

RODICA TEODORESCU SCARLAT

*ÁGUA NO PROCESSAMENTO MINERAL*

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia.

São Paulo

1995

RODICA TEODORESCU SCARLAT

*ÁGUA NO PROCESSAMENTO MINERAL*

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia  
Mineral

Orientador:

Prof.Dr. ARTHUR PINTO CHAVES

São Paulo

1995

*"Água é vida. Sem ela, torna-se impossível qualquer tipo de existência. Poluí-la é crime de lesa-humanidade".*

Paiva Netto,  
Templo da Boa Vontade,  
Brasilia

*"O Banco Mundial estima que na próxima década os investimentos relacionados com a água serão de US \$ 600 a 800 x 10<sup>9</sup>".*

*"A disputa pelo petróleo no século XX motivou guerras e destruição. Na mesma marcha de insensatez, chegamos ao século XXI com a infeliz sina de guerrearmos pela água".*

Ismail Serageldin  
Vice Presidente do Banco Mundial  
Newsweek, 14/08/1995, pg. 52

*Dedico a dissertação ao Diretor Adjunto do CETEM, M.Sc. Juliano Peres Barbosa e ao Diretor do CETEM, Prof. Dr. Roberto C. Villas Bôas, que me encorajaram em todas as fases do mestrado e me deram o apoio que é reconhecido por todos os engenheiros do CETEM.*

## A G R A D E C I M E N T O S

*Agradeço ao Deus, que criou as condições de gozar o prazer de saber.  
Agradeço à minha família, que me permitiu ter a satisfação do trabalho criador.*

*Agradeço aos meus professores, os quais dedicaram-se com tanta competência para a minha formação profissional.*

*Agradeço às Diretorias Técnicas e aos colegas das quatro usinas visitadas que, conscientes da importância da pesquisa científica e, em particular do tema deste trabalho, me permitiram acesso aos dados técnico-econômicos e me dedicaram extraordinária atenção, apesar de tão valioso e tão limitado o tempo na produção.*

*Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves a colaboração própria de um erudito em matéria de Tratamento de Minérios e Carvões, e também a sua paciência e persistência no acompanhamento desta dissertação.*

*Agradeço aos meus colegas do CETEM, que me deram força moral e apoio material para poder finalizar a dissertação.*

## RESUMO

A dissertação "Água no Processamento Mineral" propõe-se a abranger a variedade tecnológica e científica da água abordando seus aspectos gerais e específicos dos sistemas água-minério.

Em relação a essas questões, a dissertação examina também a situação de algumas usinas de beneficiamento do ponto de vista da água de processo, para concluir sobre algumas tendências já observáveis no panorama mineral nacional.

A água é uma fonte importante de riqueza mineral, seja sob a forma de evaporitos (sais minerais dissolvidos na água), seja como "protetora" de riquezas no fundo dos mares, lagoas e rios.

Além disso, a água constitui o mais importante ingrediente no tratamento mineral, tanto na constituição de polpa como na de solventes químicos.

Por outro lado, a água é o principal portador de poluentes da indústria mineral, uma das mais agressivas ao meio ambiente. Nesse sentido, conhecer o papel efetivo da água nas contaminações dos efluentes e nos fenômenos que permitam a sua descontaminação pode evitar ou reduzir o impacto ambiental ocasionado pelo uso da água de processo.

A captação, o tratamento e a distribuição da água têm custos importantes. Reduzir o consumo de água significa reduzir os custos operacionais das usinas, A redução do consumo de água nova é uma necessidade econômica e ecológica.

## *ABSTRACT*

The M.Sc. dissertation "Water in Mineral Processing" intends to oversee the water technological and scientific diversity, by approaching general and specific aspects concerning the water-ore systems.

Related to these points, it also deals with the state of some ore dressing plants in reference to process water, in order to conclude about trends already observable in the national mineral scenery.

Water is an important source of mineral wealth, either in the form of brines (water solubilized salts ) or as a "shield" for mineral resources at the bottom of seas, lakes and rivers.

Moreover, water as slurry or chemical solvent is the most important ingredient in ore processing.

On the other hand, water is the main polluting agents carrier in the mineral industry, one of the most aggressive to the environment. In order to avoid or diminish the environmental impact due to process water, one must know its effective role the effluent contaminants and phenomena which allow decontamination.

Water supply, treatment and distribution, necessary for use in mineral processing, implies in important costs; Reduction of water consumption means reduction of these costs. The necessity to reduce fresh water supply is either economic and ecologic.

## LISTA DE ABREVIACÕES E GLOSSÁRIO

p.ex. - por exemplo

cf. - conforme

UF - *Underflow* - polpa contendo alta concentração de material de granulometria maior descarregada por um equipamento de classificação ou desaguamento.

OF - *Overflow* - água contendo pequenas quantidades de material sólido fino descarregada por um equipamento de classificação ou desaguamento.

*Rougher* - grupo de equipamentos de concentração processando material cominuído objetivando a obtenção de um pré-concentrado e onde é removida a maior parte do rejeito.

*Cleaner* - grupo de equipamentos de concentração processando o pré-concentrado obtido no *rougher* objetivando a obtenção do concentrado final.

*Scavenger* - grupo de equipamentos de concentração onde se processa o rejeito do *rougher* para obtenção do rejeito final.

ROM - *Run-of-mine* - minério assim como sai da mina, antes de qualquer tratamento.

*Runoff* - a água de drenagem nas encostas.

*Drag factor* - coeficiente de resistência mecânica na queda de partículas minerais em água.

*Flash flotation* - processo de flotação que utiliza o SKIM-AIR, célula de flotação operando material de alta porcentagem de sólidos >70 % e com tempo de residência bem curto  $\approx \frac{1}{2}$  a 1 min.

*Softening* - amolecimento de água dura.

*Spreading* - coeficiente de espalhamento.



*ex situ* - fora do local da jazida.

*in situ* ou *in loco* - no local da jazida.

*sensu stricto* no sentido estrito do termo.

L/S - relação em peso líquido/sólido

CIP - *carbon-in-pulp* - alternativa de cianetação com a adsorção dos cátions de ouro da solução pelo carvão ativado: processa-se a polpa contendo ouro lixiviado.

v/v - percentagem de sólido na polpa, em volume por volume.

w/w - percentagem de sólidos na polpa, em peso

b.s. - base seca.

ppm - partes por milhão; teor de mineral útil por totalidade do minério; teor de metal por quantidade de solução.

ppb - parte por bilhão; teor de metal (poluidor) por volume de solução.

gf - grama força - unidade de força.

gm - grama massa - unidade de massa.

## SUMÁRIO

DEDICAÇÃO	I
AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
<i>ABSTRACT</i>	IV
LISTA ABREVIACÕES E GLOSSÁRIO	V
SUMÁRIO	VI
<i>1. INTRODUÇÃO - ÁGUA, FONTE MINERAL</i>	1
<i>2. RECURSOS DE ÁGUA DE PROCESSO</i>	
2.1. Recursos Naturais de Água	6
2.2. Balanço de Água Natural	8
2.3. Ciclo Natural da Água	10
2.4. Dados e Informações Hidrológicas	11
2.5. Ampliação de Recursos Hídricos na Mineração	13
2.6. Qualidade da Água	18
2.7. Quantidade Estimada de Consumo de Água de Processo na Indústria Mineral	20
<i>3. PROPRIEDADES DA ÁGUA</i>	
3.1. Estado Natural	21
3.2. Estrutura da Água	21
3.3. Propriedades Físicas da Água	25
3.4. Propriedades Químicas da Água	30
<i>4. PRESENÇA MECÂNICA DA ÁGUA NOS SISTEMAS ÁGUA-MINÉRIO</i>	
4.1. Umidade	32

4.2. Água nos Poros dos Minérios	34
4.3. Permeabilidade	35
4.4. Sedimentação	37
4.5. Lamas no Tratamento	43
4.6. Turbidez	48
5. <i>FENÔMENOS ELETROQUÍMICOS NA INTERFACE ÁGUA - MINÉRIO</i>	
5.1. pH	50
5.2. Ionização da Água	52
5.3. Dureza da Água	53
5.4. Corrosividade	54
5.5. Troca Iônica	59
6. <i>VISCOSIDADE E REOLOGIA</i>	
6.1. Escoamento Laminar e Turbulento	63
6.2. Viscosidade	64
6.3. Viscosidade das Suspensões e Reologia	66
6.4. Reologia e Reogramas	70
6.5. Tixotropia	73
6.6. Liquefação	74
7. <i>FENÔMENOS FÍSICO-QUÍMICOS NA INTERFACE ÁGUA- MINERAIS</i>	
7.1. Tensão Superficial	76
7.2. Tensão Interfacial e Espalhamento de Líquidos	77
7.3. Capilaridade	78
7.4. Molhabilidade	82

7.5. Alguns Aplicações da Tensão Superficial, Capilaridade e Molhabilidade	86
7.6. Adsorção	87
<i>8. PROPRIEDADES ELÉTRICAS NA INTERFACE ÁGUA-MINÉRIO</i>	
8.1. Dupla Camada Elétrica (DCE)	100
8.2. Eletrosmose e Eletrosmose Reversa	110
<i>9. SISTEMAS DE ÁGUA DE PROCESSO EM USINAS DE BENEFICIAMENTO</i>	
9.1. Generalidades	114
9.2. Descrição das Minas Visitadas	117
9.2.1. Mineração Morro Agudo (sulfetos de chumbo e zinco)	
9.2.2. ARAFÉRTIL (apatita e barrita)	
9.2.3. Mineração Morro Velho - Queiroz (ouro)	
9.2.4. Mineração SAMARCO (concentrado de ferro)	
9.3. Investimento	124
9.4. Custo Anual da Água	126
9.5. Soluções e Tentativas nas Quatro Usinas e a Temática da Dissertação	127
<i>10. CONCLUSÕES</i>	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS E QUADROS	

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos são os trabalhos de pesquisa que têm se dedicado a abordar as propriedades e o aproveitamento de diferentes bens minerais. No entanto a água, importante recurso para o processamento mineral e portador do potencial mineral, não tem merecido o mesmo amplo e aprofundado tratamento com relação ao estudo de suas propriedades e utilizações. Dessa forma, o presente trabalho pretende dar o primeiro passo no sentido de preencher em parte essa lacuna, apresentando, nos seus capítulos iniciais, as propriedades da água e as características gerais dos recursos hídricos. Passa, em seguida, a discutir a participação deste bem mineral no sistema água-minério, particularmente em usinas de beneficiamento.

Como já foi dito, a água participa, de várias maneiras, na indústria mineral e na formação do potencial mineral. Algumas delas são a seguir destacadas.

a) A água forma amplas jazidas minerais ou participa na formação delas. As águas portadoras de minerais são:

Os rios, carregam areia comum e/ou areias pesadas. A areia comum constitui um material indispensável em construções; as areias pesadas podem conter ouro, cassiterita, zirconita, ilmenita, rutilo, monazita, tantalita, columbita e outros minerais do tipo aluvionar. Esses agregados minerais, dentro da areia quartzosa, formam bolsões de "areias pretas" ou "areias pesadas". Tais rios podem apresentar teores de  $1 \text{ g Au} / \text{m}^3$  areia; outros rios contêm entre 1 e 5 % de areias pesadas (em relação a areia quartzosa), nas quais os minerais de alto interesse econômico - zirconita e monazita - participam com 5-15 %, e a ilmenita com 30-50 %.

As lagoas também são fontes de produtos minerais, seja sob forma de salmouras, seja sob forma de depósitos no fundo delas. Ao redor de Fortaleza, no Ceará, o fundo das lagoas contem depósitos de diatomitos, explorados em escala industrial.

Citamos como salmoura o *Great Salt Lake*, nos Estados Unidos, onde desenvolveu-se uma tecnologia de retirada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , para permitir a extração por evaporação solar de sais de Na, Mg e K. A retirada do sulfato segue um processo de troca iônica e gera, como subprodutos,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  <sup>(01)</sup>.

As salmouras geotermiais contêm lítio, chumbo e zinco, sendo os processos de extração definidos por experimentos do *U.S. Bureau of Mines* <sup>(02; 03)</sup>.

A plataforma continental constitui outra fonte de riqueza mineral, seja pelo seu fundo, seja por sais dissolvidos na água. No Brasil, atualmente explora-se o NaCl por evaporação pela *Companhia Nacional de Alcalis*, em Araruama, RJ. Mencionam-se a presença de sais de potássio da PETROMISA, em Sergipe; os domos de enxofre em fase de pesquisa pela CPRM, em São Mateus, ES e a jazida de sal-gema em Conceição da Barra, ES.

No exterior, a plataforma continental é explorada para ouro, no Alasca, e para diamantes, na Namíbia.

Pesquisadores encontraram teores diferentes de metais pesados em suspensão e em sedimentos (rios, estuários, plataforma continental). A presença do Pb é de 0,02 a 250 ppb na água e de 25 a 70.000 ppb nos sedimentos; a presença do Cd foi indicada entre 0,005-15 ppb na água e de 0,5-39.900 ppb nos sedimentos; a presença do Hg é entre 0,025-47 ppb na água e de 0,04 a 2.010 ppb nos sedimentos. Supõe-se que alguma presença, principalmente nos sedimentos, provem da poluição industrial <sup>(04)</sup>.

A água do mar contém, em média, as seguintes concentrações [ppm] <sup>(05)</sup>:

cátions:  $\text{Na}^+$  10,77;  $\text{Mg}^{2+}$  1,29;  $\text{Ca}^{2+}$  0,412;  $\text{K}^+$  0,399;  $\text{Sr}^{2+}$  0,008;

ânions:  $\text{Cl}^-$  19,354;  $\text{SO}_4^{2-}$  2,712;  $\text{HCO}_3^-$  0,142;  $\text{Br}^-$  0,067;  $\text{F}^-$  0,0013.

Os nódulos das águas profundas, encontrados no fundo dos mares e oceanos, foram estudados mediante ensaios de concentração e avaliação econômica. Não está longe o momento, no qual os nódulos serão fornecedores de Ni, Cu etc. Estudos da *Kennecott Copper Corporation* <sup>(06)</sup> indicaram um investimento de 320 US\$/t metal extraído/ano.

A extração do magnésio contido no mar utiliza uma tecnologia definida antes da II Guerra Mundial; menciona-se que a empresa *Dow Chemical Company* já extrai Mg metálico do mar.

b) Na lavra de minérios, a água participa para execução de:

- desmonte hidráulico (no Brasil cassiterita, caulim, ouro, areia de construção);
- lavra por dissolução de sais das jazidas subterrâneas (NaCl; KCl; MgCl<sub>2</sub>);
- extração por percolação, de minérios de urânio, cobre etc;

Como problemas que precisam de solução específica para cada mina, são utilizadas a drenagem, para evitar a inundação da mina e o tratamento das águas que ainda constituem um fator poluidor (acidez, elementos radioativos etc).

c) Como polpa (suspensões) ou suporte do solvente, a água participa ativamente nos processos de separação de espécies minerais e/ou extrativos, respectivamente.

A água participa nos processos a úmido, entrando em quantidades de 30 % (em peso) até uma proporção água/sólido acima de 10/1 nas polpas; se o processo é a lixiviação, a água representa, na maioria dos casos, 99 % ou mais do solvente.

A água aumenta o diferencial de densidade, importante para a ampliação dos limites de separação gravítica.

Os fenômenos desenvolvidos na interface água-mineral permitem a flotação dos minerais úteis.

A água é a única substância participante no processo de lavagem, seja como diminuição da massa em fluxo (deslamagem), seja para purificar os concentrados, seja no processo de lavagem em contra-corrente nos processos hidrometalúrgicos.

d) Como suporte do transporte hidráulico de minérios, concentrados e produtos, a participação da água é de uma parte até cinco partes em peso, em relação ao produto mineral transportado. Há transporte interno na usina de tratamento, por exemplo o transporte do *underflow* dos espessadores aos filtros; transporte por calhas de produtos *rougher*, *cleaners* ou *scavengers* da flotação; o mesmo para espirais e mesas. As distâncias são de 1 a 100 m.

O transporte externo pode ser por calhas em queda livre ou em tubulações forçadas. As distâncias são de ordem da 1 a 10 km e o sistema depende da topografia do terreno.

No ramo de transporte hidráulico de concentrados o Brasil é um país pioneiro. O mais sofisticado meio de transporte de concentrados é o mineroduto de grande distância. Menciona-se que o maior mineroduto do mundo é aquele que transporta os concentrados de ferro da usina SAMARCO ao Porto de Ubú. Outros minerodutos transportam concentrados fosfáticos, tais como o mineroduto de 120 km da FOSFÉRTIL e o mineroduto de 14 km da GOIASFÉRTIL.

A participação da água no transporte externo é de 25 a 65 % de sólidos\*<sup>1</sup> sendo, que para minerodutos é de 50 a 65 % de sólidos.

Apesar de fonte de riqueza mineral a água é, por outro lado, o principal responsável pela poluição ambiental causada pela atividade mineral. As formas e as fontes de poluição são várias. Citam-se as seguintes: presença de íons de metais pesados e de reagentes de flotação; suspensões sólidas no efluente responsáveis pelo fenômeno

---

<sup>1</sup>Pela notação "% de sólidos" subentende-se "em peso base seca" fora de casos onde há menção em contrário.



de assoreamento; solventes no processo de lixiviação; óleos e outros produtos utilizados na atividade mineral; quebra do equilíbrio ecológico por movimentação mecânica, vibração etc., liquefação dos diques das bacias de rejeitos. Soluções específicas, parciais ou totais, têm sido apresentadas para reduzir o impacto ambiental.

No processamento mineral a água tem uma participação importante, no investimento e no custo operacional. Mencionamos que o custo estimado da água aproxima-se a 1,00 US\$ / t minério *run-of-mine*(ROM) (minério assim como sai da mina). Para centenas de milhões de t/a ROM beneficiadas a úmido, no Brasil, a despesa com água, mesmo com uma reciclagem de 50 %, deve representar um custo anual de US \$ 150 - 500 10<sup>6</sup>. Os custos estimados da água de quatro usinas grandes e médias de Minas Gerais (MG) variaram entre 0,09 a 1,25 US\$/t ROM. Estima-se que para usinas menores, este custo pode alcançar ou ultrapassar US\$ 1,00/t ROM.

## 2. RECURSOS DE ÁGUA DE PROCESSO

### 2.1. Recursos Naturais de Água

Os recursos de água variam de país a país, do extremo equatorial, com precipitação diária, ao outro extremo desértico com precipitação extremamente reduzida, ou mesmo nula.

A principal fonte de água é a chuva e, em países de clima temperado ou continental, uma quantidade importante provém de neve e gelo derretidos na primavera.

A água de chuva contém as impurezas incorporadas durante a evaporação da água de superfícies extensas (lagoas, rios de velocidade reduzida, e, principalmente, mares e oceanos). A maior parte delas é constituída de gases dissolvidos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  etc.). Elas são indicadas na Tabela 2.1., item 2.6.<sup>(07)</sup>.

A água de superfície fornecida por rios e lagoas deve ser renovada em quantidade suficiente para que o seu consumo seja garantido. Quando essa quantidade varia com a estação ou é influenciada por alterações climáticas, ela precisa ser acoplada a reservatórios - pulmão, naturais ou artificiais.

A Figura 2.01.<sup>(08)</sup> mostra a água de precipitação, de drenagem (*runoff*) e de estocagem superficial de uma bacia hidrográfica.

Quanto à água subterrânea, devem ser observados os seguintes aspectos:

a) - a sua genética;

b) - a sua dinâmica: movimento laminar, onde admite-se que a infiltração gravitacional através dos poros da rocha conduz a partículas de água com trajetórias paralelas ou movimento turbulento, onde as trajetórias são irregulares e semelhantes às de rios serranos;

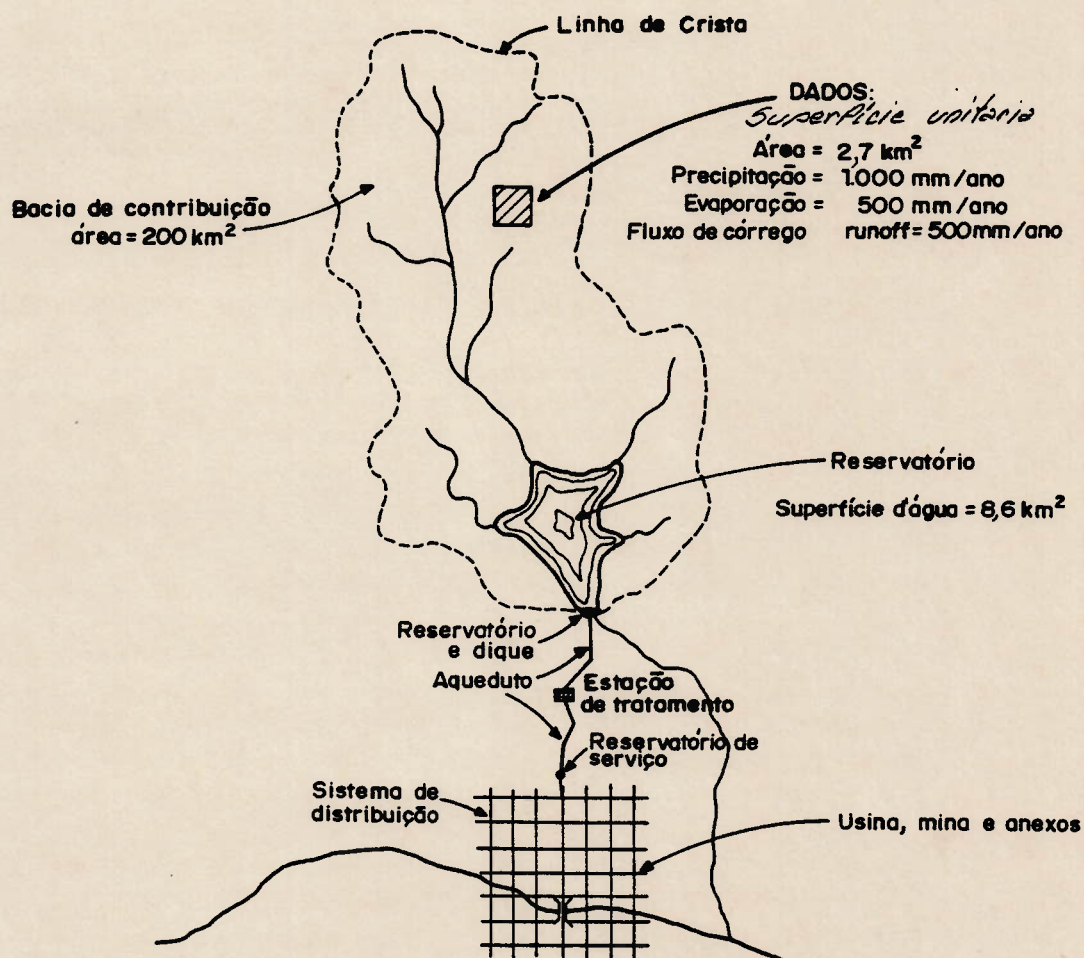


Figura 2.01<sup>(08)</sup> - Precipitação, *runoff* e estocagem superficial no desenvolvimento de uma bacia hidrográfica

c) - o seu regime, que define a variação e a amplitude do nível das águas subterrâneas, bem como da temperatura e do quimismo;

d), - o seu balanço, que estabelece a vazão subterrânea máxima anual, tomando em conta o *runoff*, a evaporação e a infiltração.

A água subterrânea é resultado de infiltrações. Ela pode constituir um recurso hídrico, no caso de nascentes ou, através de atividade humana, agindo sobre o aquífero\*<sup>2</sup>.

## 2.2. Balanço de Água Natural

O macro-balanço da água, pode ser positivo (entrada maior do que a saída do sistema ou da bacia), ou negativo. A longo prazo, as entradas igualam as saídas. A curto ou médio prazo, há diferenças entre saídas e entradas.

As entradas são:

- água de chuva e água de neve e/ou gelo derretidos,
- efluentes indústrias e/ou municipais,
- rios,
- *runoff*,
- água procedente de lençóis subterrâneos aflorantes.

As saídas são:

- evaporação,
- evapo-transpiração (flora),
- infiltração,
- rios,
- as provenientes de atividades técnicas (saídas de bacias e/ou água retida dos reservatórios).

Algumas observações podem ser feitas acerca do fluxo de água. São elas:

a) no Brasil, não há entrada notável de água de neve derretida, em áreas de climas temperado e continental, a neve e o gelo são fatores importantes;

---

<sup>2</sup>Aquífero - a espessura das águas subterrâneas que vazam numa camada permeável, sob ação gravitacional, sobre uma camada impermeável.

b) os efluentes industriais e municipais não são entradas naturais, mas, pela sua frequência, tornaram-se um item importante do macro-balanço;

c) os rios constituem entrada de água quando a nascente e uma parte do trajeto encontram-se longe de um certo empreendimento mineral;

d) o *runoff* provém da precipitação e, em alguns casos, de água subterrânea; neste último caso, o lençol subterrâneo deve aflorar; a topografia, a cobertura vegetal e o solo da região que constitui a bacia hidrológica são importantes, tanto para o *runoff* da precipitação, como para o afloramento (interseção da camada portadora de água com a superfície do terreno);

e) a evaporação precisa de energia; o sol é, então, o fornecedor da energia necessária, as regiões com insolação maior são sujeitas a um índice maior de evaporação;

f) a evapo-transpiração é a água saindo do sistema pelo ciclo vital da flora; em períodos chuvosos, a flora absorve uma parcela importante da água de precipitação; os processos vitais conduzem à devolução de uma parte de água absorvida à atmosfera sob forma de transpiração;

g) a infiltração depende da quantidade de água de precipitação, da natureza e aspecto topográfico do solo e da cobertura vegetal; algumas vezes, a água infiltrada constitui reservatórios naturais subterrâneos.

h) caso o balanço seja positivo ( $\Sigma$  entradas  $>$   $\Sigma$  saídas), há uma diferença, que se constitui em excesso; este último gera águas estagnantes ou, se há atividade humana, ele torna-se disponível para o consumo industrial e/ou doméstico;

i) caso o balanço seja negativo, há uma desertificação temporária da bacia hidrográfica; para a atividade humana é necessário trazer água de lugares relativamente distantes ou recorre ao que chama-se de "ampliação de recursos hídricos" (07).

