado	ml/l	7,00
-----------------------	------	------

Parâmetro	Unidade	Resultado
Sólidos em suspensão	mg/l	< 0,50
OD	mg/l	8,40
DBO	mg/l	0,50
DQO	mg/l	< 1,00
Alumínio total	mg/l	< 0,10

b.3) Ensaio utilizando cloreto férrico

Ensaio n ° 01

Adição de cloreto férrico até pH 6,10	5,00 mg/l – (FeCl ₃ – 2,0%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
30	182,00

Ensaio n ° 02

Adição de cloreto férrico até pH 5,9	10,00 mg/l – (FeCl ₃ – 2,0%)
Tempo de agitação	1 minuto (105 rpm)
Tempo de agitação	15 minutos (40 rpm)

Resultados

Tempo de decantação (minutos)	Turbidez (em UNT)
10	60,00
20	42,00
30	23,00

Parâmetro	Unidade	Resultado
Ferro total	mg/l	< 0,05

Testes em campo

Caracterização das amostras coletadas após a injeção dos reagentes na canaleta

a) 2ª bacia de decantação

Teste n° 1

Adição de sulfato de alumínio	7,5 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	40 minutos (agitação manual)

Resultados

Tempo de decantação: 2 horas e 30 minutos	Turbidez (em UNT): 91,00
	Sólidos em suspensão (mg/l) : 80,00

Alumínio total (mg/l)	< 0,10
pH	6,25

Teste n° 02

Adição de sulfato de alumínio	10,0 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	40 minutos (agitação manual)

Resultados

Tempo de decantação: 2 horas e 30 minutos	Turbidez (em UNT): 48,00
	Sólidos em suspensão (mg/l) : 53,00

Alumínio total (mg/l)	< 0,10
pH	6,60

b) lançamento final

Teste n°01

Adição de sulfato de alumínio	7,5 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	40 minutos (agitação manual)

Resultados

Tempo de decantação: 2 horas e 30 minutos	Turbidez (em UNT): 68,00
	Sólidos em suspensão (mg/l) : 51,00

Alumínio total (mg/l)	< 0,10
pH	6,53
OD	7,98
DBO	3,01

Teste n°02

Adição de sulfato de alumínio	10,0 mg/l – (Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18 H ₂ O – 2%)
Tempo de agitação	40 minutos (agitação manual)

Resultados

Tempo de decantação: 2 horas e 30 minutos	Turbidez (em UNT): 37,00
	Sólidos em suspensão (mg/l) : 21,00

Alumínio total (mg/l)	< 0,10
pH	6,43
OD	8,55
DBO	2,88