### 2.3. Ciclo Natural da Água

A Figura 2.02. (08) mostra o ciclo da água natural, onde a água é transferida da terra para a atmosfera pela evaporação da umidade de terrenos e de superfícies (espelhos) de água e, pela evapo-transpiração da flora terrestre ou aquática.

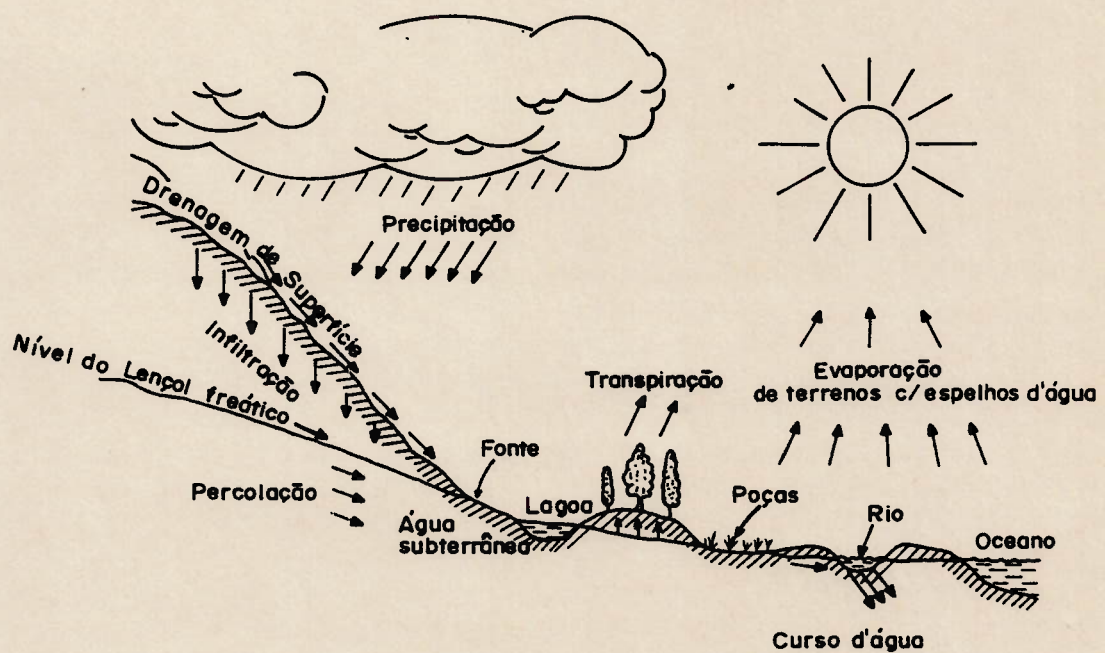


Figura 2.02. (08) - Ciclo da água

Nas maiores altitudes da atmosfera a exposição do vapor de água a temperatura baixa, conduz o volume de ar carregado com vapor ao ponto de orvalho; a umidade condensa e precipita a água sobre terra e mares. A água superficial e a água subterrânea completam o ciclo hidrológico.

#### 2.4. Dados e Informações Hidrológicas

Os elementos naturais que constituem o balanço natural da água têm comportamento aleatório. São dias de chuva intensa, são dias sem chuvas, são dias ensolarados de evaporação intensa, são dias de evaporação quase zero e assim por diante, variando aleatoriamente, como todos os fatores de entrada e saída de água de uma localidade ou bacia hidrológica. A unidade temporal pode ser dia, mês, ano. Como qualquer fenômeno natural, os acontecimentos, a intensidade deles, a frequência, a irregularidade aparente, têm todos um caráter aleatório.

São as autoridades da administração pública, que cuidam da coleta enorme de dados, para fornecer informações hidrológicas confiáveis. São elas:

- Instituto Nacional de Meteorologia, ao nível federal e seus Distritos Regionais, em nível estadual, que fornecem informações climáticas;
- DNAEE, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, para cursos de água.

Mesmo com grande volume informativo, a coleta sistemática de dados é recente no país. As informações extensas no território nacional não passam de 20 a 30 anos para estados de recente atividade mineral ou agro-industrial (Pará, Roraima, Rondônia, Amazonas, Tocantins etc.).

As empresas mineradoras interessadas no uso da água devem reconstituir, com bastante atenção, as informações díspares, referentes a um prazo de 1 a 5 anos. A obtenção de informações, baseadas em métodos universalmente aceitos, deve apresentar absoluta confiança.

A interpretação dos dados contidos no grande volume informativo, depende do histórico de coleta de dados, da confiabilidade do sistema de coleta e da correta avaliação dos dados disponíveis, pelo corpo técnico da empresa. Erros de coleta ou de interpretação conduzem a soluções de engenharia caras e/ou incertas, no melhor dos

casos. Qualquer dado deve ter um grau de confiabilidade para  $X$  anos, por exemplo, fornecimento de água do rio abastecedor, deve assegurar a produção da mina com confiabilidade de 90 %, 95 % ou 99 %.

Vamos enumerar algumas informações necessárias para desenvolvimento do projeto de utilização da água:

a) pluviometria: mm CA (coluna de água) diariamente; mensalmente; anualmente; por 5 a 10 anos; média; média dos máximos; média dos mínimos; máximo; mínimo; desvio padrão;

b) evaporação: a mesma frequência de informações, como no caso da pluviometria;

c) água *runoff*: as mesmas informações anteriores;

d) água infiltrada; informações periódicas médias, máximos, mínimos; natureza do terreno; permeabilidade;

e) água retida pela vegetação: número de hectares de vegetação; absorção de água por hectare; mínimo, máximo, média do valor de absorção (todos por tipos representativos de vegetação);

f) capacidade de fornecimento de aquífero;

g) características do rio que abastece o conjunto mineral e que recebe o efluente (vazão média anual, máxima, mínima, diferença de nível entre rio no ponto de captação e a usina, dureza da água).

A Figura 2.03 é uma ilustração da variação da intensidade de precipitação (mm CA) em função da duração em minutos, para tempestades registradas em 1 ano, 2 anos, 5 anos e 10 anos<sup>(08)</sup>.



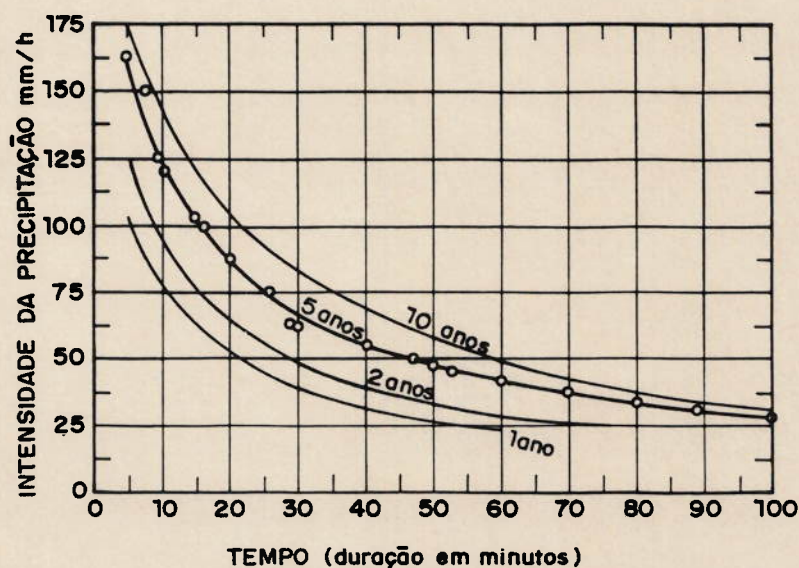


Figura 2.03.(08) - Intensidade, duração e frequência das chuvas intensas.

## 2.5. Ampliação de Recursos Hídricos na Mineração<sup>(09; 07)</sup>

### 2.5.1. Conceito

A ampliação de recursos hídricos visa a aumentar o volume de água disponível, por várias técnicas, as quais serão enumeradas. A indústria mineral, importante consumidora de água, participa de soluções extensivas de recursos hídricos, tanto para obter água de processo, como para diminuir o impacto ambiental do efluente.

### 2.5.2. Reciclagem

A forma mais comum de extensão de recursos hídricos em tecnologia mineral é a reciclagem da água de processo, após tratamento. As usinas brasileiras mostraram interesses na reciclagem, assim a relação entre água reciclada e água de processo varia

de 0% (*Morro Agudo*) até quase 100% (CBMM e *Itabira*) <sup>(10)</sup>. A reciclagem é da ordem de 59 % em Morro Velho (41 % água nova), 21 % na ARAFÉRTIL (79 % água nova), 0 % em Morro Agudo (100 % água nova). No caso do Morro Velho, dos 41 % de água nova, uma parte compensa as "sangrias"<sup>3\*</sup>.

### 2.5.3. Neblina e orvalho

A Alemanha introduziu a medição de recursos de água sob forma de neblina. O investigador alemão *Grunow* introduziu pluviômetros com "captadores de neblina". A extensão da participação da neblina como recurso hídrico foi espetacular na África do Sul (*Table Mountains*, perto de *Capetown*), onde o pluviômetro com captador de neblina registrou - em 56 dias de neblina - 2.027 mm e o pluviômetro convencional registrou somente 123 mm <sup>(05)</sup>.

Em regiões áridas, o orvalho pode aumentar a precipitação pluviométrica. Israel utiliza o método no deserto de *Neguev*.

A Alemanha também mediu, na atual Namíbia, antes da I<sup>a</sup> Guerra Mundial, 47 mm de orvalho, comparado com 22 mm de chuva.

### 2.5.4. Águas superficiais tratadas

A Flórida (EUA) possui importantes quantidades de água superficial, com alto teor de material orgânico, que a torna inutilizável para a flotação de fosfatos. O tratamento da água superficial, utilizando a floculação das partículas finas com um reagente adequado (polímero "poly-ethylenimine" - PEI), conseguiu ampliar os recursos

---

<sup>3</sup>Sangrias - ("bleeding") - descarte de uma parte do volume de água, necessário quando o teor de nocivos, reagentes e/ou suspensões sólidas começam a incomodar o processo produtivo; termo generalizado em MG.

hídricos e oferecer à indústria extrativa de fosfatos água suficiente para o processo de lavagem e flotação (11).

#### 2.5.5. Tratamento enzimático de águas subterrâneas

Algumas águas retiradas do solo ou subterrâneas, contêm substâncias químicas, eventualmente tóxicas. A remoção seletiva de algumas substâncias tóxicas realiza-se pelo tratamento com enzimas. Após a remoção seletiva, o restante de substâncias nocivas no efluente pode seguir tratamentos biológicos ou físico-químicos convencionais. A solução inversa também é realizável: retirar o conjunto tóxico do efluente, por processos biológicos ou físico-químicos convencionais, e efetuar o tratamento final do efluente - "polimento"\*<sup>4</sup> - através de processo seletivo enzimático (12).

#### 2.5.6. Aquedutos

Em certas áreas, há falta de água para consumo industrial ou municipal. Exemplo é a mina, usina e vila dos operários de *Boquira e Caraíba* (BA). A empresa que opera *Boquira* construiu um aqueduto a partir do rio São Francisco, e a água trazida de cerca de 100 km abastece o empreendimento mineral e a infra-estrutura necessária, inclusive uma pequena agricultura e a pecuária local. Além da extensão do recurso de água pelo aqueduto, há uma intensa reciclagem da água.

#### 2.5.7. Tratamento de dessalinização por osmose reversa

---

<sup>4</sup>Polimento - ("polishing") - é uma operação refinada de purificação, que se executa após tratamento dos efluentes permitindo a reciclagem. O termo é generalizado em MG.

A osmose reversa tem uma grande participação nas instalações de dessalinização, principalmente nos países árabes, carentes de água doce e com acesso a tecnologia moderna; em Israel, cujo desenvolvimento econômico depende da ampliação de recursos hídricos e nas regiões semi-desérticas como a Califórnia.

A conversão da água de mar em água doce, por osmose reversa, requer em média 59,6 Wh/l de água doce produzida. Como o processo de osmose reversa é ainda intenso em consumo de energia (acima de US\$ 2,00 por m<sup>3</sup> de água dessalinizada), foram desenvolvidas na França, e experimentadas na Arábia Saudita e França, duas instalações que utilizam, como fonte energética, a energia solar (13). A Figura 2.04. indica o esquema da usina francesa.

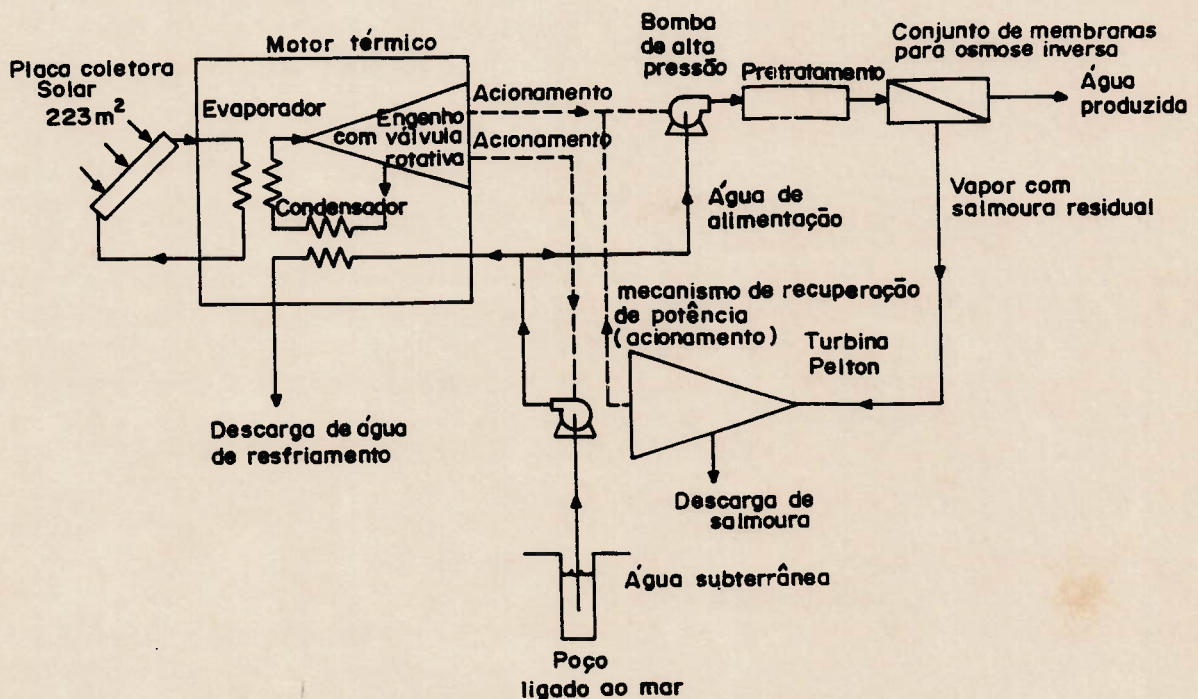


Figura 2.04. (13) - Diagrama da unidade solar e a osmose reversa - França

### 2.5.8. Água em reservatórios subterrâneos (14)

Há um paralelismo entre a exploração subterrânea do petróleo e da água. Ambos, água e petróleo, são fluidos. A rocha-reservatório, de ambos, é sedimentar. O reservatório, mais ou menos poroso e permeável, nos dois casos, permite determinar a distância entre os poços produtores. Os poços, muitas vezes, são surgentes. Em água subterrânea equivaleria ao fenômeno de artesianismo<sup>5</sup>; no caso de gêisers, a surgência é estimulada pela tensão de vapor de água. No caso do petróleo, a pressão do gás natural é também de origem geológica e termodinâmica, daí vem a força expulsiva, própria dos poços petrolíferos, denominados surgentes.

Nos dois casos, não se precisa de operários no subsolo e todo fluido minerado vem à superfície: é o sistema que os franceses denominam de "tout venant". Nem a lavra da água, nem a extração do petróleo são seletivas.

A extração de água subterrânea é típica para água contida em arenitos, cuja porosidade e permeabilidade conferem o potencial extrativo através de poços e bombeamento à superfície. A porosidade permite a avaliação da capacidade produtiva dos poços de água.

Em caso de rochas compactas, de natureza cristalina, como basalto, rochas graníticas e similares, a existência de vazios preenchidos por água não obedece as mesmas características, cubagem e avaliação. Entretanto, por existirem juntas de dilatação, falhas e outros acidentes geológicos, há também a possibilidade de ser encontrada água subterrânea em pacotes de rochas cristalinas (por exemplo: poços perfurados em basalto nas encostas do Planalto Gaúcho)<sup>(14)</sup>.

---

<sup>5</sup>Artesianismo - se refere a água subterrânea com suficiente pressão hidrostática para elevar-se acima do aquífero que a contém.

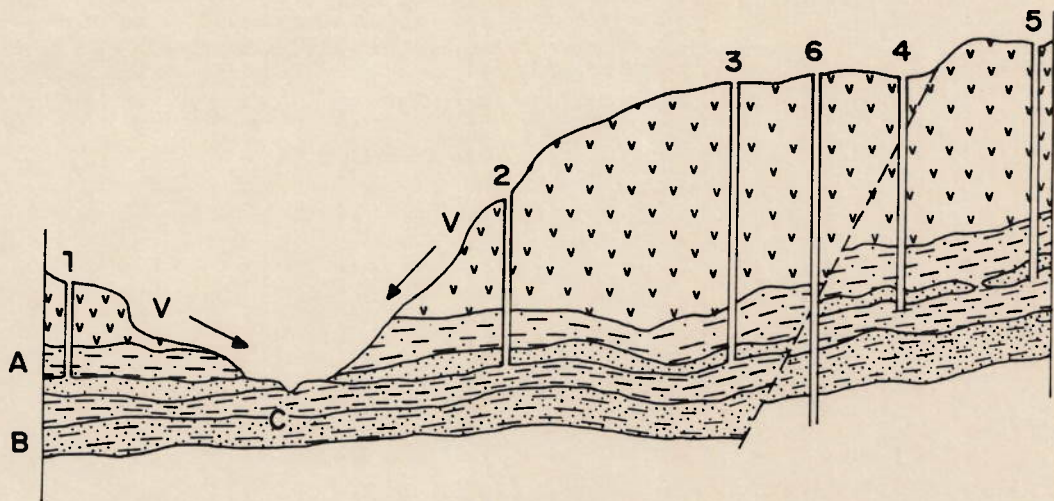


Figura 2.05<sup>(14)</sup> - Perfil geológico estrutural de um reservatório aquífero de sedimento e arenito poroso e permeável. O horizonte aquífero aparece capeado pelos sedimentos de folhelhos A, superincumbentes, e B e C, folhelhos impermeáveis, 1 a 6, furos de sonda.

## 2.6. Qualidade da Água

As exigências para a qualidade da água dependem da sua utilização. A legislação brasileira é clara e exigente, quanto possível para a situação existente e exigente para empresas de mineração recém montadas ou em fase de projeto.

A qualidade de água natural não equivale à de água pura. A Tabela 2.1. indica a composição média mundial da água de rios.

O Quadro 2.2. indica as substâncias comuns nos recursos hídricos naturais.

Tabela 2.1.<sup>(07)</sup> - Qualidade da água de rios - Média mundial

Impurezas	Concentração mg/l
sílica (SiO <sub>2</sub> )	13
Fe <sup>3+</sup>	0,07
Ca <sup>2+</sup>	15
Mg <sup>2+</sup>	4,1
Na <sup>+</sup>	6,3
K <sup>+</sup>	2,3
bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	58
íon sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	11
Cl <sup>-</sup>	7,8
íon nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1
sólidos solubilizados	90
dureza como CaCO <sub>3</sub>	55

Quadro 2.2. <sup>(15)</sup> - Substâncias comuns nos recursos hídricos naturais

<u>Água superficial:</u>	
em suspensão	argilas, material mineral, algas, bactérias, material orgânico, protozoários;
dissolvidas	O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , material corante, ácidos orgânicos, material orgânico, NH <sub>3</sub> , cloretos, nitritos, CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> ;
colóides ou pseudo - solução	material corante, sílica, ácidos orgânicos, material orgânico;
<u>Água subterrânea:</u>	
em suspensão	argilas, fungos;
solubilizados	bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloretos, nitratos de Ca, Mg, Na, K; bicarbonatos, sulfatos e hidróxidos de Fe, NaCl, compostos de Mn; CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> ;
colóides ou pseudo - soluções	sílica, alumina, óxido de Fe.

### 2.7. Quantidade Estimada de Consumo de Água de Processo na Indústria Mineral.

A Tabela 2.3. dá uma idéia do consumo de água em vários processos de tratamento. Observa-se que, mesmo estando entre limites amplos (1,5 a 23 m<sup>3</sup>/t), a intensa reciclagem da água reduz a necessidade da água nova a limites bem mais reduzidos (0,63 a 5,47)m<sup>3</sup>/t.

Tabela 2.3. (15) - Consumo de água nos processos minerais

Mina e Companhia	Minério	Processo	Água		Recurso Hídrico
			de processo (m <sup>3</sup> /t minério)	nova	
Haynsworth - Cyanamid	fosfato	flotação	12,7	0,81	poço
Novo México - AMAX	potassa	flotação	1,6	1,46	poço
Buik - AMAX	Pb, Zn	flotação	3,5	3,2	mina
Weed - Anaconda	Cu	flotação	3,8	1,2	reservatório
Filipinas - Bengent Con's	Au, Ag	cianetação	2,2	1,3	nascente e mina
Kellog - Bunker Hill	Pb, Zn, Ag	flotação	2,5	2,5	rio
Jeffrey - Canad. Jonhs Manville- reservatório	amianto		0,2	0,2	rio e reservatório
Empire - Cleveland Cliffs	Fe	flotação concentração magnética	21,9	0,7	reservatório
Sullivan - COMINCO	Pb,Zn,Sn	flotação	1,8	1,65	rio e reservatório
México - Cia Fresnillo	Cu,Pb,Zn, Ag, Fe	flotação	1,9	1,7	mina
Arizona - Duval	Cu, Mo	flotação	1,5	0,63	poço
Ertsberg - Freeport - Minerals	Cu	flotação	4,3	3,73	rio e reservatório
Butler - Hanna Mining	Fe	concentração magnética+ pelotização	16,5	0,9	mina+ reservatório
Irlanda - Irish Base Metals	Pb, Zn	meio denso+ flotação	7,2	3,26	rio
Chino - Kennecott	Cu	meio denso+ flotação	4,0	1,65	poço
Ontario - Kerr. Adison	Au	flotação+ cianetação	9,6	5,47	lagoa
San Manuel - Magma Copper	Cu, Mo	flotação+ fusão	3,8	1,9	poço
GECO Div. - Noranda Mines	Cu,Pb,Zn	flotação	3,7	2,88	lagoa
Florida - Occidental Chemicals	fosfatos	flotação	23,0	2,31	rio
Kotalahti - Outokumpu	Cu, Ni	flotação	3,2	2,84	rio
Chebulma -O.S.T.	Cu, Co	flotação	6,0	5,43	mina
Questa N.M.- Molybdenun Corp.	Cu,Co, Mo	flotação	1,8	1,25	poço e rio



### 3. PROPRIEDADES DA ÁGUA

#### 3.1. Estado Natural (16)

A água encontra-se, na natureza, em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. A forma comum de encontrar-se é a forma líquida. No Brasil, ela ocorre raramente sob forma sólida (gelo e/ou neve).

Como vapor, a água encontra-se sob forma de nuvens, neblina e como umidade atmosférica, variável com a temperatura.

A umidade absoluta é a quantidade de água contida num volume de ar a uma certa temperatura. A umidade de saturação do ar com vapores de água é aquela umidade, onde começa a condensação. A umidade de saturação, ou máxima é o maior valor da umidade absoluta.

Normalmente, o ar contém uma quantidade de vapor inferior à quantidade máxima. A proporção entre a quantidade de umidade efetiva e a máxima é a umidade relativa (para um certo momento, numa certa região, e a uma certa temperatura).

#### 3.2. Estrutura da Água (17)

A água é uma substância peculiar, fato gerado pelas características especiais dos seus componentes, oxigênio e hidrogênio, e pela sua estrutura molecular incomum.

O oxigênio é o mais importante fator energético, sendo as reações de oxidação a base dos combustíveis e da respiração dos seres vivos. A sua distribuição eletrônica é: Ks 2; Ls-2; Lp-4.

O hidrogênio é também um elemento singular, devido ao fato de possuir um só elétron. No átomo de hidrogênio, o elétron ocupa o orbital de mais baixa energia, que corresponde ao número quântico 1. O próton de hidrogênio é um simples núcleo sem elétrons. Os íons positivos dos outros átomos possuem um casco envolvente de elétrons

e, por isto, eles têm um volume maior do que o próton. No próton, a carga positiva está concentrada num volume extremamente pequeno. Por isto, o próton pode chegar tão próximo do íon negativo a ponto de penetrar no casco do íon negativo e formar uma ligação covalente. É o que se passa na formação da molécula de água, com a ligação covalente entre átomo de oxigênio e os dois átomos de hidrogênio, cujos prótons penetram no casco do oxigênio.

A água mais comum é aquela de fórmula  $H_2O$ . São conhecidos isótopos de hidrogênio - deutério e trítio - mais pesados do que o isótopo comum de hidrogênio. A fórmula da água torna-se  $D_2O$  (água pesada, encontrada em pequenas quantidades, como jazida na Noruega, nos gelos polares, eternos) e  $T_2O$ , encontrada em minúsculas quantidades.

O oxigênio ocorre sob forma de três isótopos  $O_{16}$ ,  $O_{17}$  e  $O_{18}$ . Combinando os isótopos de hidrogênio com os de oxigênio resulta uma variedade de águas.

A molécula de água possui um ângulo entre os dois átomos de hidrogênio de  $105^\circ$  e a distância entre o centro do átomo de oxigênio e cada átomo de hidrogênio é de  $0,99 \text{ \AA}$  (Figuras 3.01; 3.02; 3.03.).

O centro de carga elétrica positiva da molécula de água não coincide com o centro da carga negativa; desenvolve-se um momento elétrico e uma estrutura assimétrica de carga, que lhe confere a característica de "dipolo". As moléculas que são do tipo dipolo são orientadas: elas possuem partes polares tendo a estrutura polar.

Entre as moléculas de água aparece então uma ligação de natureza eletrostática, chamada "ponte de hidrogênio". O átomo de hidrogênio, ou mais exatamente, o seu próton, de carga positiva concentrada, exerce uma atração eletrostática fortíssima sobre os elétrons não participantes dos átomos fortemente negativos de oxigênio. Assim, as moléculas de água são atraídas umas às outras, podendo-se imaginar que a água contida num reservatório, é semelhante a uma enorme molécula.

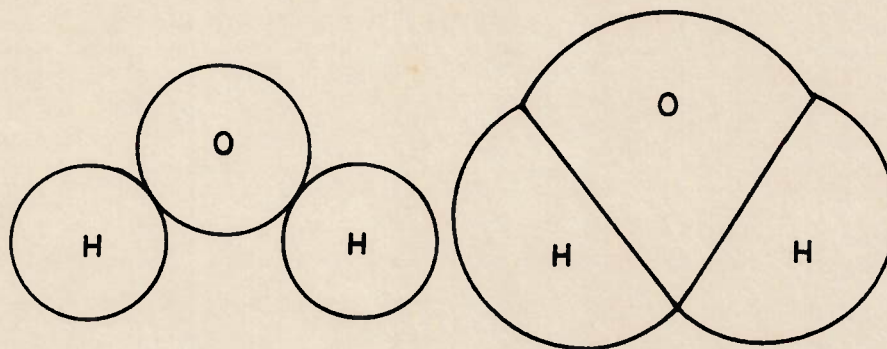


Figura 3.01. (17) Molécula de água

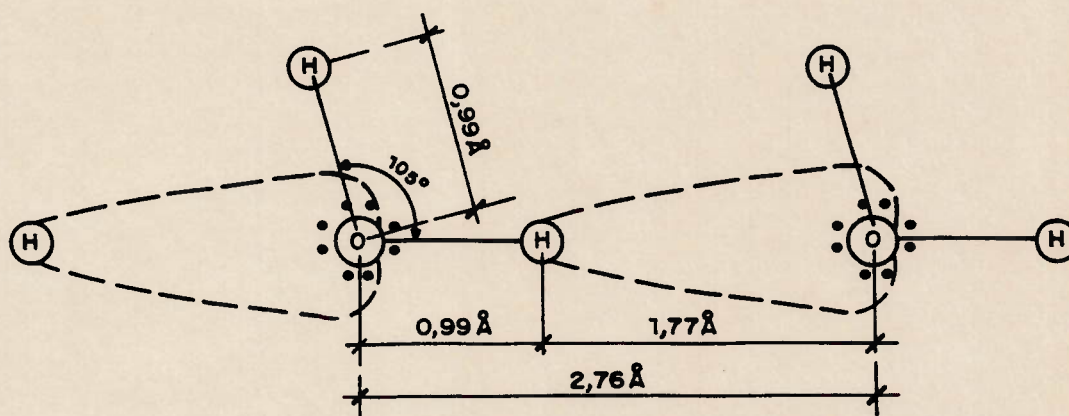
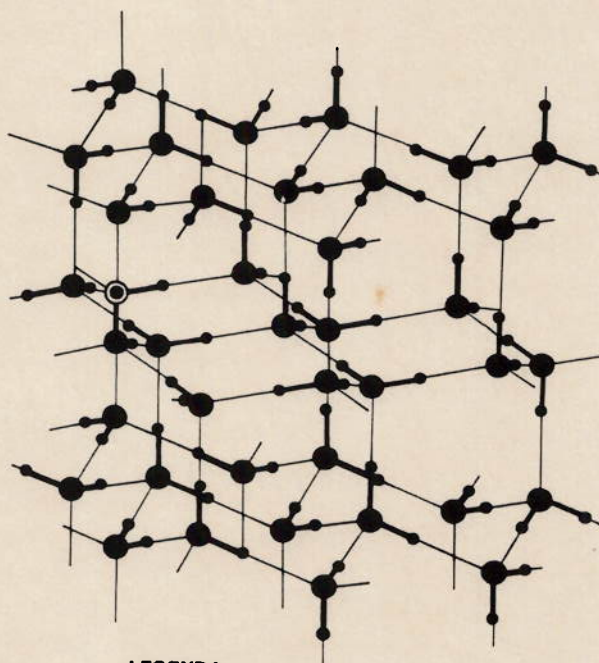
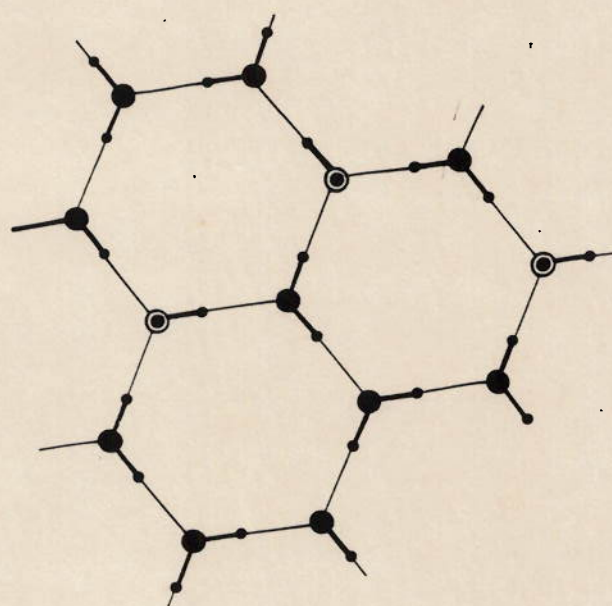


Figura 3.02. - Moléculas de água. Distância entre os núcleos dos átomos que formam a molécula. Pontes de hidrogênio entre as moléculas

A estrutura da água explica as suas propriedades, conforme será apresentado nos itens seguintes.



**LEGENDA**

- Átomo de Oxigênio
- Átomo de Hidrogênio
- ⊙ Átomos de Oxigênio e Hidrogênio sobrepostos (em planos perpendiculares)

Os átomos de hidrogênio no cristal de gelo são orientados aleatoriamente. Não há células unitárias para os núcleos de hidrogênio (com base da medição de entropia residual do gelo). As moléculas são um pouco reduzidas como tamanho para clareza.

Figura 3.03. (17) Estrutura do cristal de gelo (a) vista de cima, (b) vista lateral.

### 3.3. Propriedades Físicas da Água

A tabela 3.1. indica as principais propriedades físicas da água.

Tabela 3.1. (18; 19) - Algumas Propriedades da Água Líquida, a 1 atm

Propriedades	Valor
calor de formação [KJ / mol a 25°C]	285,89
constante iônica de dissociação [ $\text{mol}^{-1}$ a 25°C]	$10^{-14}$
calor de ionização [KJ / mol a 25°C]	55,71
momento aparente do dipolo [Debyes]	1,87
viscosidade [cP a 25°C]	0,8949
velocidade do som [m/s a 25°C]	1496,3
densidade [ $\text{g} / \text{cm}^3$ a 25 °C]	0,997951
densidade [ $\text{g} / \text{cm}^3$ a 0 °C]	0,99987
ponto de solidificação [°C]	0,00
ponto de ebulição [°C]	100,00
calor específico, a volume constante [J/g °K a 25°C]	4,17856
condutividade térmica [W/cm °K a 20°C]	0,00598
temperatura de máxima densidade [°C]	3,98
constante dielétrica a 17°C e 60 MHz	81,0
condutividade elétrica [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ , a 25°C]	$<10^{-2}$
pressão de vapor [a 20°C, mm Hg]	17,5
temperatura crítica (vapor) [°K]	647,0
pressão crítica (vapor) [At]	218,5
volume crítico (vapor) [ $\text{cm}^3$ ]	57,0
calor latente de ebulição [cal/g]	538,9
calor latente de fusão [cal/g]	80,0

Outras propriedades físicas da água também apresentam peculiaridades. Entre elas, destacam-se as mostradas nas Tabelas 3.2. e 3.3.

Tabela 3.2. (18) - Pressão de Vapor da Água

Temperatura °C	Pressão mm Hg	Temperatura °C	Pressão At
0	4,6	100	1,00
10	9,2	120	1,96
20	17,5	150	4,70
30	31,5	200	15,30
40	55,1	250	39,30
60	149,2	300	84,40
80	335,1	359	176,30
100	760,0	374 (temperatura crítica para a fase líquida)	217,0

Tabela 3.3. (18) - Calor Latente de Ebulição de Alguns Líquidos [cal/g]

H <sub>2</sub> líquido	100	água	538,9
O <sub>2</sub> líquido	51	álcool	202
N <sub>2</sub> líquido	48	éter	90
Cl líquido	67	benzeno	94,5
CO <sub>2</sub> líquido	142	clorofórmio	80
Hg líquido	68		

As fortes ligações (ponte de hidrogênio) das moléculas de água são responsáveis pelo alto ponto de ebulição da água e pelo alto calor latente de ebulição.

### 3.3.1. Solubilidade

A solubilidade de várias substâncias na água varia entre grandes limites. Ela cresce com a temperatura. A Figura 3.04. indica a solubilidade de várias substâncias na água, dependendo da temperatura.

Deve-se observar que a água é um solvente universal (fator solubilizador) para eletrólitos (substâncias que dissociam-se em íons). As moléculas de água, após

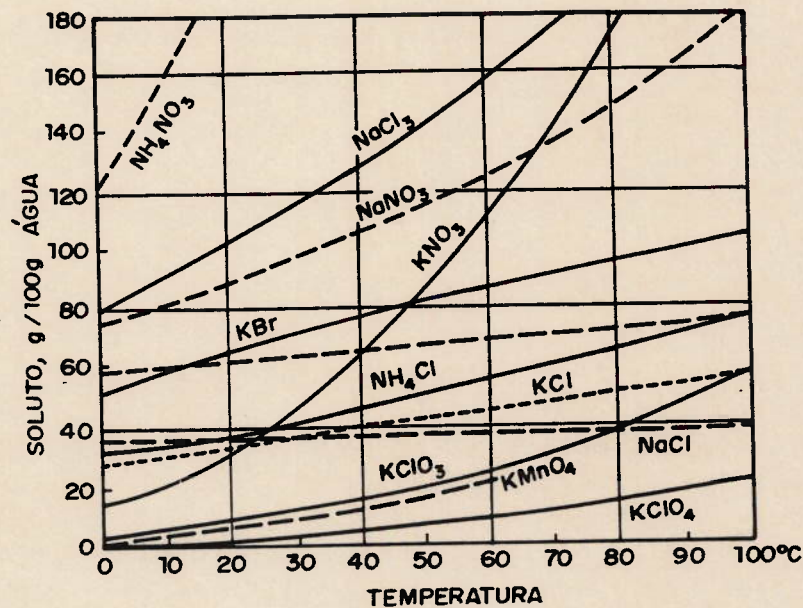


Figura 3.04.<sup>(18)</sup> - Curvas de solubilidade de alguns sais na água

dissociação, agem como íons livres tendo carga negativa do lado do oxigênio e carga positiva do lado do hidrogênio. O eletrólito dissocia-se em cátions e ânions, cada um sendo orientado para os íons da água de sinal contrário. Assim, a água torna-se uma "gaiola", a qual separa e neutraliza os íons, o que explica ser a água um solvente excelente para eletrólitos do tipo NaCl, por exemplo. Este tipo de solubilização, dissociação iônica em água e a orientação dos íons da água em relação aos íons do soluto, chama-se de solvatação. No caso específico da água, a solvatação chama-se hidratação.

Nos cristais com rede iônica as forças eletrostáticas são fortes. A solubilização é fácil quando as forças de solvatação, desenvolvidas pelo solvente, são maiores do que as forças eletrostáticas existentes na rede iônica (caso do cloreto de sódio). Ao

contrário, quando as forças de solvatação são menores do que as forças da rede, a solubilização é difícil (caso do cloreto de prata).

Outra categoria de substâncias solúveis em água é formada por aquelas que possuem o grupo oxidrila (OH), capazes de formar a ponte de hidrogênio com as moléculas de água (álcoois, carboidratos etc.).

Outras substâncias são pouco solúveis em água, como é caso de hidrocarbonetos. Porém, constatou-se a solubilização de metano em água. Até recentemente, a noção de solubilização era ligada às forças desenvolvidas pelo solvente, superiores às ligações do soluto. A presença do metano em solução aquosa não se deve as forças de atração, mas à quebra da estrutura da água (das pontes de hidrogênio), o que permite a formação de regiões isoladas onde entra a molécula de metano.

### 3.3.2. Resistências e Condutibilidades

A água pura é um isolante. Sabe-se, da prática, que a água industrial é, de fato, um bom condutor. A condutibilidade elétrica da água deve-se às impurezas contidas. Desta feita, na Tabela 3.4. faz-se menção à "água em estado puro".

Tabela 3.4. (18) - Resistências e Condutibilidades

Substância	resistência específica $\Omega \times \text{cm}$	condutibilidade específica $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$	classe do condutor
Ag	0,00000166	602 000	condutores
Cu	0,00000178	562 000	metálicos
Zn	0,00000610	164 000	
carvão de retorta	0,005	200	
NaCl (fundido)	0,30	3,33	eletrólitos
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 1 normal	2,5	0,4	
KCl - 1 normal	10,0	0,1	
água em estado puro	$2,5 \times 10^7$	$4 \times 10^{-8}$	isolantes
vidro	$5 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-12}$	
enxofre	$4 \times 10^{15}$	$2,5 \times 10^{-16}$	



### 3.3.3. Constante Dielétrica

A força de atração  $F$  [gf] entre íons de carga oposta  $q_+$  e  $q_-$  [coulombs] é dada pela fórmula:

$$F = (q_+ q_-) / (4 \pi \epsilon r^2) , \quad [3.1.]$$

onde:  $\epsilon$  = constante dielétrica do meio [adimensional], (04),  
 $r$  = distância entre íons [cm].

A água possui uma constante dielétrica (adimensional) muito grande, conforme os valores abaixo (18):

benzeno	éter	álcool	ácido fórmico	água	ácido cianídrico
2,3	4,1	25	62	80	96

Por este motivo, a força de atração  $F$  entre íons do soluto é muito fraca e a solubilização é forte. Mas não só o valor do  $F$  ou  $1/\epsilon$  é importante. A capacidade de solvatação é também decisiva. O ácido cianídrico tem  $\epsilon$  maior do que a água, mas a fraca solvatação o torna uma substância solubilizadora fraca. A ligação de hidrogênio e o caráter de dipolo da molécula de água favorecem a solvatação.

### 3.3.4. Anomalias físico -químicas da água e o meio ambiente (04)

Algumas anomalias físico - químicas da água influem sobre o meio ambiente. O Quadro 3.5. indica a correlação entre as suas propriedades e o significado ambiental.

### 3.3.5. Outras Propriedades Físicas

Muitas propriedades físicas são importantes nos sistemas água-minério e serão discutidas nos capítulos seguintes (p.ex. viscosidade, propriedades reológicas, propriedades elétricas na interface água-minério, molhabilidade etc.).

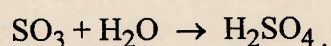
Quadro 3.5. (04) - Algumas Anomalias da Água e Efeito sobre o Meio Ambiente

Propriedade	Comparação com outros líquidos	Significado ambiental
estado de agregação	líquido mais do que gás	constitui um meio vital
capacidade calórica	alta	modera temperaturas ambientes, um bom reservatório de calor
calor latente de ebulição	alto	efeito moderador sobre a temperatura
densidade	máxima a 4°C	a água congela apenas na superfície, a vida aquática continua para temperaturas atmosféricas menores de 0°C
tensão superficial	alta	importante para efeitos de superfície p.ex. formação de gotas
constante dielétrica	alta	um bom solvente para compostos iônicos e polares
hidratação	extensiva	um bom solvente, mobilização dos poluentes iônicos
dissociação	muito reduzida	constitui um meio quase-neutro, mas um bom meio para propriedades ácidas e básicas
condutibilidade térmica	alta	um material importante de transferência de calor nas células vivas.

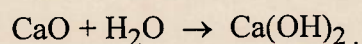
### 3.4. Propriedades Químicas da Água (18; 20)

A água reage com alguns elementos não-metálicos e com muitos metais.

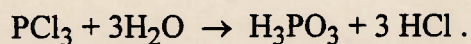
Com os óxidos de não-metals, a água reage formando ácidos:



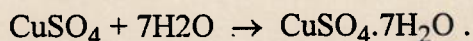
Com os óxidos de metais alcalinos e alcalino-terrosos, a água forma bases, por exemplo:



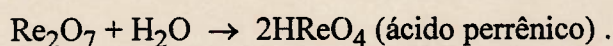
Com muitas substâncias, a água reage por dupla decomposição (hidrólise):



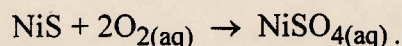
A água cristaliza junto com algumas substâncias, gerando substâncias hidratadas com água de constituição:



Na hidrometalurgia, a água constitui um lixiviante de produtos da ustulação (21):



A água, na presença do ar ou  $\text{O}_2$ , sob pressão e a  $150^\circ\text{C}$ , participa na solubilização dos sulfetos, convertendo-os em sulfatos:



A água oxida a pirita, a temperatura relativamente baixa ( $80^\circ\text{C}$ ), substituindo a ustulação e a produção nociva de  $\text{SO}_2$  (21). A Figura 3.05. mostra o efeito do pH sobre a proporção  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Fe}^{2+}]$ . As reações (extremas) de oxidação ocorrem conforme as equações:

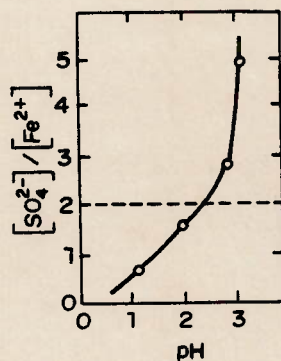
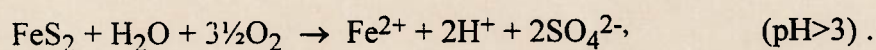
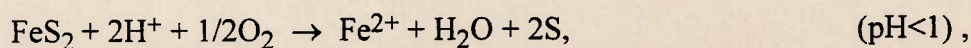


Figura 3.05. (21) - Efeito do pH na oxidação aquosa da pirita

#### 4. PRESENÇA MECÂNICA DA ÁGUA NOS SISTEMAS ÁGUA-MINÉRIO

Propriedades e fenômenos que caracterizam o minério, tais como porosidade, permeabilidade etc., são de grande importância para o sistema água-minério, principalmente para as suspensões.

##### 4.1. Umidade (22)

A umidade é a fração ou a porcentagem de água difusa num sólido ou sobre um sólido. A umidade do minério é constituída pela água retida nos poros, na superfície ou entre as partículas de minério (22).

A expressão da umidade (base seca), é dada pela fórmula:

$$u = (a / S) \times 100 , \quad [4.1.]$$

onde:

u = umidade [%],

S = massa de sólidos,

a = massa de água.

Muitas vezes, tendo em vista o baixo valor de u, confunde-se a umidade base seca, assim definida, com a umidade base úmida, dada pela fórmula:

$$u = [a / (S + a)] \times 100 . \quad [4.2.]$$

Para valores reduzidos de a, os valores de u da fórmula [4.1.] e do u da fórmula [4.2.] confundem-se. Para valores maiores de a, é preciso definir claramente a base da umidade utilizada.

A umidade que ocorre na superfície dos minérios provém do seu manuseio ou processamento (moagem, concentração). A umidade, quando superficial, pode ser removida, com certa facilidade, por escoamento livre. Ela pode ser removida também, pela corrente de ar, que satura-se com partículas de água; o grau de retirada da água

depende da umidade relativa da correnteza do ar; a elevação da temperatura do ar aumenta a sua capacidade de absorção da água superficial.

O processo de escoamento livre tem um custo baixo, sendo utilizado no desaguamento de materiais com partículas maiores de 0,5 mm, sem lamas e de estrutura não absorvente (por exemplo, pirita, carvão).

A corrente de ar envolve o custo para movimento do ar e o investimento em ventiladores e tubulações.

O processo que utiliza uma corrente de ar carregada com vapores de água pode reduzir a umidade da torta dos filtros de 14 % a 11 %, ou mesmo até 6 %. Este processo é conhecido como "secagem a vapor" ("steam drying") (23). A aplicação industrial da secagem a vapor foi realizada na usina de *Cleveland-Cliffs* (1974) (24) e na *M.B.R. - Águas Claras* (anos 1980, MG), na filtragem do concentrado de hematita. Hoje, o processo é considerado obsoleto.

A secagem consome, teoricamente, 575 kcal/kg de água evaporada. A prática conduz a 1.000 - 1.200 kcal/kg de água evaporada, dependendo da eficiência térmica. O custo principal, atualmente, estimado em cerca de US\$ 0,04/kg de água evaporada depende do preço do combustível.

A umidade é importante em operações como britagem, peneiramento, concentração a seco, no desaguamento e na secagem.

Na britagem e peneiramento, para estágios mais finos ( $-\frac{1}{2}$ " ) e para material com aspecto terroso, a umidade acima da faixa de 7 - 9 % pode dificultar a operação.

A concentração eletrostática, sendo a seco, exige a remoção completa da umidade.

A umidade determina os estágios de desaguamento.

A secagem elimina a umidade abaixo de 1 %.

## 4.2. Água nos Poros dos Minérios (25)

A porosidade é a proporção do volume dos espaços existente entre as partículas minerais em relação ao volume total (minério + poros).

Os minérios são sistemas porosos. Os poros, quando não há água disponível, são preenchidos por ar. Quando há água, ela tende a ocupar o espaço poroso. A porosidade total  $n$  é a razão do volume dos poros  $V_p$  pelo volume aparente do minério  $V_{ap}$ :

$$n = V_p / V_{ap} \quad [4.3.]$$

Sabendo que  $V_S$  é o volume do sólido vamos ter:

$$V_{ap} = V_S + V_p \quad [4.4.]$$

Quando conhecemos o peso específico do sólido  $d_S$ , o peso aparente do mesmo  $d_{ap}$  das equações [4.3.] e [4.4.] será:

$$d_{ap} = d_S (1 - n) \quad [4.5.]$$

Quando a água preenche os poros, a densidade aparente do minério  $d_{ap}$  aumenta devido à contribuição da água:

$$d'_{ap} = d_S (1 - n) + (n \times 1) \quad [4.6.]$$

Nos poros, a água se apresenta sob vários estados físicos, dos quais mencionamos:

- água livre apresentando menisco plano, que se encontra sob a ação única da força gravitacional; ela pode ser retirada por gravidade e,

- a água retida, que ocorre sob as formas capilar e adsorvida.

O índice de remoção da água contida nos poros indica a facilidade de desaguamento de um certo minério, sendo:

$$c_a = (m_u - m) / m \quad [4.7.]$$

onde:

$c_a$  = índice de remoção da água (fração),

$m_u$  = massa do minério úmido,

$m$  = massa do minério após a remoção da água.

### 4.3. Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida como a capacidade de um minério ou rocha de permitir o trânsito de um fluido (ar, água ou solução).

O conceito de porosidade inclui todos os tipos de espaços intersticiais existentes no minério ou na rocha - sejam primários (originais), resultado da ação de forças geológicas, mecânicas e químicas sobre a rocha original, ou sejam secundários, resultado do intemperismo recente e/ou da ação técnica. Os interstícios secundários (porosidade secundária) são aqueles que permitem a circulação de fluidos através da rocha ou minério. Eles geram o fenômeno de permeabilidade (08).

O grau de permeabilidade depende do tamanho e da forma dos poros, e da interconexão entre os mesmos. Mede-se pela quantidade de um líquido, de viscosidade padrão, que percorre uma certa distância, através de um certo minério ou rocha, num certo intervalo de tempo.

A porosidade total, do ponto de vista da permeabilidade, é composta da porosidade de água retida,  $n_r$ , e da porosidade de água livre ou porosidade eficaz,  $n_l$ :

$$n = n_r + n_l , \quad [4.8.]$$

O fator  $n_r$  diz respeito, na maioria dos casos, à porosidade primária geológica e  $n_l$ , à porosidade secundária.

A permeabilidade depende de  $n_f$  e não de  $n$  total. Assim, as argilas, com  $n$  alto, possuem uma permeabilidade extremamente reduzida, praticamente sendo toda água retida,  $n_r$ <sup>(26)</sup>.

Para minérios com poros relativamente grandes, a permeabilidade é dada pela fórmula (08):

$$K = (d_l / \eta) k_i \quad [4.9.]$$

onde:

$K$  = coeficiente de permeabilidade [cm /s],

$d_l$  = peso específico do líquido [ $g_f / cm^3$ ],

$\eta$  = viscosidade dinâmica do líquido [ $g_m / cm s$ ],

$k_i$  = permeabilidade intrínseca, dependendo da porosidade do material da distribuição granulométrica do leito, da inter-conexão entre poros e da área específica [ $m^2/m^3$ ] dos poros.

Outra forma de expressar a tendência de permeabilidade é através da relação de *Kozeny*<sup>(26)</sup>, a qual indica os parâmetros e as variáveis que influem o coeficiente de permeabilidade:

$$K = b [n / (z A_s^2)] \quad [4.10.]$$

onde:

$b$  = coeficiente dependendo da forma dos poros,

$z$  = fator de tortuosidade,

$A_s$  = área específica dos poros,

$n$  = porosidade.

Para minérios com granulometria fina, foi proposta a relação:

$$v = C (d_l / \eta) [e^3 / (1 + e)] (1 / A_s^2) i \quad [4.11.]$$

onde:

$v$  = velocidade de escoamento [cm/s],

$C$  = coeficiente de forma dos poros (para cilíndricos,  $C = 0,5$ ) [adimensional],

$d_l$  = peso específico da água [ $g_f/cm^3$ ],

$\eta$  = viscosidade dinâmica da água [ $g_m/cm s$ ],

$e$  = fator de porosidade [adimensional],

$A_s$  = área específica dos poros [1/cm],

$i$  = caimento (declive piezométrico, ou seja diferença de nível/comprimento) [adimensional].



A permeabilidade, e conseqüentemente a porosidade, são propriedades importantes nos processos de tratamento de minérios e na hidrometalurgia.

No tratamento de minérios, a permeabilidade e a porosidade são importantes nas operações de filtração, na construção das barragens de rejeitos, na proteção do lençol freático contra as infiltrações nocivas de polpa e/ou soluções, nos processos que implicam leitos fluidizados ou em movimento (jigagem). Alguns processos de secagem precisam de certa porosidade natural ou gerada.

A hidrometalurgia, em mais de 50 % dos casos, ocorre sob forma de percolação em tanques, pilhas, ou "in situ" (Au, U, Cu). Um fator importante que afeta a percolação é a permeabilidade do leito, dada pela fórmula de *Darcy*:

$$v = (K/\eta)(\Delta P/L) , \quad [4.12.]$$

onde:

$v$  = vazão por área unitária do leito [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ],

$K$  = permeabilidade do leito [ $\text{cm}^2$ ] (27),

$\eta$  = viscosidade dinâmica do fluido [ $\text{g}_m \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$ ],

$\Delta P$  = diferença de pressão [ $\text{g}_f \text{cm}^{-2}$ ],

$L$  = espessura do leito [cm].

#### 4.4. Sedimentação

##### 4.4.1. Definição e Características

A sedimentação define o processo de separação de partículas sólidas de uma suspensão, através da qual obtém-se um líquido relativamente claro e uma polpa densa contendo quase a totalidade das partículas minerais (25).

A força geradora da sedimentação é a força da gravidade. Um papel importante é aquele da viscosidade do fluido. Os critérios que definem o processo de sedimentação são:

- Critério de *Froude* ( $Fr = v^2 / l g$ ;  $v$  = velocidade de sedimentação,  $l$  = comprimento,  $g$  = aceleração da gravidade);

- Critério de *Reynolds* [ $Re = (v d \rho) / \eta$ ;  $v$  = velocidade de sedimentação,  $d$  = tamanho da partícula,  $\eta$  = viscosidade dinâmica do fluido,  $\rho$  = densidade mássica da partícula] (27).

O critério de *Reynolds* define os regimes laminar, turbulento e de transição do movimento relativo água - minério. Para valores reduzidos do número *Reynolds* (para sedimentação -  $Re < 1$ ), o regime é laminar (regime de Stokes). Na maioria dos fenômenos de sedimentação  $Re < 1$ . As principais fórmulas no regime de *Stokes* são, conforme a literatura técnica, encontradas nos cursos didáticos:

- valor do coeficiente de resistência mecânica do fluido ou *drag factor*,  $f_d$ ; alguns pesquisadores, sobre tudo os europeus, utilizam a fórmula:

$$f_d = 24 / Re \quad (28; 79) , \quad [4.13.]$$

outros, principalmente os americanos encontram o valor do  $f_d$  como sendo menor:

$$f_d = 12 / Re \quad (25) , \quad [4.14.]$$

as duas fórmulas indicam o valor do  $f_d$  como proporcional ao inverso do número de Reynolds;

- valor da velocidade terminal (a maior velocidade de sedimentação da partícula):

$$v_o = [1 / (18 \eta) d^2 (d_s - d_l) ] , \quad [4.15.]$$

onde:

$v_o$  = velocidade terminal, [cm/s],

$\eta$  = viscosidade dinâmica, [g/cm s],

$d$  = diâmetro da partícula, [cm],

$d_s$  = peso específico do sólido, [g/cm<sup>3</sup>],

$d_l$  = peso específico do líquido, [g/cm<sup>3</sup>];

- tempo necessário para alcançar a velocidade terminal:

$$t_0 = 5 v_0 / g_0 , \quad [4.16.]$$

$$g_0 = g [1 - (d_s / d_f)] , \quad [4.17.]$$

### Sedimentação Impedida

A expressão da velocidade terminal  $v_0$  foi deduzida partindo-se da hipótese de que a partícula se move livremente numa massa muito grande de fluido e que a seção da partícula é desprezível em relação à seção do fluido, ou seja, do recipiente que contém o fluido onde ocorre a sedimentação.

Quando a seção do recipiente não é muito maior do que a soma das seções das partículas, toma-se em conta o efeito produzido pelo fluido deslocado, no sentido ascendente, resultado da sedimentação de massa sólida; nesse caso, a velocidade terminal impedida  $v'_0$  será:

$$v'_0 = \theta v_0 , \quad [4.18.]$$

onde:  $\theta$  é um fator subunitário.

Uma das fórmulas da sedimentação impedida utilizada é (29):

$$v'_0 = v_0 f(\epsilon) . \quad [4.19.]$$

A velocidade terminal impedida depende do valor da porosidade  $\epsilon = 1 - S_v$ , onde  $S_v$  é a fração em volume do sólido.

Para partículas não floculadas:

$$f(\epsilon) = \epsilon^2 \times 10^{-1,82(1 - \epsilon)} \quad (25). \quad [4.20.]$$

#### 4.4.2. Espessamento

O processo mais utilizado no desaguamento, aproveitando a sedimentação, é o espessamento.

O espessamento visa dois objetivos:

- (1) a obtenção de um sobrenadante *overflow* (OF) clarificado e,
- (2) a obtenção de um *underflow* (UF) denso.

O espessamento permite a reciclagem da água e o adensamento do produto para processos que requerem uma porcentagem maior de sólidos, para economia de transporte de rejeitos até a bacia e/ou de concentrados por tubulação.

O espessamento é uma operação relativamente simples quando a alimentação do espessador é isenta de material extremamente fino ou colóides e lamas. Quando a operação é mais complicada, devido aos finos, ou torna-se impossível, recorre-se à floculação, como processo auxiliar e/ou simultâneo com o espessamento. A formação de flóculos, inicialmente com coagulantes inorgânicos, entre eles a cal (CaO), é seguida da floculação com polímeros (30).

#### 4.4.3. Aceleração da sedimentação

Entre os métodos utilizados ou em fase de pesquisa adiantada, cita-se a floculação e a sedimentação em água salina.

#### Floculação

Os sólidos particulados de granulometria fina têm os fenômenos superficiais acentuados, tais como a área de superfície e, conseqüentemente, as quantidades de cargas elétricas superficiais maiores.

Quando as cargas elétricas são de sinal contrário, ocorre uma aproximação, promovida pelo movimento browniano e formam-se glomérulos de área específica menor e com velocidade de sedimentação razoável.

Quando as cargas são do mesmo sinal, as partículas finas repelem-se e não sedimentam.

Para formar flóculos é preciso fornecer cargas elétricas opostas às das superfícies de partículas, através de eletrólitos (sais solúveis de  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , tais como sulfatos e carbonatos), chamados coagulantes.

Em casos difíceis, utilizam-se polieletrólitos sob forma de polímeros orgânicos. Eles operam com bons resultados, quando a cadeia do polímero é suficientemente grande, quando há boa agitação e quando existe afinidade do polímero com a superfície mineral (30).

Na sedimentação sem floculantes, a razão de espessamento depende da área de sedimentação. No caso de sedimentação com floculantes, é importante o tempo de contato polpa/floculantes, para a obtenção da eficiência ótima (ppm no OF versus volume do reator) (31).

Admitindo um certo valor de ppm em suspensão, calcula-se em termos econômicos, na base de testes, o tempo de residência e a velocidade de sedimentação.

Utilizam-se gráficos do tipo de uma família de curvas "sólidos em suspensão ppm =  $f$  (velocidade de sedimentação)", para vários tempos de residência, elementos que permitem o dimensionamento dos espessadores.

#### Sedimentação em Água Doce e Marinha

A Universidade de Vancouver, Canadá, tem conduzido testes de comportamento da sedimentação de rejeitos com e sem magnetita residual em água doce, água de mar e água doce contendo 1,8 % e 5,4 % água de mar (32).

A salinidade mede-se indiretamente, pela condutividade elétrica das águas. Os resultados são indicados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. (32) - Condutividade elétrica de águas de diversas salinidades

Água testada	Condutividade sem magnetita no rejeito [ $\mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ]	Específica com magnetita no rejeito [ $\mu\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ]
água destilada	4	40-80
água procedente de Vancouver	12	40-80
água de mar natural, filtrada	46.000	46.000
água de mar sintética	49.000	49.000
água da cidade + 1,8 % água de mar	1.200	1.300
água da cidade + 5,4 % água de mar	2.400	2.800

A Figura 4.01. mostra as curvas de sedimentação em água doce e em água doce misturada com água do mar. Observa-se o efeito da floculação estimulada pela salinidade, mesmo em quantidade reduzida.

A Figura 4.02. marca a sedimentação na presença da magnetita residual. Os melhores resultados são obtidos na presença da magnetita o que indica uma floculação das partículas como resposta do magnetismo.

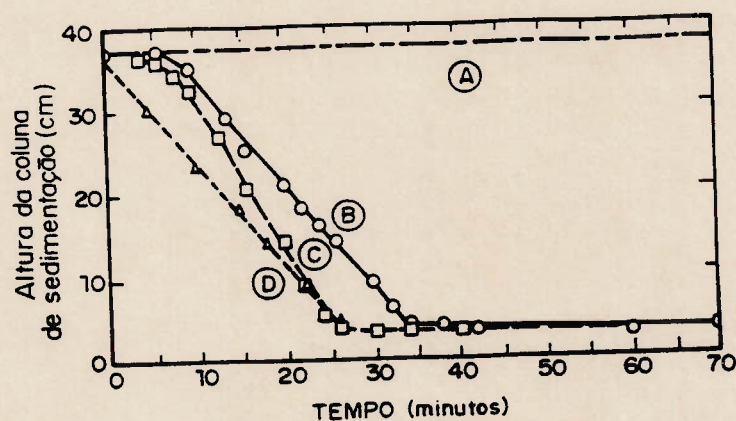


Figura 4.01. (32) - Curvas de Sedimentação (resíduo com 6% sólidos) A - água fresca; B - 1,8 % água do mar; C - 5,4 % água do mar; D - 100% água do mar com magnetita residual.

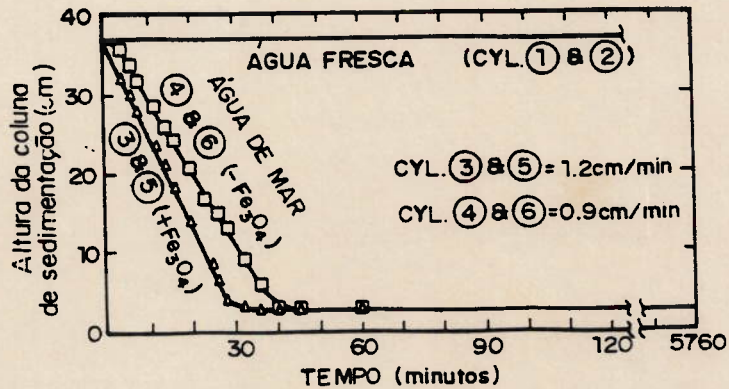


Figura 4.02. - (32) Curvas de Sedimentação (resíduo com 6% sólidos) (1) e (2) - água fresca com e sem magnetita; (3) e (5) água do mar, artificial e natural, (com magnetita); (4) e (6) água do mar, artificial e natural (sem magnetita).

#### 4.5. Lamas no Tratamento

##### 4.5.1. Noção de Lama

Pode-se definir como lama a mistura de partículas sólidas finas e de água em estado de consistência fluida<sup>6</sup>.

No tratamento de minérios a lama é a fração mineral fina que ocorre nos processos a úmido e dificulta as operações.

A lama difere com o tipo de minério e com o processo utilizado.

A granulometria da lama é extremamente variável: -3  $\mu\text{m}$  em geral; para fosfatos, -44  $\mu\text{m}$  ou -12  $\mu\text{m}$ ; para lixiviação "areia-lamas" -74  $\mu\text{m}$ ; para hematita -10  $\mu\text{m}$ ; -0,5 mm para carvão (24: 33).

<sup>6</sup> A definição refere-se a polpa contendo sólidos finos, que não sedimentam.

Há uma divisão de formação de lamas: lamas primárias, de jazimento, de intemperismo, presença de argilas, sulfetos ou outros minerais descompostos etc.; lamas secundárias, geradas pelo processo extrativo (jatos de água, moagem).

No caso de classificação (ciclones p.ex.) <sup>(34)</sup>, aceita-se a idéia que a água, no "overflow" (OF) e no "underflow"(UF), carrega os finos. Como a quantidade de água no UF é reduzida, a quantidade de finos no UF será também reduzida, mas não desprezível. As curvas de partição corrigidas consideram a presença de lamas no UF.

Previamente ao processo de separação em meio denso, descarta-se como lama o material menor que 0,5 mm, no caso do carvão; para manganês, o descarte pode ser de material bem mais fino e, como exceção no caso de sulfetos não ferrosos, menor que 1 mm (caso do minério de Morro Agudo) <sup>7</sup>.

#### 4.5.2. Efeito da presença de lamas em vários processos.

As lamas são de difícil tratamento, no sentido de extração de bens minerais. Assim, acima de 10 % de Fe hematítico perde-se como lama (partículas de 10  $\mu$ m). em torno de 30 % de fosfato ( $P_2O_5$ ) também perde-se como lama ( < 10  $\mu$ m).

Os mecanismos da atuação das lamas são os seguintes:

(a) no caso da flotação, há impedimento do contato entre a superfície mineral e o surfactante: há cobertura com filme inerte da superfície sujeita à ação do surfactante; quando as lamas são do próprio mineral de interesse, o efeito do filme inerte desaparece;

(b) as lamas consomem reagentes em quantidade anti-econômica devido à grande área de superfície <sup>(35)</sup>;

---

<sup>7</sup>O COMINCO, Canadá efetuou testes de concentração em meio denso dos sulfetos (Pb + Zn) precedida por descarte da fração -1 mm. O estudo faz parte dos criterios de projeto da usina da Mineração Morro Agudo.



(c) nos processos gravíticos, a presença de finos conduz a um aumento da viscosidade (redução da fluidez), fato que perturba a separação leves/pesados; a forma das partículas de lama impede o efeito gravitacional (placas flutuando) (36);

(d) na separação em meio denso, as lamas, não respondem às forças gravitacionais, devido à alta viscosidade do meio;

(e) a lixiviação por percolação, quando o minério contém lamas, é impedida, devido ao entupimento dos poros pelas lamas; a queda brusca da permeabilidade do *vat* anula um dos critérios básicos do processo; na lixiviação em pilhas, a lama forma crostas impermeáveis na superfície da pilha e o processo cessa.

Os efeitos negativos da presença de lamas conduzem aos seguintes procedimentos:

(a) necessidade da deslamagem prévia (operação difícil, que conduz a perdas);

(b) cuidados na moagem (moagem em estágios, por exemplo) para diminuir a quantidade de lamas secundárias, e

(c) processos e máquinas que possam operar economicamente com lamas.

#### 4.5.3. Deslamagem

O processo de deslamagem visa a remoção das lamas que constituem impedimento nos processos de concentração, com a obtenção de um produto deslamado e a lama descartável.

Vamos ilustrar o efeito positivo da deslamagem prévia, com um exemplo: na usina de *Bunker Hill e Sullivan* (37), na concentração gravítica:

- a lama removida representa uma perda de massa de 14 % e carrega com ela 15 % do Pb existente na alimentação original;

- o teor do concentrado, após deslamagem subiu de 55 % para 69 % Pb; o teor do rejeito do minério deslamado caiu do 3,3 % para 0,7 % Pb; a recuperação global subiu do 55 % para 76,9 % (37).

A deslamagem é realizada por vários métodos, destacando-se:

(a) cone classificador (precedendo à cianetação do Au);

(b) estágios de ciclonagem (na usina de fosfato de *Jacupiranga*, executa-se deslamagem a 30  $\mu\text{m}$  e as lamas representam aproximadamente 20 % em peso da alimentação e 13 % perdas de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) (38).

(c) classificador tipo "bowl" (classificador + espessador dos finos) para minérios não ferrosos;

(d) ciclones seguidos por espessadores com adição de flocculantes (na usina Rio Paracatu Mineração - RPM, minério aurífero, executa-se deslamagem a -10  $\mu\text{m}$ ).

#### 4.5.4. Medidas na Moagem

Para a remoção de lamas primárias, quando a operação é em grande escala, a moagem autógena precede a classificação (por exemplo: "grès de Bretagne"- *Bailleul* - França, recuperação de Ti e Zr, *Comp. Péchiney*).

Para evitar geração de finos, inclusive lama secundária, utiliza-se moinho com diafragma de descarga (seis sulfetos complexos, *Baia Mare* - Romênia e ARAFÉRTIL, fosfatos, terceiro estágio de moagem, montado em agosto de 1994).

Medidas complementares são constituídas de moagem em estágios, onde cada estágio é seguido por concentração (exemplo: minério de fosfato da ARAFÉRTIL).

#### 4.5.5. Novas técnicas para reduzir perdas nas lamas

As tecnologias modernas recuperam parte dos valores minerais contidos nas lamas por dois métodos:

- (a) equipamentos que processam materiais muito finos;
- (b) processos seletivos para recuperação das lamas.

Entre os equipamentos pode-se citar a centrífuga *Knelson* para ouro, hoje conhecida no Brasil nas empresas e entre os grupos de garimpos (39).

Na RPM (Rio Paracatu Mineração), utilizam-se células de flotação *SKIM-AIR* do *Outokumpu* para *flash flotation*, destinadas, neste caso concreto, para uma flotação rápida (tempo de residência inferior a 1 min) do ouro fino ( $-22 \mu\text{m}$ ; 80 %  $-10 \mu\text{m}$ ) (40).

Quanto a processos do tipo floculação seletiva, menciona-se a usina *Cleveland-Cliffs*, que utiliza o processo *Tilden* para os finos de minério de ferro, combinando a floculação seletiva com a flotação de finos de sílica. A principal separação por floculação seletiva ocorre no primeiro espessador-deslamador, a floculação é seletiva, conduzindo a hematita no UF como flóculos e deixando a sílica sob forma de partículas finas, não floculadas, no OF. O cuidado com a qualidade da água, isenta de suspensões finas, possibilita sua reciclagem em torno de 95 % (24).

Pesquisadores brasileiros (*José Farias de Oliveira e José Inácio de A. Gomes*) (33) testaram um processo semelhante àquele utilizado na *Tilden*, desta vez para fosfatos de Patos de Minas. A recuperação das lamas, para a fração  $-12 \mu\text{m}$ , foi em torno de 50 %, com adição de 1.200 g/t de amido. Modificando-se o pH (de 9 a 10) e com teor mais alto de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , na amostra, a recuperação alcançou quase 60 %. Incorporando na lama ( $-12 \mu\text{m}$ ) a fração  $+12 \mu\text{m} -44 \mu\text{m}$ , a recuperação alcançou 70 %. A terceira fase de testes foi com material fosfático moído a  $-100\#$  ( $150 \mu\text{m}$ ), utilizando a floculação seletiva do fosfato (1.200 g/t amido e 2.000 g/t NaOH), a recuperação em  $\text{P}_2\text{O}_5$  foi superior a 90 %. A floculação seletiva da apatita foi seguida pela flotação da sílica (33).

#### 4.6. Turbidez (41; 42; 43)

Uma polpa contém sólidos, dos quais uma fração sedimenta facilmente e outra fração mantém-se em suspensão por muito tempo. A fração fina, constituindo a suspensão estável, confere ao fluido (água + suspensões) propriedades ópticas, principalmente a redução da intensidade da luz que atravessa o recipiente contendo o fluido. Os distúrbios ópticos constituem a turbidez.

Os distúrbios podem ser naturais ou resultado de operações de beneficiamento. Como causas naturais do aspecto lamacento da água, pode-se destacar a erosão das margens argilosas pelo rio e o desenvolvimento de algas e outros organismos do plâncton. Entre as causas operacionais temos a corrosão, a presença e geração de lamas primárias e secundárias, a presença de colóides no minério etc (08).

Se um receptáculo contém água limpa, a intensidade da luz será  $I_0$ . Para um fluido turvo, a intensidade da luz será  $I < I_0$ . As partículas sólidas absorvem parcialmente a luz reduzindo a sua intensidade.

A medição da turbidez, em termos numéricos, é:

$$T = \log (I_0 / I) = \log I_0 - \log I \quad [4.21.]$$

Normalmente, utilizam-se aparelhos chamados "turbidímetros", os quais são constituídos por uma fonte de luz, um reservatório transparente com a polpa e outro para o fluido padrão (água ou outro). A luz, na saída do reservatório com polpa ou fluido padrão, incide sobre uma célula fotoelétrica, que transforma a intensidade luminosa em corrente elétrica. Devido à proporcionalidade direta entre a intensidade elétrica e a intensidade luminosa incidente sobre a célula fotoelétrica,  $I_0$  e  $I$  são medidos em  $\mu A$ , através de um micro-amperímetro (37).

Algumas precauções, prévias à medição, são necessárias:

- deve-se observar a presença de "corpos negros", os quais absorvem a luz e deformam os resultados;

- os corpos opacos são aqueles que se prestam melhor à medição da turbidez (método chamada de "turbidimetria");

- as partículas inferiores a  $3 \mu\text{m}$  geram fenômenos de difração, que, alteram os resultados; por esta causa, o tamanho inferior que pode participar das suspensões estáveis, deve ser  $3 \mu\text{m}$  ;

- as partículas grandes não são representativas, devido ao fato que, durante a medição, elas podem sedimentar; por este motivo, deixa-se a polpa clarificar por alguns minutos, até que as partículas de tamanho superior a  $D$  sedimentem (geralmente  $D \geq 60 \mu\text{m}$ ).

São utilizadas outras escalas de turbidez. Uma delas toma como padrão a turbidez gerada por 1 g de caulim por um litro de água e comparam-se as intensidades  $I$  com a intensidade  $I'$  da partícula de caulim em água (16).

Outras escalas são conhecidas como *JTU* ("Jackson turbidity units") e *NTU* ("nephelometric turbidity units") (44).

Para os processos de beneficiamento, é importante o fato de a turbidez ser proporcional à área específica das partículas em suspensão. Em muitos casos, a área específica ( $\text{cm}^2 / \text{cm}^3$  ou  $\text{cm}^2 / \text{g}$ ) é mais significativa do que a análise granulométrica. Os processos onde a área específica é importante são a lixiviação, a adsorção CIP no processo de cianetação do ouro, a flotação, a filtração etc.

A relação entre a área específica e a turbidez é dada pela equação:

$$A_s = c (\log I_0 - \log I) , \quad [4.22.]$$

onde:

$A_s$  = área específica do material em suspensão,  
 $c$  = coeficiente de transmissibilidade.

A medição da área específica pela turbidimetria ou medições alternativas utilizando o decréscimo da intensidade luminosa que atravessa uma polpa turva é mais rápido do que outros métodos, e o erro observado é de  $\pm 7\%$  (37).

## 5. FENÔMENOS ELETROQUÍMICOS NA INTERFACE ÁGUA-MINÉRIOS

### 5.1. pH

Os íons de  $H^+$  e  $OH^-$  estão presentes em todas as soluções aquosas. As concentrações de  $H^+$  e  $OH^-$  são iguais em água pura. O  $H^+$  predomina nas soluções ácidas e o  $OH^-$  nas soluções alcalinas. O produto das concentrações iônicas em moles/litro  $[H^+][OH^-]$  é constante e igual a  $10^{-14}$ . O pH é definido como o logaritmo decimal do inverso da concentração de  $H^+$ . Na água pura  $[H^+] = 10^{-7}$  e conseqüentemente, o pH da água pura é igual a 7. Para soluções ácidas,  $pH < 7$  e para soluções alcalinas,  $pH > 7$ .

O pH tem um papel extremamente importante na separação de minerais e na conservação ou destruição de reagentes.

O pH influi marcadamente no processo de flotação, sendo característico para cada minério (minerais úteis e ganga).

A flotação de sulfetos, utilizando xantato como coletor, opera preferencialmente a pH alcalino, o qual impede a decomposição do xantato (45).

Para uso de coletores na base de lípidos de origem vegetal, na flotação de apatita (46) indica-se o valor de  $pH = 10$ .

A flotação de resíduos piritosos do processo alcalino de cianetação foi investigada pela *GENMIN - África do Sul* (47), utilizando coletores tipo amina e mantendo o meio alcalino. O processo convencional constava da acidulação da polpa e da flotação em meio ácido.

A flotação dos minerais portadores de ouro depende do grau de alteração das superfícies. A pirita inalterada é e comporta-se como um sulfeto; a pirita oxidada comporta-se como óxido de ferro. Devido às mudanças no valor do pH, são desejáveis coletores pouco sensíveis ao valor do pH. A ganga também influi sobre a escolha do

pH. Pirofilita flota facilmente a pH = 5 - 5,7. Os sulfetos de cobre e a pirita geralmente flutam em meio alcalino (48).

As<sup>(III)</sup> e As<sup>(V)</sup> são removidos das soluções alcalinas por adsorção pela pirita finamente moída. O pH do meio de adsorção é de 7 - 9 para As<sup>(III)</sup> e de 3,5 a 7 para As<sup>(V)</sup> (49).

Nos processos de lixiviação, o caráter ácido (pH < 7) é importante na solubilização de óxidos de Cu, Mg etc. e o caráter básico é típico para a cianetação do ouro, lixiviação do urânio ou níquel laterítico. No processo de cianetação, a alcalinidade protetora (pH = 10 - 12) evita a decomposição do NaCN (pH  $\cong$  9 - 7), causadora de envenenamentos letais, além do aumento do consumo de NaCN (35).

Alguns processos gravíticos são mais eficientes para certos valores do pH. A Figura 5.01. mostra a variação da eficiência de separação, no aparelho *Bartles-Mozley*, com o pH, apresentando um valor ótimo a pH  $\cong$  7. *Burt* (36) menciona só "minério fino" como objeto do tratamento.

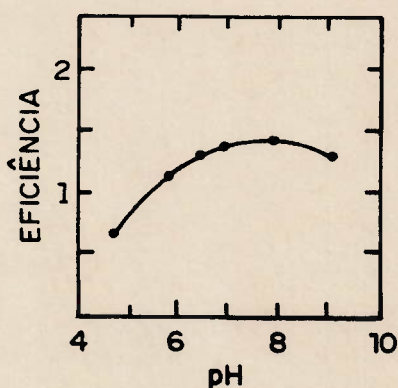


Figura 5.01. (36) - Efeito do pH sobre a eficiência de separação do concentrador *Bartles-Mozley*.

A saída das águas de minas e usinas de tratamento pode gerar águas ácidas, agressivas ao meio ambiente. Por isto a legislação limita o pH dos efluentes. Indica-se, como exemplo, a legislação do estado de Pensilvânia, EUA, já em 1960, colocando o valor mínimo do pH em 6 e o valor máximo em 9 (efluentes de usinas de carvão) (50).

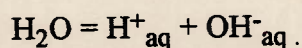
A presença de metais pesados na água de rios depende do pH e da alcalinidade (presença de  $\text{CaCO}_3$ ). A Tabela 5.1. indica a variação do Pb na água dependendo desses dois fatores.

Tabela 5.1. (08) - Efeito do pH e da alcalinidade sobre os níveis de Pb na água de rios.

pH	Pb ppb	alcalinidade, $\text{CaCO}_3$ ppm	Pb ppb
< 6,8	170	< 10	108
6,9 - 7,5	44	10 - 39	42
7,6 - 8,3	32	40 - 99	51
> 8,4	21	100 - 199	28
		> 200	28

## 5.2. Ionização da água (43)

Uma reação muito importante é a ionização da água:



A constante de equilíbrio desta reação é:

$$K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] / [\text{H}_2\text{O}]$$

Os valores de  $K_w$  variam com a temperatura conforme Tabela 5.2..



Tabela 5.2. (43) - Variação da Constante de Equilíbrio com a Temperatura

Temperatura °C	Constante de Equilíbrio $K_w \times 10^{14}$
0	0,1139
5	0,1846
10	0,2920
15	0,4505
20	0,6809
30	1,4690
40	2,9190
50	5,4740
60	9,6240

Nota:  $[H_2O] = 1$ , o valor de  $K_w$  pode ser escrito:  $K_w = [H^+][OH^-]$

### 5.3. Dureza da Água

A dureza da água é resultado da alta concentração de cátions de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ .

A dureza da água é a característica que impede a saponificação, devido à presença de sais de Ca e Mg, os quais formam sabões insolúveis, diminuindo a formação de espuma.

Não se deve confundir a alcalinidade de uma água com a sua dureza.

A noção de dureza foi desenvolvida em relação à água doméstica e à água aquecida nas caldeiras, mas ela não é estranha à flotação.

A utilização de água dura na flotação aumenta o consumo de surfatantes aniônicos adicionados aos coletores (24).

O processo que elimina a dureza da água é o amolecimento ("*softening*").

No processo *Clark e Porter*, o amolecimento realiza-se pela precipitação de  $Ca^{2+}$  como  $CaCO_3$  e de  $Mg^{2+}$  como  $Mg(OH)_2$ , com a utilização de cal (CaO) e barrilha ( $Na_2CO_3$ ). Menciona-se que a precipitação do  $Ca^{2+}$  ocorre quando:

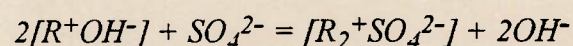
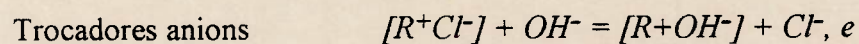
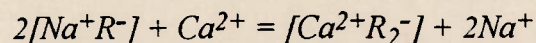
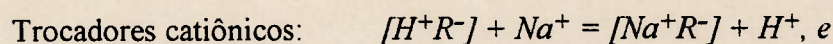
a) o pH é suficientemente alto para diminuir a solubilidade de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ , e

b) quando a  $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{final}} = C_T$  final;  $C_T$  = total das espécies de carbono solubilizado:  $[\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$  (08).

Além da flotação, a dureza da água prejudica o transporte por tubulações onde aparecem crostas até a obstrução da vazão.

Além do processo de precipitação mencionado no início deste item, há o processo de amolecimento através de trocadores iônicos, naturais ou artificiais. São conhecidos sob o nome de "zeólitas" os minerais e de "resinas" os produtos sintéticos que participam do amolecimento da água.

As reações de troca iônica que utilizam resinas orgânicas, sintéticas são (08):



onde:  $\text{R}^-$  e  $\text{R}^+$  simbolizam respectivamente as redes de trocadores aniônicos e catiônicos com carga negativa e positiva, respetivamente. A utilização sucessiva destas reações conduz à desionização da água.

#### 5.4. Corrosividade

A corrosão é a destruição gradativa de um material por dissolução, oxidação ou outros meios atribuíveis a um processo químico. De fato, é um processo

complexo, de natureza eletroquímica. Uma pilha de células secas constitui um modelo analógico da corrosão de metais em água.

Nos processos industriais, há formação de micro-pilhas, com pólos positivos e negativos. Entre os fatores que favorecem a formação de micro-pilhas destacam-se:

- a) presença de oxigênio em um pólo e a sua ausência no outro;
- b) contato entre metais diferentes (propriedades elétricas diferentes);
- c) presença de  $\text{CO}_2$  na água, consequência da queima industrial ou atividade bacteriana;
- d) presença de microrganismos;
- e) nas tubulações, diferença de velocidade, devida à aspereza das paredes (fator de rugosidade, formação de micro-pilhas galvânicas);
- f) meio muito ácido ou muito alcalino;
- g) salinidade da água etc.

Pode-se combater a corrosão pelas seguintes medidas:

- a) retirada do oxigênio dissolvido na água;
- b) neutralização dos agentes agressivos;
- c) remoção dos micro organismos.

No tratamento de minérios, a corrosão afeta os reservatórios, tubulações e máquinas por onde passa a água com características corrosivas. Importante é o consumo de corpos moedores na moagem a úmido (51). É um fato que a moagem a úmido consome muito mais corpos moedores e revestimentos do que a moagem a seco, devido à corrosão.

A sobre moagem elevada, torna a superfície de sulfetos sensíveis ao ataque químico, fenômeno utilizado pela *Kloekner - Humboldt - Deutz (KHD)*, Köln, Alemanha, no desenvolvimento do processo *GLPF (Grinding Leaching Precipitation*

*Flotation*). Utilizam-se moinhos vibratórios e consegue-se a mudança na estrutura cristalina com a subsequente lixiviação ácida do cobre (52).

A empresa *Magotteaux*, Belo Horizonte, analisou detalhadamente o consumo de corpos moedores por abrasão e por corrosão e concluiu que a deformação das bolas após uso indica claramente a ação importante da corrosão.

Pode-se citar o fato de que durante os testes de moagem na METAGO do minério aurífero friável de Paracatu, observou-se um consumo significativo de bolas durante um feriado prolongado, quando não houve operação, e conseqüentemente, nem abrasão.

A *Mintek*, África do Sul, afirma também, que a corrosão é responsável por uma fração importante do consumo de bolas (53).

Não se deve subestimar que cada kg de bolas consumido representa, aproximadamente, US\$ 1,60 e o consumo de 0,5 a 2 kg/t minério moído é uma faixa freqüentemente encontrada (0,80 - 3,20 US\$/t minério ROM).

Em dois casos distintos: um minério com ganga dolomítica moído a  $-56\mu\text{m}$ , e outro minério quartzoso moído a  $-74\mu\text{m}$ :

- para o minério dolomítico, o índice de abrasão de *Bond* é 0,03 e o desgaste unitário de 40g/kWh (51).

- para o minério quartzoso, o índice de abrasão de *Bond* é 0,69 e o desgaste unitário de 125 g/kWh (51).

Resultam desgaste (consumo de bolas) de 896 g/t, respectivamente 2.432 g/t.

Pode-se avaliar, em média, para minérios moídos a -200 #, uma variação do consumo de bolas de 500 a 2000 g/t.

A moagem deve ser cuidadosamente conduzida, evitando-se prolongados tempos de moagem. Observa-se que o aumento da permanência do minério no moinho conduz a modificações da estrutura superficial, no sentido da distorção da rede

cristalina (minerais e metais). Neste caso, os materiais tornam-se menos resistentes à ação corrosiva do meio aquoso. Tanto a abrasão como a corrosão participam, nessa situação, do desgaste das partes metálicas (revestimentos, corpos moedores). Salienta-se que o mesmo minério moído a uma granulometria grossa (40 % -150 #) consome 100 a 150 g/t metal, enquanto que moído finamente (80 % -325 #), conduz a um consumo de 2 - 5 kg aço/t, que representa duas ordens de magnitude a mais do que o consumo de reagentes de flotação (35).

Como se viu, a moagem prolongada que influi sobre a corrosão e indiretamente sobre o aumento do consumo de material ferroso (revestimentos e corpos moedores), pode ainda mais prejudicar a flotação. Assim, o desgaste do metal devido à moagem prolongada conduz a uma fase metálica depositada nas superfícies semi-metálicas dos sulfetos, os quais possuem propriedades semi-condutoras e minúsculos pares galvânicos aparecem. Os pares galvânicos tornam-se altamente ativos na presença de um eletrólito, representado pela fase líquida da polpa mineral, contendo íons de espécies minerais dissolvidos, íons de coletores, modificadores etc (35).

No caso das tubulações, ocorre a corrosão galvânica, onde o metal da tubulação forma o anodo; as pequenas quantidades de metais mais nobres formam o catodo e a umidade do terreno onde é colocada a tubulação constitui o eletrólito. O ânodo, com potencial inferior aos metais mais nobres, é progressivamente dissolvido. As irregularidades, das paredes da tubulação formam micro pilhas locais (54).

Outra causa da corrosão é atribuída à ação de microorganismos anaeróbios, que se desenvolvem, em ausência de oxigênio. Neste caso, a atuação dos microorganismos caracteriza-se pela redução de sulfato a sulfeto que, dependendo do pH, estará na forma iônica ou molecular ( $H_2S$ ), com substancial poder corrosivo (55).

Há soluções de última geração para impedir a abrasão e a corrosão. É o chamado processo *CVD* ("chemical vapor deposition"). O processo consta da

deposição de metais com alta resistência à abrasão e à corrosão, tais como tungstênio.

Alguns exemplos da aplicação do processo *CVD*:

- cobertura ("facing") em partes das válvulas utilizadas nos reatores de gaseificação do carvão;

- deposição de nitretos e carburetos de titânio e silício para conferir resistência à corrosão e abrasão às superfícies de válvulas, ferramentas e mancais (56).

Outro método para a inibição da corrosão é a formação de filmes protetores sobre as superfícies expostas. Sendo que muitos inibidores da corrosão operam a um pH menor, não é suficiente só o ajuste do pH. Os mais eficientes inibidores são os cromatos, os quais, infelizmente, são agressivos do ponto de vista ambiental.

Outro processo para evitar a corrosão consiste na implantação de íons resistentes. É fato notório que os E.U.A. são carentes em cromo, que é um importante elemento para ligas anti - corrosivas. A porcentagem de cromo pode alcançar 20 % da ferro-liga. Para evitar um grande consumo de cromo, sob forma de ferro-ligas, o *U.S. Bureau of Mines* pesquisou coberturas superficiais com ligas de cromo (41).

Citam-se outros três processos inibidores da corrosão (57):

- a) recobrimento com *PFA* (perflúor-alcóxido) de tubulações e reatores; produzido pela *EDLON*;

- b) *Hexaloy* - cerâmica de alta resistência à corrosão, manufaturada pela *Carborundum Co*;

- c) zircônio, sob a forma de ligas, resiste à corrosão, pela formação de um filme estável de óxido na superfície do metal.

Para as águas ácidas, o *US Bureau of Mines* desenvolveu um processo simples para evitar os efeitos negativos de corrosão pelo efluente, o chamado processo "*In Line Aeration*" (58). A concentração de  $Fe^{2+}$  foi reduzida de 10 - 20 mg/l a 0,2 - 0,9 mg/l;

a operação foi realizada, mesmo quando o pH era de 4,6 a 5,6. A neutralização foi obtida pela mistura do efluente aerado com NaOH.

Atualmente estão sendo realizados estudos para inibir a corrosão mediante emprego de compostos orgânicos e inorgânicos. Entre esses inibidores estão os fosfatos. O fosfato reage com o íon ferroso, formando o fosfato de ferro. Este em contato com a água, dá origem a óxido férrico. O ferro, em seu estado de oxidação menos elevado, recobre a sua superfície, protegendo-a (59).

### 5.5. Troca Iônica

A troca iônica é um processo reversível de troca de íons contidos num cristal por íons contidos na solução, sem destruir a estrutura cristalina e sem perturbar a neutralidade elétrica.

A troca iônica é utilizada em muitos ramos industriais como também na indústria mineral.

Podem-se destacar duas aplicações importantes da troca iônica:

- a) uso na extração de metais, para fins econômicos (p.ex. urânio, cobre);
- b) purificação da água efluente de metais pesados e de minerais que conferem à água características de dureza.

A troca iônica também é utilizada na recuperação secundária de metais (cobre de licores residuais da indústria do rayon; cromo da eletro galvanização; prata de filmes fotográficos).

A troca iônica consiste de duas etapas:

- (1) sorção: a solução contendo os cátions metálicos passa sobre uma camada de resina, onde o cátion deixa a fase aquosa e é fixado pela resina;

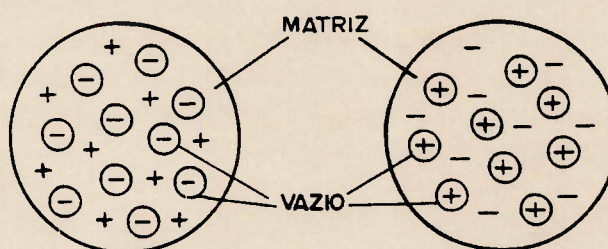
(2) eluição: passando um pequeno volume de solução adequada, chamada eluente, sobre a resina, removem-se os íons metálicos dela.

A eficiência da troca iônica é determinada pelo fator de distribuição  $\Omega$ :

$$\Omega = \frac{\text{concentração do íon metálico na fase resínica}}{\text{concentração do íon metálico na fase aquosa}} \quad [5.1.]$$

Quanto maior o valor de  $\Omega$ , maior a afinidade da resina para o íon metálico analisado.

Os trocadores de íons funcionam conforme mostrado nas Figuras 5.02. e 5.03.



Trocador aniônico

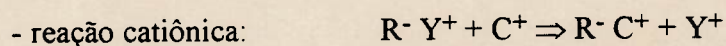
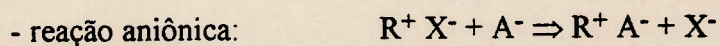
Os íons negativos podem ser trocados por outros íons negativos

Trocador catiônico

Os íons positivos podem ser trocados por outros íons positivos.

Figura 5.02. (21) - Modelo Esponja do Trocadores de Íons

As reações de troca iônica são:



Os trocadores iônicos são regeneráveis, alguns deles tendo vida útil de anos.



Para a regeneração é às vezes necessário utilizar (concomitantemente ou consecutivamente) as fases catiônica e aniônica. Repetidas trocas iônicas levam à remoção dos contaminantes, alcançando-se produtos purificados, de alta concentração.

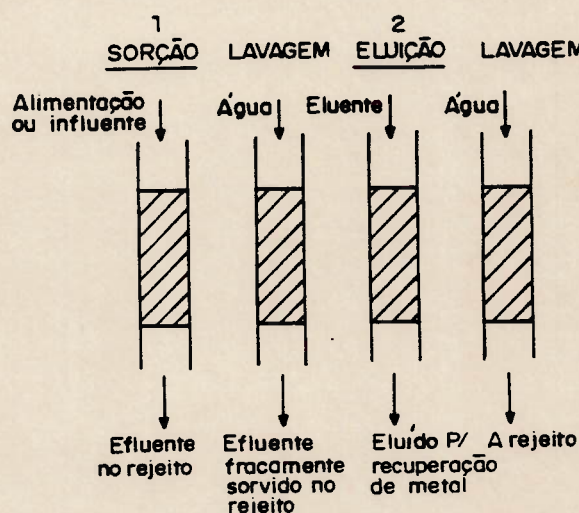


Figura 5.03. (21) - Sequência das operações na troca iônica

Os trocadores iônicos podem ser naturais ou artificiais. A Tabela 5.3. fornece os principais materiais para troca iônica.

Tabela 5.3. (21) - Materiais para troca iônica

catiônicos	inorgânicos	naturais	alumino-silicatos (zeólitas, apatita, montmorillonita, bentonita, terra Fuller)
		sintéticos	alumino-silicatos, óxidos hidratados, zircônia
	orgânicos	naturais (modificados)	carvão sulfonado, linhito, turfa
		sintéticos	resinas sulfonadas de fenol-formaldeídos
aniônicos	inorgânicos	naturais	caulinita
	orgânicos	sintéticos	co-polímero de amina aromática e formaldeído

Alguns exemplos de pesquisa e realização industrial:

(1) A companhia *Kennecott* desenvolveu o processo *FIX* ("Fluid Ion Exchange") para recuperar Cu e Ni dos nódulos marinhos (06).

2) Amolecimento da água, remoção dos íons  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$  através do cátion  $\text{Na}^+$  (08)

(3) Para remoção dos sulfatos da salmoura do Lago Salgado - Utah (EUA) foi utilizado um trocador iônico na base de Ba, o qual ficou em contato com a salmoura, e precipitou o sulfato de Ba; o trocador iônico ficou estabilizado com sódio e o  $\text{BaSO}_4$  precipitado sofreu uma série de processos para que tivesse regenerada a resina (01).

(4) As zeólitas naturais foram testadas na purificação da água efluente: o clinoptilolito (silicato hidratado de Al, Ca, Na, K) pode adsorver metais pesados (por exemplo, águas com alto teor de Pb). O clinoptilolito foi utilizado em projetos nucleares para remoção de radionuclídeos - *British Nuclear Fuels Ltd.*; parece que o mercado de zeólitas e outros minerais com propriedades de troca iônica torna-se promissor, devido à atenção dada no mundo inteiro à qualidade dos efluente (60). Um outro mineral zeolítico - chabazita - foi utilizado como trocador iônico para remover a prata das águas efluentes de uma refinaria de cobre eletrolítico (61).

(5) Os solos contaminados com metais pesados foram descontaminados por dois processos de troca iônica na Cornualha, Inglaterra (62):

- remoção de contaminantes, *ex situ* e
- remoção de contaminantes, *in situ*.

## 6. VISCOSIDADE E REOLOGIA

### 6.1. Escoamento Laminar e Turbulento (64)

O processamento de minérios é dinâmico. O minério, a água, a polpa fluem num movimento contínuo sujeito a leis conhecidas.

Somente para fins de continuidade da exposição, serão indicados os dois tipos principais de distribuição da velocidade numa tubulação por onde flui a polpa. A Figura 6.01. mostra o perfil da velocidade num tubo para escoamento laminar e para escoamento turbulento.

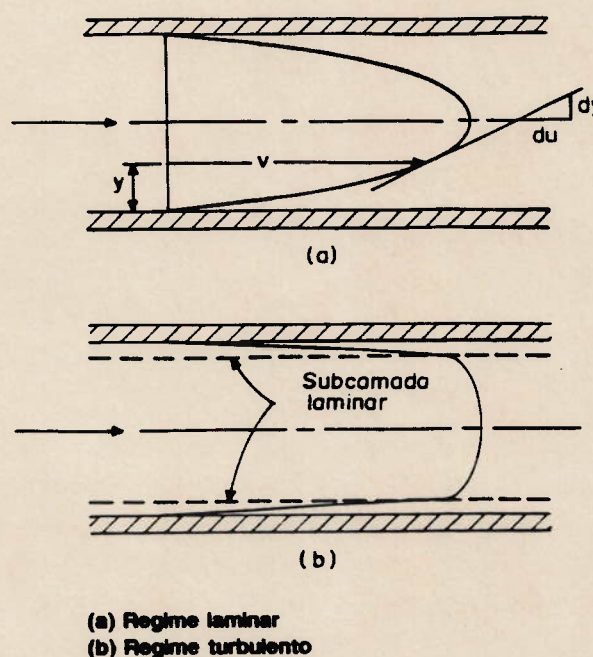


Figura 6.01. (64) - Distribuição da velocidade numa tubulação (a) regime laminar e (b) regime turbulento

No primeiro caso (a), há um gradiente de velocidade,  $dv/dy$  dependendo da distância  $y$  da parede do tubo. Quando o fluxo é turbulento (b), o perfil do gradiente é mais uniforme, porém conserva-se uma sub-camada, de baixa velocidade perto da parede. O  $dv/dy$  representa a deformação do volume do líquido durante a vazão. O gradiente de velocidade resulta da resposta ao movimento relativo entre duas camadas contíguas de fluido. Os esforços de cisalhamento, no movimento laminar, agem nas superfícies cilíndricas das camadas do fluido. Nos fluidos newtonianos o esforço de cisalhamento  $\tau$  é proporcional ( $\psi$  fator de proporcionalidade) ao gradiente de velocidade  $dv/dy$ :

$$\tau = \psi \, dv / dy. \quad [6.1.]$$

Para o movimento laminar, há uma proporcionalidade direta entre o esforço de cisalhamento e o gradiente da velocidade. No movimento turbulento, o fator de proporcionalidade  $\psi$  não é constante e ele depende da viscosidade do fluido e da distância transversal de mistura das suas partículas de fluido, antes de ele sofrer alterações (no caso da tubulação, na proximidade do diâmetro do tubo).

## 6.2. Viscosidade <sup>(65)</sup>

A viscosidade é a propriedade dos fluidos em opor resistência quando são solicitados à deslizamento com deformação (mudança de forma). O fenômeno é de origem molecular, sendo causado por forças de ligação entre moléculas e pelo movimento delas. No caso do meio contínuo, toma-se conta deste fenômeno pela introdução de esforços tangenciais de viscosidade. As forças provocadas pela viscosidade manifestam-se como forças de atrito interno, as quais têm a tendência de frear, numa certa medida, os deslocamentos irregulares das partículas de fluido. O mecanismo de aparecimento das forças de atrito é ilustrado na Figura 6.02. <sup>(65)</sup>

A fórmula da viscosidade dinâmica  $\eta$  foi dada por *Newton*:

$$\eta = \tau / \text{grad } v ,$$

[6.2.]

onde:

$\tau$  = tensão tangencial,

grad  $v$  = gradiente de velocidade na direção normal do fluxo ( $dv/dy$ ).

A viscosidade dinâmica mede-se em poise ou, mais frequentemente em centipoise cP.

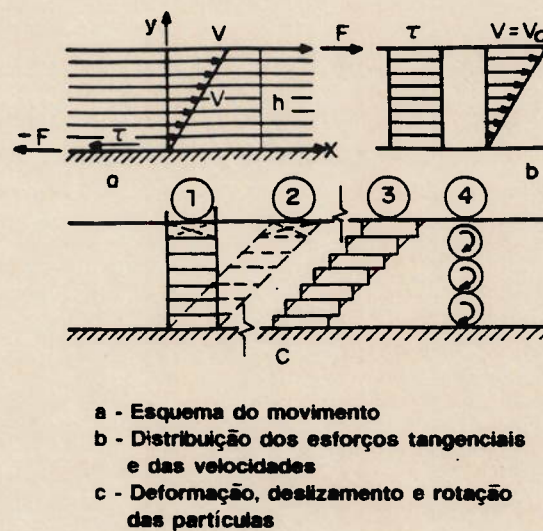


Figura 6.02.<sup>(65)</sup> - Fenômeno Interno de Atrito Distribuição das velocidades, da deformação e da rotação das partículas entre, duas placas planas, num movimento laminar de um fluido viscoso (movimento *Couette*).

O quociente entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido chama-se viscosidade cinemática. A unidade de viscosidade cinemática é o stokes.

Num líquido em escoamento turbulento aparece a, chamada viscosidade turbulenta, cuja equação é (64):

$$\eta_t = \rho l^2 dv/dy , \quad [6.3.]$$

onde:

$\rho$  = densidade,

$l$  = distância de mistura.

A distância de mistura  $l$  pode ser calculada pela relação de *Van Kármán*:

$$l = K (dv/dy)(d^2v/dy^2) , \quad [6.4.]$$

onde:

$K$  = constante universal do fluxo turbulento.

Como já foi mencionado no Capítulo 4, a viscosidade influi na sedimentação livre ou impedida. O escoamento, no transporte hidromecânico, será diferente para valores do número de *Reynolds* acima ou abaixo do valor limite para vazão laminar ou turbulento; o número de *Reynolds* depende de viscosidade.

### 6.3. Viscosidade das Suspensões e Reologia

A Reologia é a parte da Física que investiga as propriedades e o comportamento mecânico dos corpos deformáveis seja em estado rígido, seja com aparência fluida.

A Reologia foi muito estudada para definir as leis das suspensões coloidais. Porém ela define também o comportamento das suspensões minerais finas, não coloidais, de polpas diluídas e/ou de altas concentrações de sólidos. O estudo de *Heiskanen* (66) tem como objetivo prático verificar o comportamento do classificador *Hukki* para suspensões minerais, quando há variação da densidade do minério, da diluição, da vazão de *overflow* etc.

No caso das suspensões, há um meio dispersante, a água, e um meio disperso, o minério. A viscosidade das suspensões depende da viscosidade do meio dispersante,

conforme a relação de *Einstein* (25; 59):

$$\eta = \eta_a (1 + 2,5 Sv) , \quad [6.5.]$$

onde:

$\eta$  = viscosidade da suspensão,

$\eta_a$  = viscosidade da água ou do dispersante,

$Sv$  = fração volumétrica do sólido na suspensão.

A relação é válida para esferas dispersas.

Quando  $Sv$  é muito reduzido ( $<0,05$ ), a equação (6.5.) torna-se:

$$\eta = \eta_a (1 + S! Sv) , \quad [6.6.]$$

onde:

$S!$  = fator de *Simha*, é maior do 2,5 e depende da forma das partículas.

As partículas da fase dispersa afetam o perfil da vazão do dispersante e a interação é conhecida pelo nome de interação hidrodinâmica. Para  $Sv$  reduzido (polpa muito diluída), as equações (6.5.) e (6.6.) são representativas. Para valores maiores do  $Sv$ , é válida a relação de *Thomas* (66):

$$\eta = 1 + 2,5 Sv + 14,1 Sv^2 + A e^{B Sv} , \quad [6.7.]$$

onde:

$A = 0,00273$ ,

$B = 16,6$  .

Outra equação, toma em conta a concentração máxima admissível de sólidos  $Sv_{max}$  para a qual  $v = 0$  :

$$\eta = \eta_a \{ [1 + (1,25 Sv)] / [1 - (Sv / Sv_{max})] \} . \quad [6.8.]$$

Nota-se que  $\eta$  cresce muito com a aproximação do  $Sv$  de  $Sv_{max}$ .

Quando:  $Sv = Sv_{max}$  ,  $\eta = \infty$  .

A viscosidade relativa é a viscosidade de um fluido, referida à viscosidade da água tomada como unidade. Mede-se o tempo necessário para a passagem de um

volume determinado de fluido, através de um tubo, relacionado ao tempo necessário para a passagem da água pelo mesmo tubo.

A viscosidade relativa de um fluido aumenta lentamente com a quantidade de sólido em suspensão, até alcançar um ponto crítico, a partir do qual, para pequenos incrementos da proporção volumétrica de sólidos em suspensão, ela cresce rapidamente.

Uma noção útil é a fluidez, inverso da viscosidade. A viscosidade mede a resistência interna do fluido a escoamento; a fluidez indica a facilidade do escoamento.

Para a definição da viscosidade aparente, veja o item 6.4. Pode se adiantar que a viscosidade aparente  $\eta_{ap} = K (dv/dy)^{(n-1)}$ , (67).

Utilizam-se, fora da viscosidade relativa  $\eta_r$  e da viscosidade aparente  $\eta_{ap}$  outros termos específicos deste fenômeno:

- viscosidade específica:  $\eta_e = \eta_r - 1$ ;
- viscosidade reduzida:  $\eta_{red} = \eta_e/c$ , onde  $c$  = concentração, g/100ml;
- viscosidade inerente:  $\eta_{in} = (\ln \eta_r)/c$ ;
- viscosidade intrínseca:  $\eta_i = (\ln \eta_r) / c$ ;  $\rightarrow$  quando  $c$  tende para 0.

A viscosidade apresenta características, dependendo do processo gravítico utilizado. Na concentração gravítica, em lâmina de água (tipo mensagem), a viscosidade dinâmica está relacionada à densidade do fluido, à velocidade de escoamento e à espessura do filme (Figura 6.03.), pela relação [6.9.]:

$$v_y = d_l g \sin \alpha (2x - y) / 2\eta , \quad [6.9.]$$

onde:

$\alpha$  = ângulo entre a direção do fluxo e a horizontal (ver Figura 6.03.),

$v_y$  = velocidade na direção  $y$  [ $\text{cm s}^{-1}$ ],

$x, y$  = distâncias nas direções  $x$  e  $y$  [ $\text{cm}$ ],

$d_l$  = densidade do fluido [ $\text{g}_m \text{cm}^{-3}$ ],

$g$  = aceleração da gravidade [ $\text{cm s}^{-2}$ ],

$\eta$  = viscosidade dinâmica do fluido [ $\text{g}_m \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$ ].

A relação é válida para números de *Reynolds* inferiores a 500.



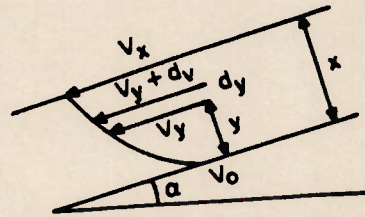


Figura 6.03. (36) - Elementos do escoamento em lamina de água.  $x$  = espessura do filme e  $v$  = velocidade do fluido.

Na concentração em meio denso interferem noções e valores típicos, como "ponto crítico" e de "fluidez zero".

À fluidez zero, conforme *Shelton e De Vaney* (68), a viscosidade aparente é de 75 cP. Neste ponto, o fluido perde a capacidade de estar em movimento. A Tabela 6.1. indica os resultados das experiências de *Shelton e De Vaney* em relação ao ponto crítico e à fluidez zero.

Tabela 6.1. (68) - Ponto Crítico e Ponto de Fluidez Zero Resultados das Experiências de *Shelton e De Vaney*

Sólido em suspensão	Densidade do sólido em suspensão	Ponto crítico		Ponto de fluidez zero	
		Densidade da polpa	Volume dos sólidos %	Densidade da polpa	Volume do sólido %
Quartzo	2,65	1,3	18,2	1,8	46,1
Magnetita	5,20	1,7	16,7	2,8	41,9
Ferrosilício (a 5 % Si)	6,80	2,2	21,5	3,5	42,6
Galena	7,50	2,4	22,3	3,8	43,0
Chumbo atomizado	11,50	4,0	29,0	5,6	44,6

Para a concentração gravítica de finos, foi feita a hipótese de que a viscosidade aparente total  $\eta_T$  é dada pela fórmula (36):

$$\eta_T = \eta_l (1 - S_v) + K_1 S_v + K_2 S_v^n, \quad [6.10.]$$

onde:

$\eta_l$  = viscosidade do líquido [ $g_m \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ],

$S_v$  = concentração volumétrica de partículas sólidas [fração, adimensional],

$K_1, K_2$  = constantes dependentes da forma, tamanho e atividade superficial das partículas [ $g_m \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ],

$n$  = parâmetro dependendo da atividade superficial [adimensional].

#### 6.4. Reologia e Reogramas

A Reologia, já definida, estuda o escoamento plástico de sólidos e de líquidos não-newtonianos.

Quando a porcentagem de sólidos em suspensão aumenta, o esforço de cisalhamento  $\tau$  deixa de ser linearmente proporcional ao gradiente de velocidade e conseqüentemente aparecem outros tipos de fluidos e de leis que regem o comportamento reológico <sup>(66)</sup>. A fórmula geral da viscosidade dinâmica [6.2.] recebe a forma do esforço de cisalhamento [6.11.] quando leva-se em consideração a tensão de cisalhamento mínima, a consistência e a vazão:

$$\tau = \tau_0 + K (dv / dy)^n, \quad [6.11.]$$

onde:

$\tau$  = esforço de cisalhamento [ $g_f \text{ cm}^{-2}$ ],

$\tau_0$  = esforço mínimo de cisalhamento, a partir do qual começa o movimento ("tensão de cisalhamento mínima") [ $g_f \text{ cm}^{-2}$ ],

$K$  = fator de consistência [ $g_m \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ],

$n$  = índice de vazão [adimensional].

A função  $dv/dy = f(\tau)$  depende de dois fatores:  $\tau_0$  e  $n$ :

Para  $\tau_0 = 0$ , a suspensão tem comportamento de líquido, em qualquer circunstância;

$\tau_0 \neq 0$ , a suspensão tem comportamento de líquido só quando  $\tau > \tau_0$ .

Resultam dois casos.

Para  $n = 1$ , o reograma é uma linha reta;  
 $n < 1$ , o reograma é uma curva côncava;  
 $n > 1$ , o reograma é uma curva convexa.

Resultam três casos.

Considerando os dois parâmetros  $\tau_0$  e  $n$  resultam seis casos ou seis comportamentos reológicos, mostrados em gráficos como a figura 6.04., chamados de reogramas.

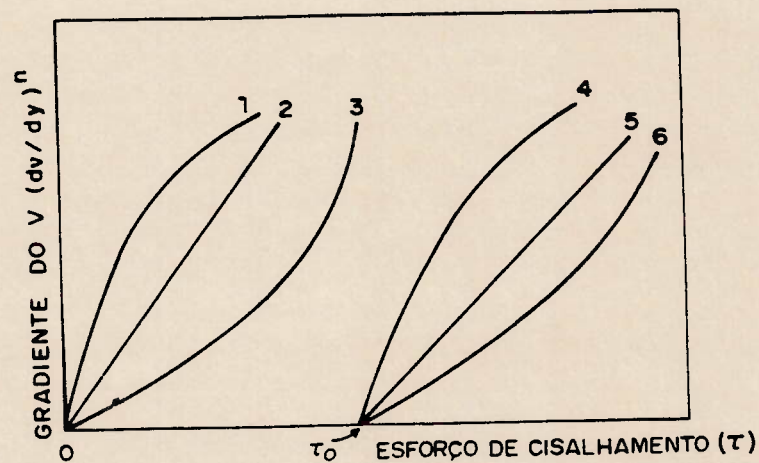


Figura 6.04. (66) Reogramas para alguns tipos de fluidos:

	$\tau_0 = 0$	$\tau_0 \neq 0$
$n > 1$	1 - fluidos dilatantes	4 - fluidos dilatantes com tensão de cisalhamento mínima
$n = 1$	2 - fluidos newtonianos	5 - fluidos de <i>Bingham</i>
$n < 1$	3 - fluidos pseudo-plásticos	6 - fluidos pseudo-plásticos com tensão de cisalhamento mínima

Os reogramas são gráficos da função  $\tau = f(\text{grad } v)$ ; elas exprimem a deformação do fluido (movimento) em função do esforço de cisalhamento que a provoca, conforme figura 6.03.

O ângulo dos reogramas com a abscissa ( $\tau$ ) representa o  $\text{arc tg } \eta$  - constante para alguns reogramas e variável para outros.

Num líquido newtoniano e do tipo *Bingham*, conforme figura 6.04.,  $\eta$  e  $\text{arc tg } \eta$  são constantes e o reograma é linear.

Numa suspensão não-newtoniana (pseudo-plástica ou dilatante),  $\eta$  ou  $\text{arc tg } \eta$  são variáveis e os reogramas são curvos.

Entre os esforços de cisalhamento  $\tau$  e o gradiente de velocidade  $dv/dy$  há a relação conhecida sob o nome de "lei do expoente" (para  $\tau_0 = 0$ , curvas 1 e 3 - Figura 6.04.):

$$\tau = K (dv / dy)^n \cdot \quad [6.12.]$$

onde:

$K$  = índice de interação de consistência,

$n$  = índice de vazão.

A viscosidade aparente  $\eta_{ap}$  é dada pela relação:

$$\eta_{ap} = K (dv / dy)^{n-1} \cdot \quad [6.13.]$$

Dividindo as relações [6.12.] com [6.13.] resulta:

$$\tau = \eta_{ap} dv/dy, \quad [6.14.]$$

onde:  $\eta_{ap}$  é a viscosidade dinâmica de um fluido newtoniano.

No caso de suspensões utilizadas na concentração por meio denso, a influência da viscosidade manifesta-se por <sup>(36)</sup>:

- aumento do cisalhamento para suspensões dilatantes,
- decréscimo do cisalhamento para suspensões pseudo-plásticas,

- aumento do volume de sólido do meio denso (% v/v) tanto para fluidos plásticos como dilatantes,
- contaminação com partículas ultra-finas para suspensões plásticas e dilatantes.

### 6.5. Tixotropia

Chama-se tixotropia o fenômeno de passar do comportamento rígido, semelhante ao de um sólido, para o comportamento de um fluido e, reversivelmente, voltar ao comportamento rígido. A tixotropia é a propriedade reversível, de redução das propriedades elásticas, especialmente a viscosidade, sob o efeito de uma ação mecânica.

Alguns minerais em suspensão aquosa, como por exemplo, bentonita, quando agitados, mantêm a estrutura de fluido. Quando a agitação para, a suspensão torna-se rígida. O efeito é utilizado na perfuração de poços petrolíferos.

A tixotropia pode influir na operação de espessadores, quando o minério contém certas argilas (montmorillonita), e na estabilidade e desestabilização das barragens de rejeitos, quando construídas de material argilo-arenoso.

O fenômeno decorre da seguinte maneira <sup>(69)</sup>: há uma estrutura de plaquetas finas de argila, principalmente montmorillonita; entre as plaquetas, adsorve-se água o que torna o sistema extremamente rígido, devido à estrutura dos dipolos da água e dos cátions da argila adsorvente; a água adsorvida e rigidizada confere ao sistema uma alta resistência. Devido a causas mecânicas (choques, vibrações, agitação, ultra-som), a coesão do sistema se reduz e a água flui arrastando as partículas minerais. Quanto mais aberta a textura da argila, mais fácil decorre a ação rápida, quase instantânea, de ceder à água e de arrastar a massa argilo-arenosa no movimento da vazão (do fluxo). De maneira reversível, quando a causa mecânica cessa, as pontes de ligação plaquetas de argila-água-plaquetas de argila se refazem e o complexo torna-se novamente coeso.

Retomando a Figura 6.04., pode-se observar que, para os fluidos que precisam de uma tensão de cisalhamento mínima (esforço exterior do sistema), até alcançar o valor  $\tau_0$  os fluidos comportam-se como corpos rígidos. Ultrapassando o valor  $\tau_0$ , os corpos rígidos começam a ter comportamento de líquidos. Cessando o esforço exterior, os corpos voltam a ter propriedades rígidas. Esta seria a explicação reológica da tixotropia (41).

Nos itens anteriores, o comportamento dos corpos em movimento era dependente da tensão de cisalhamento e dos parâmetros relacionados à vazão ( $\tau$ ,  $\tau_0$ ,  $n$ ), mas independente de tempo.

Os fluidos tixotrópicos fazem parte da categoria de fluidos com a tensão de cisalhamento variável com o tempo de cisalhamento.

Eles possuem uma estrutura, cuja destruição é função tanto do tempo, como do gradiente de velocidades ou da taxa de cisalhamento.

Quando a estrutura é destruída, há um gradiente constante de velocidade e a tensão de cisalhamento decrece. A estrutura pode se auto-recompôr se as forças externas não impedem esta recomposição.

Os estudos e as publicações sobre tixotropia são poucas e as leis da dependência  $\tau = f (dv/dy)$  são bem mais conhecidas do que as leis que regem a tixotropia (59).

## 6.6. Liquefação

Uma propriedade importante do sistema água/sólidos, relacionada à porosidade e tixotropia é a liquefação. A água entra nos poros e, sob certas condições (choques mecânicos), imprime ao sistema arenoso-argiloso, embebido com água, uma fluidez que o torna semelhante a um líquido.

A liquefação consiste em redução repentina da resistência ao cisalhamento devido ao acréscimo rápido da pressão intersticial, sendo geralmente relacionada a solos granulares.

A liquefação pode ocorrer nos diques das bacias como aconteceu nos anos 60, em *Chuquicamata* - Chile, ocasionando uma das piores catástrofes da história da mineração.

## 7. FENÓMENOS FÍSICO-QUÍMICOS NA INTERFACE ÁGUA-MINERAIS

### 7.1. Tensão Superficial

Dentro de um volume de água, cada molécula é sujeita a forças de atração intermolecular estatisticamente iguais a outra molécula qualquer. Na superfície de separação entre as fases há uma atração parcial para dentro do volume, com a tendência de afundar a molécula; a resistência a esta tendência é semelhante à existência de uma membrana imaginária na superfície da água. Este comportamento de resistência da superfície do líquido, como se fosse uma membrana ideal, chama-se de tensão superficial. Mencionam-se alguns efeitos da tensão superficial: resistência da superfície à penetração; forma esférica das partículas de água em queda (máxima resistência - ou mínima área); ascensão da água em tubos capilares e flutuação de folhas metálicas na superfície da água (43).

A fórmula que define a tensão superficial  $\gamma$  é:

$$\gamma = W / \Delta A , \quad [7.1.]$$

onde:

$W$  = energia [ergs],

$\Delta A$  = nova superfície gerada [ $\text{cm}^2$ ],

$\gamma$  = tensão superficial [ergs  $\text{cm}^{-2}$ , ou dyns  $\text{cm}^{-1}$ ].

A medida mais comum da tensão superficial é o método de ascensão capilar, que tem a fórmula :

$$\gamma = r h \rho g / 2 \cos\theta , \quad [7.2.]$$

onde:

$r$  = raio do tubo capilar [cm],

$h$  = ascensão capilar [cm],

$\rho$  = densidade do líquido [ $\text{g}_m \text{cm}^{-3}$ ],

$g$  = aceleração da gravidade [ $\text{cm s}^{-2}$ ],

$\theta$  = ângulo de contato líquido / sólido (ver detalhes no item 7.4.).



Entre os líquidos, a água possui uma tensão superficial alta ( $72 \text{ dyn cm}^{-1}$ ) comparada com álcool ( $22 \text{ dyn cm}^{-1}$ ), tetracloreto de carbono ( $27 \text{ dyn cm}^{-1}$ ) e benzeno ( $29 \text{ dyn cm}^{-1}$ ).

O valor da tensão superficial pode ser diminuído pela adição de uma substância tensoativa. Os agentes tensoativos são catiônicos, aniônicos ou não-iônicos. A redução da tensão superficial apresenta interesse para o processo de flotação (45; 59).

## 7.2. Tensão Interfacial e Espalhamento de Líquidos (43; 70)

Duas noções serão necessárias para este subcapítulo: a coesão e a adesão.

A coesão é uma força de atração entre duas partículas semelhantes, dentro de uma fase única, opondo-se a forças de separação. Como exemplo, temos a coesão de partículas dentro de uma barragem de rejeitos, opondo-se a forças gravitacionais as quais tendem a deslocar as partículas.

A adesão é uma força de atração entre duas partículas, duas substâncias diferentes ou duas fases, opondo-se a forças de separação. Como exemplo, a molhabilidade do parede de vidro pela água (adesão vidro-água).

Quando dois líquidos imiscíveis, A e B, são colocados juntos, há uma superfície de separação, com a tensão superficial  $\gamma_{AB}$ , a qual tem um valor intermediário entre  $\gamma_A$  e  $\gamma_B$ . Por exemplo:

$$\gamma_{\text{água}} = 72 \text{ dyn cm}^{-1}; \quad \gamma_{\text{benzeno}} = 29 \text{ dyn cm}^{-1}; \quad \gamma_{\text{água/benzeno}} = 35 \text{ dyn cm}^{-1}$$

Seja uma coluna de líquido, A, que queremos separar em duas partes. A separação exige um trabalho  $W_c$  igual a duas vezes o trabalho  $\gamma_A$ , correspondente à geração ou manutenção de uma única superfície:

$$W_c = 2 \gamma_A .$$

[7.3.]

O valor  $W_c$  tem o nome de trabalho de coesão.

Para uma coluna de dois líquidos imiscíveis, A e B, o trabalho de separação dos líquidos é dado pela fórmula:

$$W_a = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} , \quad [7.4.]$$

onde:

$W_a$  = trabalho de adesão (contrário à separação;  $W_s = -W_a$ ).

Os dois tipos de trabalho,  $W_c$  e  $W_a$ , conduzem à noção de coeficiente de espalhamento ("spreading"),  $S_{BA}$  do líquido B sobre o líquido A:

$$S_{BA} = W_a - W_{cB} = \gamma_A - \gamma_B - \gamma_{AB} , \quad [7.5.]$$

onde:

$W_{cB}$  = trabalho de coesão do líquido B.

Quando  $S_{BA}$  é positivo, há a dispersão de B sobre A; quando  $S_{BA}$  é negativo, não haverá dispersão e o líquido adicionado repousará como gotas.

Na extração por solventes líquidos, deseja-se  $S_{BA} < 0$ , sendo A a fase aquosa, e B a fase orgânica.

No caso de soluções homogêneas, há uma mudança importante da tensão superficial do solvente: como exemplo, a adição de certos produtos na água diminui muito a tensão superficial ( $3,5 \cdot 10^{-3}$  moles de oleato de sódio reduz  $\gamma$  de 72 a 30 dyn  $\text{cm}^{-1}$ ).

Na flotação, os reagentes espumantes possuem, como propriedade principal, a redução da tensão superficial da água (45).

### 7.3. Capilaridade

A capilaridade é a ação pela qual a superfície de um líquido em contato com um sólido é aumentada ou diminuída, dependendo da atração relativa entre as moléculas de líquido e as moléculas do sólido.

Em outras palavras, os dois fenômenos - ascensão capilar e depressão capilar, - dependem de grandeza relativa das forças de coesão entre as moléculas de água entre si e das forças de adesão entre a água e a parede sólida (tubo capilar).

Os fenômenos capilares manifestam-se com intensidade nos materiais porosos (os poros são assimilados a cilindros de diâmetro  $< 1 \mu\text{m}$  e, algumas vezes,  $< 1 \text{mm}$ ). Devido às tensões superficiais e aos fenômenos de umectação, os meniscos (forma da camada limite de separação ar / água) nos poros são côncavos ou convexos.

A pressão capilar é a pressão que se manifesta dentro dos capilares e faz a água subir ou descer. Ela pode ser positiva ou negativa, à pressão atmosférica. Na superfície côncava há um déficit de pressão, conforme a Figura 7.01.a. Na superfície convexa, a pressão capilar adiciona-se à pressão atmosférica, conforme a Figura 7.01.b. (41).

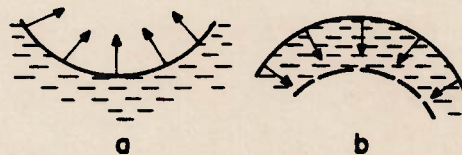


Figura 7.01.<sup>(26)</sup> - Pressão Capilar. (a) Superfície côncava do menisco (déficit de pressão) (b) Superfície convexa (pressão positiva).

A pressão capilar  $p_c$  é dada pela fórmula de *Laplace*:

$$p_c = \gamma_{la} (dA / dV) \text{ [dyn cm}^{-2}\text{]}, \quad [7.6.]$$

onde:

$A$  = área de separação [ $\text{cm}^2$ ],

$V$  = volume do menisco [ $\text{cm}^3$ ],

$\gamma_{la}$  = tensão superficial líquido / ar [ $\text{dyn cm}^{-1}$ ].

Assimilando a curva do menisco a uma hemiesfera, a relação [7.6.] torna-se:

$$p_c = 2 \gamma_{la} / r , \quad [7.7.]$$

onde:

$r$  = raio do menisco.

Entre o raio do menisco  $r$  e o raio  $r_0$  de um capilar (assimilado a um cilindro), para um material dado, há a relação:

$$r_0 = r \cos\theta , \quad [7.8.]$$

onde:

$\theta$  = ângulo de contato.

Resulta:

$$p_c = (2 \gamma_{la} \cos\theta) / r_0 , \quad [7.9.]$$

Para os líquidos que molham completamente o minério,  $\theta = 0^\circ$ ;  $\cos\theta = 1$ :

$$p_c = 2 \gamma_{la} / r_0 . \quad [7.10.]$$

Neste caso, a pressão capilar tem o valor máximo.

Para menisco de dupla curvatura, de raios  $r_1$  e  $r_2$ :

$$p_c = \gamma_{la} (1 / r_1 + 1 / r_2) . \quad [7.11.]$$

### Ascensão Capilar (59)

A Figura 7.02. mostra a ascensão capilar, no caso de pressão capilar negativa e positiva.

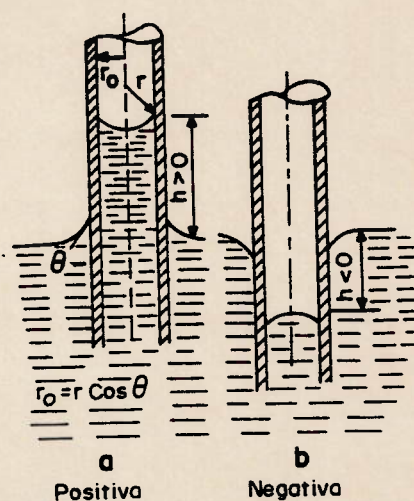


Figura 7.02. (26) Ascensão Capilar: (a) positiva; (b) negativa.

A ascensão é representada por  $h$  e tem valores positivos no caso de meniscos côncavos e negativos para meniscos convexos. Tomando-se em conta o equilíbrio entre  $p_c$  e a pressão hidrostática da coluna de líquido, obtém-se:

$$p_c = h d_l , \quad [7.12.]$$

$$p_c = h \rho g , \quad [7.13.]$$

$$(2 \gamma_{la} \cos\theta) / r_0 = h \rho g , \quad [7.14.]$$

$$h = (2 \gamma_{la} \cos\theta) / (r_0 g \rho) , \quad [7.15.]$$

onde:

$\gamma_{la}$  = tensão superficial líquido/ar [ $g_f \text{ cm}^{-1}$ ],

$h$  = ascensão capilar [cm],

$d_l$  = peso específico do líquido [ $\text{cm s}^{-2}$ ],

$g$  = aceleração da gravidade [ $\text{cm s}^{-2}$ ],

$\rho$  = densidade (mássica) do líquido [ $g_m \text{ cm}^{-3}$ ].

A relação [7.15.] serve, entre outros, para medir indiretamente a tensão superficial.

#### 7.4. Molhabilidade

A molhabilidade representa a facilidade pela qual a superfície de um sólido pode ser molhada pela água ou soluções.

A molhabilidade foi estudada principalmente (porém não exclusivamente) para explicar fenômenos ligados ao processo de flotação.

A flotação é o processo de concentração mais afetado pelos fenômenos superficiais existentes na interface água-sólido, como dupla camada elétrica, migração iônica etc. Fenômenos ligados à situação energética da superfície, potencial de superfície, energia dos elétrons livres foram estudados com o desenvolvimento da flotação, tendo importância também em outros processos minerais. O comportamento diferenciado das superfícies à flotação e aos fenômenos conexos depende, em grande parte, da maneira de adesão da água à superfície mineral, em outras palavras, da molhabilidade dela pela água.

Como medida da molhabilidade, utiliza-se o valor do ângulo de contato  $\theta$  dado pela relação de *Young* (35):

$$\cos\theta = (\gamma_{ma} - \gamma_{ml}) / \gamma_{la} \quad [7.16.]$$

onde:

$\gamma$  = tensão superficial,

subscrito:  $m$  = minério;  $a$  = ar;  $l$  = líquido.

Os minerais hidrófilos, com fácil dispersão da água na superfície deles, possuem um ângulo de contato  $\theta \ll 90^\circ$  e os minerais hidrófobos, pouco molháveis, possuem um ângulo de contato  $\theta > 90^\circ$ . De fato, o ângulo de contato não é uma medida da molhabilidade, em termos quantitativos; ele indica uma tendência e uma situação qualitativa da molhabilidade.

O ângulo de contato é difícil de estabelecer, tanto pela delicadeza da medição, como pelo fato de que ele é afetado por condições que alteram a molhabilidade, tais como:

- contaminação das gotas pela adsorção de impurezas;
- a superfície tem defeitos geométricos (aspereza). Os defeitos de aspereza diminuem  $\theta$ , quando uma superfície lisa tem  $\theta < 90^\circ$  e aumentam  $\theta$  quando uma superfície lisa tem  $\theta > 90^\circ$  (70).

*Rosen* (70) menciona a molhabilidade de dispersão quando a água encontra-se em contato com o minério e com outro fluido presente. O segundo fluido permite o contato água/minério, na conta do primeiro fluido.

Menciona-se também a molhabilidade de adesão, quando as duas fases (água e minério) não estão inicialmente, em contato, mas esse contato se produz após um trabalho de adesão. Indica-se a existência de molhabilidade por imersão, fato ilustrado nas figuras 7.03.(B) e 7.04.(B).

A adesão de bolhas de ar à superfície dos minerais se produz espontaneamente quando ocorre:

$$\gamma_{la} (1 - \cos\theta) \geq 0 \quad [7.17.]$$

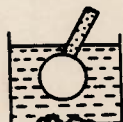
A prática mostrou que a não-molhabilidade pode ser realizada a ângulos  $\theta$  de  $10^\circ$ - $15^\circ$ , sendo que as tensões superficiais  $\gamma_{ml}$ ,  $\gamma_{ma}$  e  $\gamma_{la}$  dependem de vários fatores (situação físico-químico da superfície, sua rugosidade, porosidade, hidratação, falta de homogeneidade, presença de reagentes surfatantes etc.).



a) Gota de líquido sobre uma placa sólida, no ar dispersa completamente, não mostrando ângulo de contato  $\theta \cong 0^\circ$ ;



b) Bolha de ar suspensa na parte imersa da superfície mineral; sem adesão nas superfícies hidrófilas;



c) Bolha cativa, sem ligação das partículas hidrófilas.

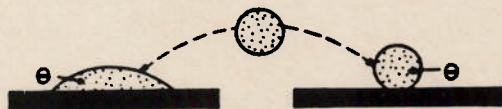
Figura 7.03. (35) - Sólidos Hidrófilos

Hidrofobia fraca

(A) A gota de líquido sobre plano mineral  
No ar, ângulo de contato reduzido,  
 $\theta < 90^\circ$ ,

Hidrofobia forte

Dispersão parcial com grande ângulo de  
contato,  $\theta > 90^\circ$ ,



(B) Bolhas de ar suspensas na superfície sólida submersa  
adesão fraca,  $\theta < 90^\circ$ ,

adesão forte,  $\theta > 90^\circ$ ,



(C) Captação de partículas sólidas pela bolha de ar  
poucas partículas ligadas,

muitas partículas ligadas.

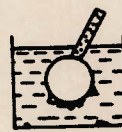


Figura 7.04. (35) Sólidos Hidrófobos.



De maneira esquemática, o comportamento e as conseqüências da hidrofília ou hidrofobia, da superfície mineral, natural ou induzida, é indicada na Figura 7.03. e na Figura 7.04. (35).

As características das superfícies hidrófilas são:

- a) dispersão da água com  $\theta \cong 0^\circ$ ,
- b) nenhuma adesão do ar a superfícies hidrófilas; bolhas suspensas na parte submersa da superfície,
- c) captação de partículas sólidas pela bolha; nenhuma ligação de partículas hidrófilas.

As características das partículas hidrófobas são:

- a) fixação da gota de água, na superfície plana do sólido, no ar;
  - dispersão parcial com  $\theta < 90^\circ$  para hidrofobia fraca, e
  - pouca dispersão com  $\theta > 90^\circ$  para hidrofobia forte;
- b) bolhas de ar suspensas na superfície submersa do sólido:
  - adesão fraca para  $\theta < 90^\circ$ , hidrofobia fraca,
  - adesão forte para  $\theta > 90^\circ$ , hidrofobia forte;
- c) captação de partículas sólidas pela bolha de ar:
  - poucas partículas ligadas para  $\theta < 90^\circ$ , hidrofobia fraca,
  - muitas partículas ligadas para  $\theta > 90^\circ$ , hidrofobia forte.

A moagem prolongada gera finos de materiais ferrosos que formam uma cobertura delgada sobre as partículas de sulfetos e prejudicam a fixação do xantato sobre as superfícies, as quais tornam-se hidrófilas.

Por outro lado, a hidrofobia dos minerais dificulta a flotação seletiva, sendo necessários depressores específicos.

Observou-se que os minerais hidrófobos são macios e, devido à friabilidade mais acentuada, o pó hidrofóbico deles procedente mancha as partículas hidrófilas, tornando-as parcialmente hidrofóbicas, o que diminui a seletividade da flotação (35).

Alguns sólidos possuem hidrofobia natural, tais como substâncias orgânicas: hidrocarbonetos, ceras, carvão, plásticos sintéticos etc., ou inorgânicas, tais como enxofre, talco, molibdenita.

As pré-condições da separabilidade devido à hidrofobia natural são a natureza fresca da superfície, a não contaminação dela, a falta de oxidação ou nitretação e a não cobertura com material coloidal.

Com o tempo, a hidrofobia torna-se menor, devido a vários contaminantes e/ou alteração da superfície e torna-se necessária a adição de coletor.

Um caso interessante de hidrofobia é aquela do ouro lamelar. Num processo gravítico, a alta densidade do ouro favorece sua presença no "afundado". A forma lamelar e uma alta hidrofobia natural favorecem sua presença no flutuado. Neste caso, o ouro presta-se bem à flotação (35).

### 7.5. Algumas Aplicações da Tensão Superficial, Capilaridade e Molhabilidade

1) O espalhamento ("spreading") tem um papel na formação de espuma no processo de flotação. As bolhas de ar conseguem deslocar a água da superfície de partículas, quando (35):

$$[(\gamma_{am} - \gamma_{ml}) / \gamma_{al}] < 1 .$$

2) Na desagregação do minério pela água e na umidificação do material pulverulento, a tensão superficial e o espalhamento são fatores importantes. O espalhamento será aumentado pela introdução de surfatante que vai diminuir  $\gamma_{ml}$  e  $\gamma_{la}$ .

Neste caso, o espalhamento

$$S_{lm} = \gamma_{ma} - \gamma_{ml} - \gamma_{la} ,$$

terá os últimos dois fatores reduzidos. Facilita-se assim a dispersão de sólidos em meio aquoso (70).

3) Na aglomeração esférica, utilizada na concentração de finos de carvão e, como tentativa, na concentração de ouro livre, utilizam-se as características da interface sólido/líquido. A aglomeração realiza-se com o uso de petróleo, o qual aumenta a diferença entre os ângulo de molhabilidade observados para minerais hidrofóbicos e hidrofílicos (35).

4) A medição do ângulo de contato sobre partículas finas é difícil, porém muito importante do ponto de vista do avanço tecnológico. A penetração de um líquido num material pulverulento depende do ângulo  $\theta$  dado pela equação de *Washburn*: (70):

[7.18.]

$$l^2 = [(K r) t \gamma_{la} \cos\theta] / 2 \eta ,$$

onde:

$l$  = penetração [cm],

$K$  = constante que leva em consideração a tortuosidade do material (adimensional),

$r$  = raio médio equivalente das passagens capilares [cm],

$\gamma_{la}$  = tensão líquido/ar [ $g_f \text{ cm}^{-1}$ ],

$\eta$  = viscosidade do fluido [ $g_m \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ],

$\theta$  = ângulo de contato (adimensional).

## 7.6. Adsorção

### 7.6.1. Generalidades

As forças moleculares na superfície de um líquido não estão nunca em equilíbrio; as superfícies estão em estado de não-saturação. A mesma consideração é

válida para as superfícies de sólidos, onde moléculas ou íons na superfície de cristais não têm as forças elétricas satisfeitas pela presença de outras moléculas ou íons.

Como consequência desta não saturação, as superfícies de líquidos e sólidos tendem a atrair e reter gases ou substâncias com as quais estão em contato.

O fenômeno de concentração de uma substância na superfície de sólidos ou líquidos é a adsorção. A substância atraída chama-se de fase adsorvida e a substância que atrai e fixa na superfície chama-se de adsorvente (41).

A adsorção é um fenômeno exotérmico. Quando intervêm forças físicas, a adsorção é um fenômeno reversível. Quando precisa de calor para adsorção, ocorre uma reação química, o fenômeno é irreversível e a temperatura da adsorção é maior do que a ambiental.

A operação que é inversa à adsorção é a dessorção; em relação à adsorção física, ela é reversível. Em relação à adsorção química, no entanto a dessorção ocorre só quando o sistema recebe o calor desenvolvido na adsorção. Um exemplo de adsorção química é a adsorção do ouro da solução de cianeto pelo carvão ativado. A dessorção realiza-se à temperatura de 180 °C com gasto de energia calórica. A adsorção que emprega calor é conhecida sob o nome de adsorção ativada.

As principais diferenças entre adsorção física e adsorção química são:

- as forças são de tipo *Van der Waals* na adsorção física e comparáveis a ligações químicas na adsorção química;
- especificidade baixa na adsorção física e elevada na adsorção química;
- energia de ativação baixa na adsorção física e elevada na adsorção química;
- a dessorção fácil na adsorção física e difícil, acompanhada de reações químicas, na adsorção química (59).

Podem-se distinguir três casos de adsorção, dependendo do estado físico do adsorvido e do adsorvente:

- adsorvente líquido e adsorvido fluido (líquido ou gás),
- adsorvente sólido e adsorvido gasoso,
- adsorvente sólido e adsorvido líquido.

Os três tipos possuem propriedades e regras comuns e também propriedades que diferenciam um processo de outro.

A lei geral da adsorção é a lei de *Gibbs* <sup>(43)</sup>:

$$- d\gamma / d\mu = \Gamma , \quad [7.19.]$$

onde:

$\Gamma$  = coeficiente de adsorção ou concentração superficial [mol cm<sup>-2</sup>],

$\gamma$  = tensão superficial [dyn cm<sup>-1</sup>],

$\mu$  = potencial químico [dyn cm mol<sup>-1</sup>].

O coeficiente de adsorção  $\Gamma$  expressa-se em moles adsorvidos por unidade de superfície do adsorvente, significando o excesso superficial do soluto, na interface, relacionado com a fase de volume.

Outra formulação para soluções diluídas é <sup>(45)</sup>:

$$\mu = \mu_0 + RT \ln C , \quad [7.20.]$$

onde:

$\mu_0$  = potencial químico padrão (standard) [dyn cm mol<sup>-1</sup>],

$R$  = constante universal dos gases [dyn cm mol<sup>-1</sup> °K<sup>-1</sup>],

$T$  = temperatura absoluta [°K],

$C$  = concentração da solução [mol cm<sup>-3</sup> mol<sup>-1</sup> cm<sup>3</sup>].

Diferenciando e agrupando, obtém-se:

$$- d\gamma / dC \times C/RT = \Gamma . \quad [7.21.]$$

Para  $d\gamma/dC < 0$  resulta  $\Gamma > 0$ .

Quando a tensão superficial diminui com a concentração, a adsorção é positiva, a superfície é mais rica em soluto do que a solução (caso de uso de espumantes na flotação).

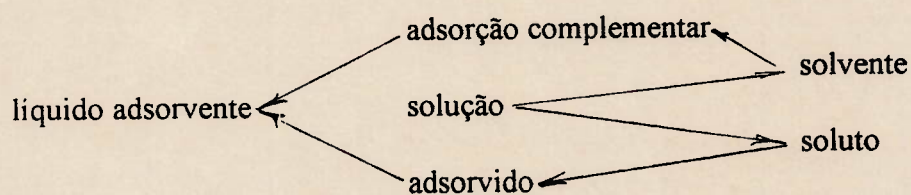
Para  $dy/dC > 0$  resulta  $\Gamma < 0$ .

Quando a tensão superficial aumenta com a concentração, a adsorção é negativa; há expulsão do adsorvido da superfície do adsorvente, até que se estabeleça o equilíbrio.

### 7.6.2. Adsorção Líquido / Fluido (41)

No caso do adsorvente líquido e o adsorvido gás ou líquido, a relação geral do *Gibbs* é válida e os casos de adsorção positiva e negativa também ocorrem.

A intervenção do adsorvente, adsorvido, solvente e soluto, pode ser representada esquematicamente por:



A isoterma de adsorção é uma expressão matemática que relaciona a concentração do adsorvido na interface com a concentração de equilíbrio na fase líquida (70).

A Figura 7.05. indica, para substâncias tensoativas (com  $dy/dC < 0$ ), a variação  $\gamma = f(C)$ .

Há uma relação, deduzida da equação de *Gibbs* em condições isotérmicas ( $T =$  constante):

$$\Gamma = B / R T \times A C / (1 + A C) , \quad [7.22.]$$

onde:

A e B são constantes.

A função  $\gamma = f(C)$  tem a forma:

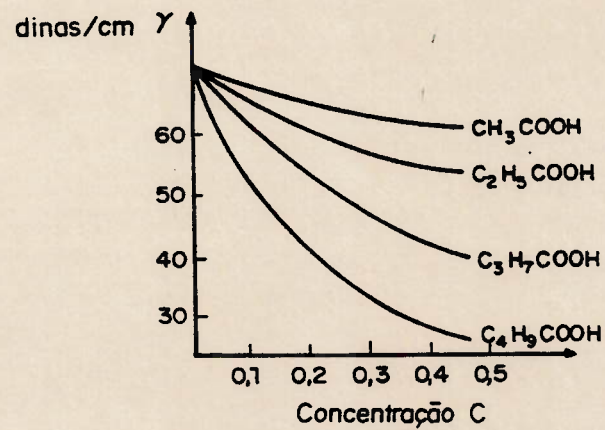


Figura 7.05. (41) - Isotermas da Tensão Superficial para quatro ácidos alifáticos consecutivos

A Figura 7.06. mostra a isoterma da tensão superficial  $\gamma$  e da adsorção  $\Gamma$  em função da concentração.

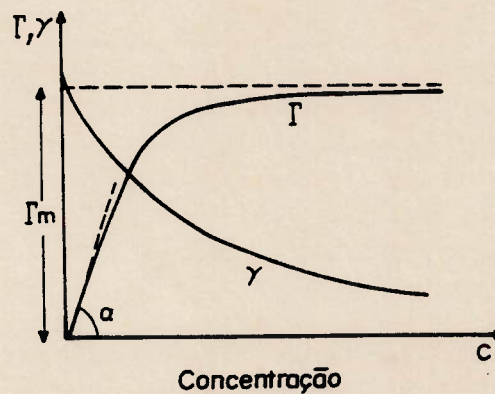


Figura 7.06. (41) - Isotermas da Tensão Superficial ( $\gamma$ ) e da Adsorção ( $\Gamma$ )

$$\gamma_0 - \gamma = B \ln(A C + 1) ,$$

[7.23.]

onde:

$\gamma_0$  = tensão superficial do solvente puro e,  
 $\gamma$  = tensão superficial da solução de concentração C.

As duas fórmulas representam a isoterma de *Langmuir* (35).

Para concentrações reduzidas:

$$A \ll 1 \quad e \quad \Gamma = (B A / R T) C . \quad [7.24.]$$

Na Figura 7.6., o início da curva  $\Gamma$  é uma reta com  $\text{tg}\alpha = B A/R T$

Para concentrações grandes,

$$A C \gg 1 \quad e \quad \lim \Gamma = \Gamma_{\max} = B / R T . \quad [7.25.]$$

Juntando as equações [7.22.] e [7.25.], resulta:

$$\Gamma = \Gamma_{\max} \times A C / (1 + A C) . \quad [7.26.]$$

Sobre a teoria de *Langmuir*, volta-se no item 7.6.3. - adsorvente sólido e adsorvido gás.

#### Pressão bi-dimensional

No caso do fenômeno de adsorção, foi introduzida para a pressão superficial,  $P_s$ , a noção de pressão bi dimensional [ $\text{g cm}^{-1}$ ] no lugar da pressão tri dimensional [ $\text{g cm}^{-2}$ ] convencional. A pressão superficial  $P_s$  tem a fórmula:

$$P_s = \gamma_0 - \gamma , \quad [7.26.]$$

onde:  $\gamma_0$  e  $\gamma$  são as tensões superficiais do solvente e da solução, respectivamente.

Há um paralelismo entre os parâmetros superficiais (pressão superficial, área superficial, vazão superficial) e os parâmetros convencionais das leis dos gases e de fenômenos não superficiais (tridimensionais).



## 7.6.3. Adsorção Sólidos / Gases

É difícil medir ou calcular a superfície de adsorção. Utiliza-se, no lugar da superfície do adsorvente, o volume dele:

$$\Gamma_s = n_s / m , \quad [7.27.]$$

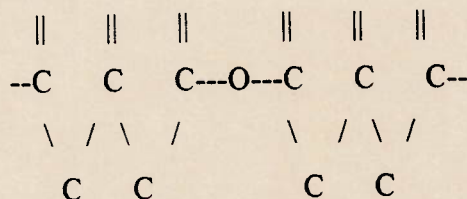
onde:

$n_s$  = número de moles de gás adsorvido,

$m$  = número de gramas de sólido (adsorvente),

$V$  = volume de gás adsorvido,  $V = K \Gamma_s$ .

A hipótese de *Langmuir* parte da idéia de que a superfície do adsorvente apresenta centros ativos de adsorção e áreas inertes. A adsorção de gases deve-se ao encontro de valências livres. Como exemplo, a adsorção de oxigênio pelo carvão ativado ocorre assim:



Devido ao fato de que o raio de ação não ultrapassa as dimensões moleculares ( $10^{-8}$  cm), cada centro ativo pode reter uma só molécula. Em consequência, a camada de adsorção é monomolecular e este fato constitui a premissa básica da teoria de Langmuir.

$$V = V_m \times p b / (1 + p b) , \quad [7.28.]$$

onde:

$p$  = pressão de equilíbrio do adsorvido,

$b = \theta / (1 - \theta) p$ ,

$V$  = volume de gás adsorvido a um  $\theta$  qualquer,

$V_m$  = volume de gás a  $\theta = 1$  (adsorvido na superfície total).

A isoterma *BET* (das iniciais dos cientistas *Brunauer, Emmett e Teller*), admite camadas polimoleculares, sendo de fato só a primeira de adsorção *sensu stricto*, sendo as restantes de condensação sobre ela (superposição).

Se representamos por  $K_A$  o coeficiente de condensação, ou seja  $K_A =$  número de moles adsorvidos / número total de moles que colidem a superfície e  $K_D$  por uma constante de desorção, há as notações:

$$b = (K_{Ai} / K_{Di}) \times e^{E/RT}, \text{ e} \quad [7.29.]$$

$$b' = (K_{Ai} / K_{Di}) \times e^{L/RT},$$

onde:

$E =$  calor de adsorção,

$i =$  subscrito para a camada  $i$ ,

$L =$  calor de condensação.

A relação *BET* é a seguinte:

$$V = V_m \{ p b / [1 - p(b'-b)] \} [1 / (1 - p b')] \quad [7.30.]$$

Para  $i = 1$ , e  $b' = 0$ :

$$V = V_m [p / (1 + p b)] \quad [7.31.]$$

igual a fórmula de *Langmuir*.

A isoterma de *Freundlich*, confirmada na prática, tem a fórmula <sup>(45)</sup>:

$$V = K' p^{1/n} \quad [7.32.]$$

$V =$  volume do gás adsorvido e  $p =$  pressão de equilíbrio do adsorvido.

Os parâmetros  $K'$  e  $n$  determinam-se experimentalmente (pela logaritmação, obtendo-se retas com as coordenadas  $\log V$  versus  $\log p$ ).

#### 7.6.4. Adsorção Sólido / Solução

Temos a relação geral:

$$\Gamma_s = (C_o - C) (V / m) \quad [7.33.]$$

onde:

$\Gamma_s$  = coeficiente de adsorção [ $g_f g_f^{-1}$ ],

$C_0$  = concentração inicial [ $g_f cm^{-3}$ ],

$C$  = concentração de equilíbrio, após adsorção [ $g_f cm^{-3}$ ],

$V$  = volume da solução [ $cm^3$ ],

$m$  = peso de substancia adsorvida [ $g_f$ ].

Para soluções diluídas, aplica-se a relação de *Freundlich*:

$$\Gamma_s = K C^{1/n}, \quad [7.34.]$$

onde:

$1/n = 0,1$  a  $0,5$ ,

$\Gamma_s$  = moles fixados por grama de adsorvente.

Para concentrações maiores:

$$\Gamma_s = \Gamma_{s_{max}} \cdot [\alpha C / (1 + \alpha C)], \quad [7.35.]$$

onde:

$\alpha$  = fator de correção.

Há a adsorção aparente, onde só o soluto é tomado em conta, e a adsorção real, em que toma-se em conta a adsorção tanto do soluto como do solvente.

Os eletrólitos (soluções aquosas, ou de outros solventes, de condutores não metálicos onde a corrente é determinada pelo movimento dos íons) são adsorvidos de duas maneiras:

- a) adsorção por adsorventes na estrutura atômica (não polares, com ligação covalente);
- b) adsorção por adsorvente com troca iônica (polares, com ligação eletrovalente).

Em geral, os adsorventes não polares não adsorvem eletrólitos. A explicação deve-se à estrutura da superfície do sólido, cujas características serão definidas no Capítulo 8.

O carvão ativado, não polar, deveria não atrair os eletrólitos. Ocorre, porém, o contrário, e a explicação reside na natureza complexa do carvão ativado, onde as impurezas - as cinzas - conferem características polares.

A carga superficial  $\sigma_s$  sobre um sólido imerso em água é determinada pela densidade da adsorção dos íons determinantes de potencial (capítulo 8) da superfície sólida, conforme a relação (45):

$$\sigma_s = F (\Gamma_{M^+} - \Gamma_{A^-}) , \quad [7.36.]$$

onde:

$F$  = constante de *Faraday*,

$\Gamma_{M^+}$  = densidade de adsorção [ $\text{mol cm}^{-2}$ ], dos cátions determinantes de

potencial,

$\Gamma_{A^-}$  = densidade de adsorção dos ânions determinantes de potencial (45).

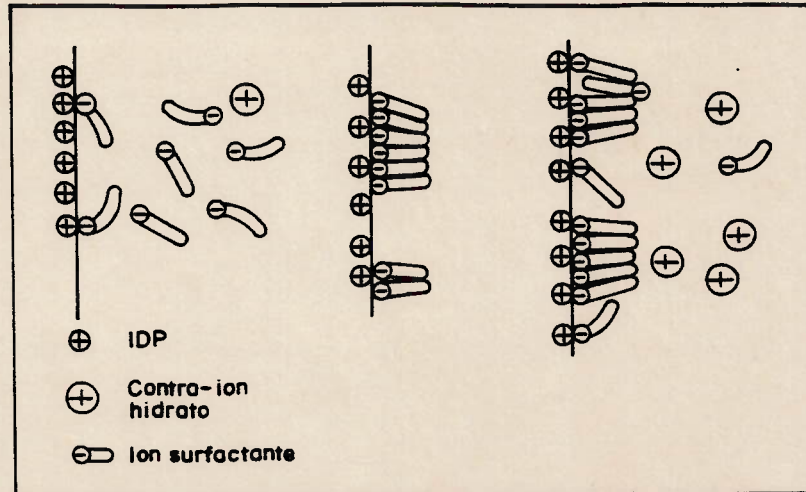
A adsorção de surfatante (agente ativo de superfície que afeta as propriedades de um fluido ou sólido, concentrando-se na camada da superfície) é indicada na figura 7.07. (45: 70). Distinguem-se três regiões:

Região (I) - a adsorção ocorre simplesmente por troca iônica, ou seja atração eletrostática possivelmente com o grupo hidrofóbico presente no substrato:

$$\Delta G^0_{ads} = 2 F \psi \delta;$$

Região (II) - Há um incremento marcante na adsorção específica, resultando da interação das cadeias hidrofóbicas dos íons do surfatante com aqueles previamente adsorvidos. A agregação dos grupos hidrofóbicos que forma micelas na interface pode ocorrer a concentrações inferiores à concentração crítica de micelas de surfatante. O fenômeno foi denominado "formação de hemimicelas" e tem-se:

$$\Delta G^0_{ads} = n \phi;$$



$\Delta G^{\circ}_{ads}$  = energia livre, padrão de Gibbs [kcal / mol],  
 $\psi$  = potencial eletroquímico [μV],  
 $F$  = constante de Faraday [A / s],  
 $\psi_{\delta}$  = potencial da camada Stern [μV],  
 $n$  = número de moles por grupo  $\text{CH}_2$   
 $\phi$  = energia de coesão por mol do grupo  $\text{CH}_2$  [kcal / mol]

Figura 7.07. - (a) Isoterma de adsorção de íons surfatante; (b) Representação esquemática da adsorção de íons surfatante na dupla camada, mostrando-se a adsorção de íons individuais e associados em hemimicelas

Região (III) - a inclinação da isoterma é reduzida devido ao fato de que a adsorção deve compensar a repulsão eletrostática entre os íons que chegam e os similares da superfície carregada do sólido; a adsorção é eletrostática e específica, sendo a energia livre total de adsorção o somatório de todas as contribuições parciais:

$$\Delta G^{\circ}_{ads} = 2 F \psi_{\delta} + n \phi.$$

### 7.6.5. Exemplos de Adsorção no Tratamento Mineral

- 1) No caso de carvão ativado, principalmente no processo CIP, há uma regeneração do adsorvente de 95 % (5 % do carvão é perdido mecanicamente) (53).
- 2) A bio-adsorção em tanques com agitação retira os contaminantes constituídos por metais pesados; a bio-adsorção é seguida pela flotação dos metais (71).
- 3) Os sulfetos de metais não são considerados adsorventes devido à área específica reduzida ( $\sim 10 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Na presença de bactérias redutoras de sulfato (*BRS*) pode-se produzir um material com  $1.500 \text{ m}^2/\text{g}$ , para descontaminação da água de metais pesados (72).
- 4) Os reagentes dos efluentes são adsorvidos por carvão ativado, argilas e carvão finamente moído, retirando-se 90 % dos reagentes (73).
- 5) A magnetita é utilizada para a adsorção eletrostática de impurezas orgânicas da água efluente. A remoção pode ser efetuada por separação magnética (74).
- 6) A adsorção de reagente magnético (na polpa adiciona-se magnetita muito fina ou óleo carregado de magnetita, após uma agitação enérgica) na superfície de partículas finas chama-se de "Método com carregadores magnéticos". A remoção pode ser efetuada por vários processos, entre eles *HGMS*<sup>8</sup> (75).
- 7) O arsênio em solução efluente (proveniente da absorção de gases na ustulação de arsenopirita) é adsorvido pela pirita fina (76).
- 8) O chumbo dissolvido na água retida nos poros do solo é adsorvido por terra arenosa, degradada (solo rico em areia com pouco argila e com muito material orgânico). A adsorção segue as isotermas de *Freundlich* ou *Langmuir*. A adsorção aumenta com o pH. O método pode ser utilizado em dois sentidos: aumentar o pH para

---

<sup>8</sup>*HGMS* é a abreviação da expressão em inglês *High Gradient Magnetic Separation*, ou seja Separação Magnética de Alto Gradiente.

melhor fixar os metais pesados nos solos ou diminuir o pH para favorecer a dessorção e a remoção de metais pesados através de um fluxo de água (*flushing*) (77).

## 8. PROPRIEDADES ELÉTRICAS NA INTERFACE ÁGUA - MINÉRIO

### 8.1. Dupla Camada Elétrica (35; 45; 78; 88)

#### 8.1.1. Fenômenos elétricos na interfaces dos minerais.

As partículas de uma fase possuem um estado energético diferente na superfície comparando com o volume, o que provoca um rearranjo específico delas.

Se duas fases que entram em contato contêm, na superfície, partículas carregadas (íons ou elétrons), por causa do rearranjo energético aparece uma carga elétrica de superfície. As duas fases carregam-se com o mesmo valor e com sinais contrários mantendo a neutralidade elétrica; forma-se uma dupla camada elétrica (DCE) caracterizada por uma diferença de potencial, com as placas localizadas nas duas fases.

Quando as duas fases não contêm cargas livres, porém contêm dipolos orientados (água por exemplo), há cargas móveis com transferência entre a superfície mineral e a solução. A interface carrega-se com cargas de sinal contrário (elétrons de condução). A dupla camada elétrica que se forma possui uma diferença de potencial chamada potencial de eletrodo.

Há dois tipos de potencial, um microscópico, chamado de potencial *Galvani*  $\phi$  e um macroscópico, chamado de potencial Volta  $\psi$  (de cavidade ou de contato).

O potencial galvânico refere-se ao potencial gerado por forças químicas. O potencial Volta é gerado por forças eletrostáticas macroscópicas. Desse dois valores se deduz o valor do salto de potencial de superfície, assim definido:

$$\chi = \phi - \psi$$

[8.1.]



### 8.1.2. Estrutura

Na imersão de uma partícula sólida na água, ocorre o aparecimento de uma carga superficial. A carga desses sólidos suspensos na solução atrai uma atmosfera de íons de carga oposta (contra-íons); sendo parte dessa atmosfera difusa. O conjunto carga de superfície / carga difusa é designado por "dupla camada elétrica - DCE".

Conforme a teoria de *Helmholtz* sobre a dupla camada, o número de cargas na superfície do sólidos é igual àquele das cargas de sinal contrário (contra-íons) da solução. As duas camadas são consideradas imóveis. Nestas condições, a dupla camada elétrica pode ser assimilada com um condensador cuja distância entre as placas ( $\delta$ ) é de aproximadamente  $10^{-8}$  cm. O potencial entre as placas, ou seja, entre as duas fases varia de maneira contínua, fato que conduz à aparição, entre as duas fases, de uma diferença de potencial  $\psi$ .

A teoria de *Helmholtz* sobre a DCE mostrou-se insuficiente para explicar alguns fenômenos elétricos de superfície. As pesquisas efetuadas posteriormente (*Stern, Gouy & Chapman, Grahame*) conduziram à conclusão de que na realidade a DCE apresenta-se de maneira como passa a se expor.

Na imediata vizinhança da superfície do sólido, a uma distância igual ao raio do íon, encontra-se uma camada compacta de contra-íons, os quais são fortemente ligados à superfície, movendo-se junto com ela. A uma distância maior do que  $\delta$  na solução encontram-se íons de mesmo sinal, distribuídos numa distância  $d$ . No interior do espaço  $\delta$  o potencial elétrico varia linearmente e rápido com a distância, enquanto no intervalo  $d$  o potencial varia lentamente, sendo seu gradiente não constante. A camada compacta, de espessura  $\delta$ , tem o nome de camada *Stern* e a camada difusa de espessura  $d$ , camada *Gouy*.

Na página seguinte estão expostas a estrutura da dupla camada elétrica, Figura 8.01. e a variação do potencial elétrico em função da distancia da superfície do mineral, Figura 8.02. (70).

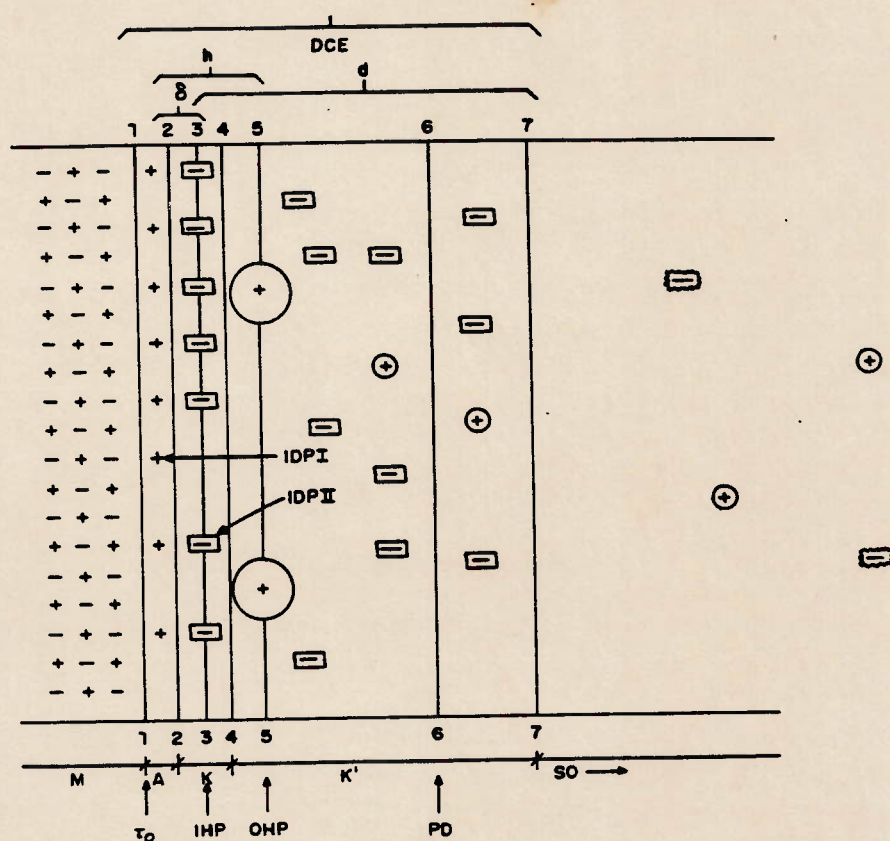


Figura 8.01. (70) Estrutura da Dupla Camada Elétrica

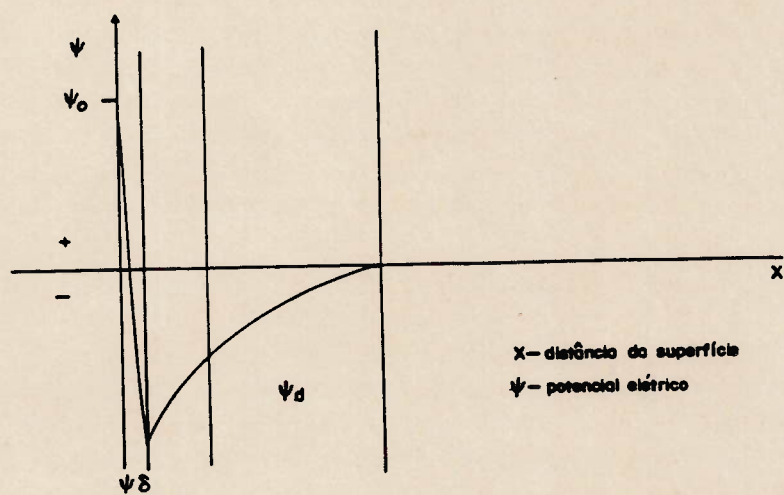


Figura 8.02. (70) - Variação do Potencial Elétrico com a Distância da Superfície Mineral

Em continuação expomos a legenda desta figuras:

- ; + íons na rede do mineral,
- + cátion na superfície do mineral,
- contra-íon adsorvido especificamente,
- ⊕ co-íon hidratado adsorvido não especificamente,
- contra-íon na solução aquosa,
- ⊕ co-íon na solução aquosa.
- M parte da rede do mineral, cuja superfície recebe carga positiva sendo que só os anions passaram na solução,
- A espaço situado entre as linhas 1 e 2, povoado com IDP<sup>I</sup> - cátions do mineral,
- K espaço situado entre as linhas 2 e 4 IDP<sup>II</sup> (contra-íons), anions no nosso caso, camada *Stern*,
- K' espaço situado entre as linhas 4 e 7, onde a repartição dos contra-íons é desordenada e a concentração deles abaixa com o afastamento da linha 3, - camada difusa ou camada de *Gouy-Chapman*,
- SO solução aquosa,
- IDP íons determinantes de potencial,
- DCE dupla camada elétrica, inclui as camadas equivalentes a: carga de superfície, íons adsorvidos especificamente (camada *Stern*) e íons adsorvidos eletrostaticamente na camada difusa,
- h raio de hidratação,
- δ raio dos IDP<sup>II</sup> adsorvidos na camada *Stern*,
- τ<sub>0</sub> carga da superfície mineral,
- d distância entre raio do IDP<sup>II</sup> (δ; 3-3) e PD (6-6).
- Linha 1-1 limite entre as camadas alterada e não alterada da rede,
- Linha 2-2 superfície limite entre mineral (IDP<sup>I</sup>) e solução aquosa; aí surge o potencial electroquímico (termodinâmico ou total) "ψ",
- Linha 3-3, IHP plano interno de *Helmholtz*, o lugar geométrico por onde passam os centros dos contra-íons adsorvidos especificamente,
- Linha 4-4 limite entre a parte ordenada (zona externa) e a parte difusa,
- Linha 5-5, OHP plano externo de *Helmholtz*, o lugar geométrico por onde passam os centros dos co-íons hidratados, adsorvidos não especificamente,
- Linha 6-6, PD plano de deslizamento ou cisalhamento, aí se mede o potencial electrocinético ou potencial zeta "ζ". A partícula mineral se mexe na polpa, coberta por uma película fluida, aderente, da qual limite corresponde ao plano de cisalhamento, plano de deslizamento - PD.
- Linha 7-7 limite da dupla camada elétrica.

Na figura 8.03. observa-se a disposição dos contra-íons e co-íons em dois casos:

- quando na camada de *Stern* há uma deficiência de íons positivos e,
- quando na camada de *Stern* há um excesso de íons positivos.

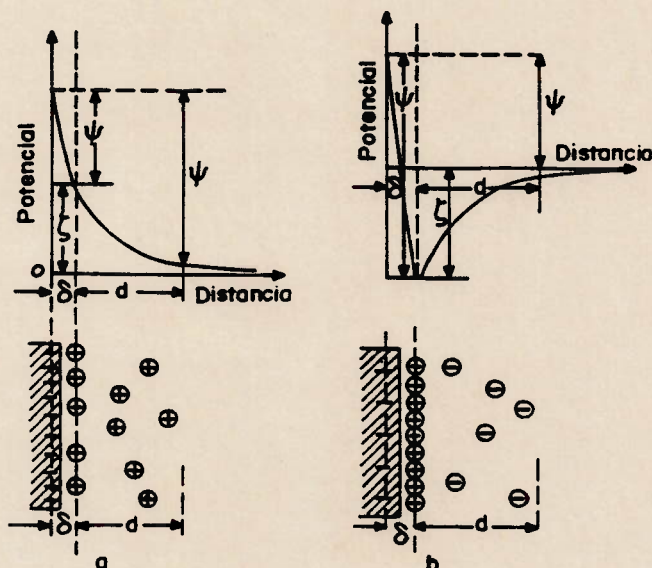


Figura 8.03. - Estrutura da Dupla Camada Elétrica, sem e com Reversão de Potencial.

Caso a):

- na superfície do mineral há  $n$  cargas negativas,
- na camada *Stern* há  $n - x$  íons positivos (contra - íons); em consequência, na camada difusa de *Gouy*, para respeitar a condição geral de neutralidade, haverá  $x$  íons positivos.

O potencial da dupla camada será:

$$\Psi = \Psi_{st} + \zeta \quad [8.2.]$$

onde:

$\Psi_{st}$  = potencial da camada *Stern*,

$\zeta$  = potencial da camada Gouy.

Caso b):

- na superfície do mineral há  $n$  cargas negativas,
- na camada de *Stern* há  $n + x$  íons positivos (contra - íons); em consequência, na camada difusa, para a mesma neutralidade elétrica, haverá  $x$  íons negativos (co - íons).

O potencial da dupla camada elétrica será:

$$\Psi = \Psi_{st} - \zeta \quad [8.03.]$$

Ocorre uma reversão de potencial, no caso b), comparado com caso a). A reversão de potencial depende da concentração de íons determinantes do potencial na camada de *Stern*.

### 8.1.3. Íon Determinante do Potencial (IDP) (45)

Os íons determinantes do potencial (IDP) são aqueles responsáveis pela carga de superfície. Os íons que reagem com os IDP<sup>I</sup>, e, portanto, afetam a carga da superfície das partículas são IDP<sup>II</sup> de segunda ordem ou contra-íons.

Os íons que já existem na superfície do cristal ou aqueles que podem substituí-los, serão adsorvidos com maior facilidade na dupla camada elétrica (DCE) e eles determinarão o potencial da superfície.

### 8.1.4. Potencial Electrocinético ou Potencial Zeta

O potencial electrocinético ou zeta ( $\zeta$ ) é o potencial de uma partícula carregada, com o valor calculado a partir de fenômenos electrocinéticos (eletrosmose, eletroforese,

potencial de escoamento ou potencial de sedimentação). Ele é o potencial da superfície carregada, no plano de cisalhamento entre partícula e solução em redor dela, quando a partícula e solução movem-se uma em relação à outra (70).

A camada de *Stern* (2-4) possui uma espessura reduzida  $\delta$  e fica imóvel, fixada à partícula mineral. A camada de *Gouy* (4-7), mais ampla, acompanha o movimento da partícula até o plano de cisalhamento (PD, 6-6) e o restante dela (6 - 7), o movimento do fluido (Fig. 8.01.).

Por causa do movimento do líquido, e, com ele, dos íons da camada difusa, aparece um excedente de carga que deverá conduzir a uma diferença de potencial:

$$\zeta_{\delta} = (4 \pi \rho d) / D \quad [8.04.]$$

onde:

$\rho$  = densidade da carga elétrica,

$d$  = espessura da camada *Gouy*

$D$  = constante dielétrica do meio (solução).

Tendo a película de líquido aderente à superfície do sólido uma espessura maior do que  $\delta$ , o deslocamento do fluido realiza-se a uma distância  $\delta' > \delta$ ; por este motivo a camada difusa não participa em totalidade ao deslocamento mas sem a parte móvel de espessura  $d'$  ( $d' < d$ ). O salto de potencial  $\zeta$  o qual aparece no plano de cisalhamento quando ocorre o movimento relativo das duas fases chama-se potencial zeta ou electrocinético e tem um valor menor do que  $\zeta_{\delta}$ . Para soluções diluídas pode se aproximar  $d = d'$ , e o potencial zeta é dado pela relação acima mencionada onde  $\rho$  é assimilado com a densidade global de carga da camada imóvel.

Do ponto de vista teórico, entre o potencial electrocinético e o potencial de superfície não há nenhuma relação direta. Por convenção, o sinal do potencial electrocinético considera-se idêntico àquele da densidade de carga da camada imóvel( $\rho$ ) Quando a superfície do sólido tem carga negativa o potencial zeta também possui

valores negativos e vice-versa. É evidente que quando a superfície não possui cargas elétricas o potencial de superfície é igual a PCZ, e o potencial zeta é nulo.

A relação entre o potencial zeta ( $\zeta$ ) e o potencial total ( $\psi$ ), como também a influência da concentração e a valência do eletrólito existente na fase líquida sobre eles, é mostrado na Figura 8.04.

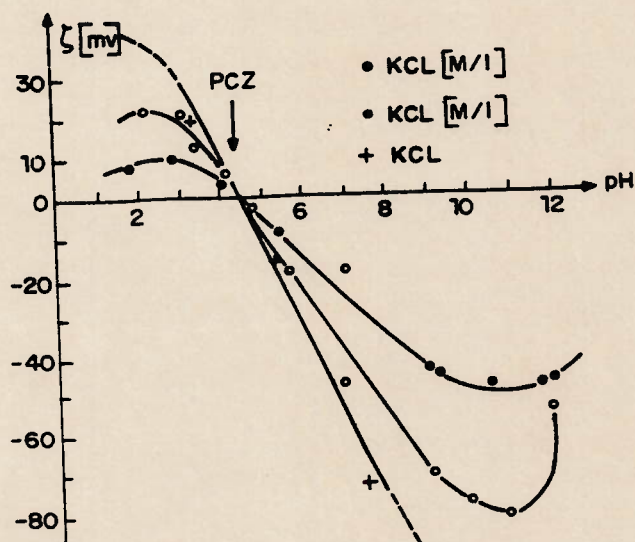


Figura 8.04. (78) - Variação dos potenciais eletrocinético ( $\zeta$ ) e do total ( $\psi$ ) em função da concentração e valências dos eletrólitos presentes na solução

A interpretação qualitativa das curvas da Figura 8.04. se baseia na relação acima mencionada. Geralmente constata-se que para concentrações reduzidas de eletrólito todas as curvas apresentam um máximo. O incremento do  $\zeta$  é determinado a pequenas concentrações do valor da densidade de carga negativa da superfície.

A um aumento da concentração a espessura da camada difusa diminui, fato que conduz à diminuição do potencial electrocinético. A concentrações grandes das soluções a espessura da camada difusa diminui com tendência para zero e o potencial electrocinético torna-se nulo, as curvas interceptam o eixo das abscissas. O surgimento do máximo do potencial electrocinético é uma consequência da superposição entre dois efeitos antagônicos: a concentrações reduzidas ou moderadas predomina a influência do aumento da densidade de carga  $q$  e a concentrações altas, a diminuição do  $d$ .

O máximo do potencial abaixa com o aumento da valência dos cations.

#### 8.1.5. Ponto de Carga Zero (PCZ) (35; 45; 87)

Quando uma partícula mineral é imersa numa solução, na interface sólido/líquido ocorrem fenômenos de migração de íons e moléculas, já indicados.

Em um certo momento, ocorre uma concentração crítica de íons na solução, procedentes da superfície mineral e a transferência de íons entra numa fase estacionária. Em consequência, há uma neutralização dos íons positivos e negativos e o potencial decorrente da movimentação iônica torna-se nulo. O ponto é chamado PCZ, Ponto de Carga Zero.

O potencial zeta ( $\zeta$ ) varia com o pH, passando de valores positivos a valores negativos. Há um pH crítico, onde o potencial zeta ( $\zeta$ ; 6-6 PD) é zero (potencial gerado pela transferência iônica), correspondendo a PCZ. No caso do exemplo da Figura 8.05 o PCZ corresponde a um  $\text{pH} = 4,5$  sendo mineral a cassiterita.

O estudo dos fenômenos electrocinéticos permite a determinação do PCZ, parâmetro de alta importância no estudo da flotação. Assim, no PCZ não há qualquer ação eletrostática entre reagentes de flotação e superfície mineral, para qualquer outro valor do potencial, o reagente será atraído ou repellido; consequentemente no PCZ não ocorre a flotação.



O pH da polpa exerce ação predominante pois, além de regular o potencial electrocinético, também caracteriza o PCZ dos minerais como está mostrado na Tabela 8.1. (78).

Tabela 8.1. (78) - pH característico dos PCZ de alguns minerais

Fórmula	Material	pH caracterizando o PCZ
SiO <sub>2</sub>	sílica gel	1 - 2
SiO <sub>2</sub>	quartzo α	2 - 3
SnO <sub>2</sub>	cassiterita	4,5
ZrO <sub>2</sub>	zirconita	4,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hematita natural	4,8 - 6,7 (no Brasil 5,4 - 5,7)
MgO	magnesita	12

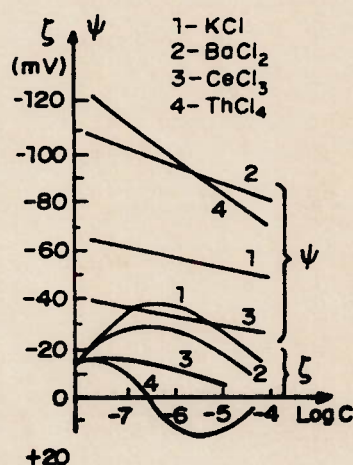


Figura 8.05. - Variação do potencial electrocinético ( $\zeta$ ) da cassiterita em função do pH.

As curvas eletrocapilares são curvas de tipo  $\gamma = f(\psi)$ , onde  $\gamma$  é a tensão superficial e  $\psi$  o potencial interfásico. A função  $\gamma$  passa por um máximo. A carga elétrica é a derivada da tensão em função do potencial: (35)

$$q = F (\Gamma_{M^+} - \Gamma_{A^-}) \quad [8.5.]$$

onde:

$F$  = constante de Faraday,

$\Gamma_{M^+}$  = densidade de adsorção de cátions determinantes de potencial, [mol/cm<sup>2</sup>],

$\Gamma_{A^-}$  = densidade de adsorção de ânions determinantes de potencial, [mol/cm<sup>2</sup>].

## 8.2. Eletrosmose e Eletrosmose Reversa

### a) Fenômeno (43; 80)

#### Eletrosmose

Na Figura 8.06. há um tubo de vidro e, na parte inferior, ele é substituído por uma membrana porosa, equivalente a  $n$  capilares. Nas extremidades do diafragma poroso, colocam-se os eletrodos de uma fonte de corrente contínua. Observa-se que, sob a influência da corrente elétrica, a água do tubo sobe até uma válvula R. O deslocamento de um líquido sob a ação da corrente elétrica chama-se eletrosmose (20).

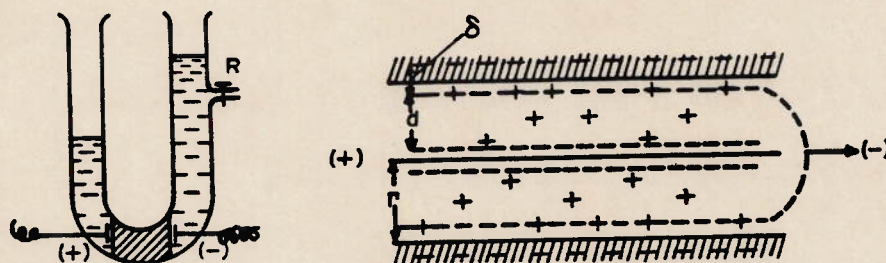


Figura 8.06. (41) Dispositivo para evidenciar a eletrosmose

A explicação do fenômeno reside na estrutura da dupla camada elétrica da superfície dos capilares. Se a superfície é carregada negativamente, na camada difusa, móvel, de espessura  $d'$  (camada de *Gouy*), haverá íons positivos. Sob a influência do campo elétrico, a camada difusa desloca-se para o catodo, levando neste movimento o líquido.

Devido à existência da camada difusa, o líquido é carregado eletricamente e, em consequência, ele se desloca para um dos eletrodos. A camada compacta de *Stern*, de espessura  $\delta$ , fica imóvel, aderente à superfície capilar.

#### Eletrosmose Reversa (67; 80)

A eletrosmose reversa separa o soluto da solução, forçando o solvente fluir através de uma membrana, aplicando-se uma pressão superior à pressão osmótica.

A eletrosmose reversa consegue separar moléculas de soluto da mesma ordem de grandeza com as moléculas do solvente; outros processos de filtração conseguem separar as moléculas do soluto dez vezes maiores do que as moléculas do solvente.

A troca da membrana, o consumo de energia elétrica e a amortização constituem os principais componentes do custo da água dessalinizada por eletrosmose reversa.

#### b) Formulação matemática (13; 41)

Há duas forças opostas:

- a força eletrostática  $F_e$ , gerada pelo campo elétrico [newton]:

$$F_e = H \rho, \quad [8.6.]$$

onde:

$H$  = intensidade do campo elétrico [Tesla],

$\rho$  = densidade da carga elétrica [coulomb  $m^{-2}$ ],

$$\rho = (\zeta D) / (4 \pi d), \text{ (deduzida da fórmula [8.04.] )}$$

onde:

$\zeta$  = potencial electrostático ou potencial zeta,

$D$  = constante dielétrica do meio

$d$  = espessura da camada de *Gouy*, até  $DP$ ;

- e a força de atrito  $F_a$ , que se opõe ao movimento é:

$$F_a = \eta (v / d), \quad [8.7.]$$

onde:

$v / d$  é o gradiente constante da velocidade  $v$ ,

$\eta$  = a viscosidade dinâmica.

Sendo que:

$$F_e = F_a \quad \text{ou} \quad H \rho = \eta (v / d), \quad [8.8.]$$

Há a possibilidade de utilizar as relações capilares ou as relações de resistência ôhmica. As primeiras são de difícil medição e as segundas conduzem à relação:

$$\zeta = [(4 \pi \eta \lambda Q) / D i] 300^2, \quad [8.9.]$$

onde:

$\lambda$  = condutibilidade elétrica [V],

$i = E / R$ , onde:  $E$  = tensão [V], e  $R$  = resistência elétrica [ $\Omega$ ].

Na hipótese de que, no lugar da válvula de escape, o líquido suba no tubo  $U$ , alcança-se um equilíbrio entre a pressão eletrosmótica e a pressão hidrostática. Conforme *Poiseuille*, o volume de líquido que vaza em unidade de tempo, sob o efeito da pressão eletrosmótica  $P$ , através de um capilar de raio  $r$ , é:

$$Q = \pi r^4 P / 8 \eta l. \quad [8.10.]$$

Resulta a fórmula do potencial zeta ( $\zeta$ ):

$$\zeta = (P \pi r^2 / 2 E D) 300^2. \quad [8.11.]$$

#### b) Aplicações

A eletrosmose e a eletrosmose reversa tiveram, nas últimas décadas, amplas aplicações, algumas delas importantes para indústria mineral.

A eletrosmose reversa (EOI) recebeu impulso no processo de dessalinização da água.

Os processos utilizados na indústria mineral serão enumerados sem entrar em detalhes:

1) A eletrosmose do caulim baseia-se nas propriedades elétricas do colóides e é utilizada para o desaguamento das suspensões coloidais. A suspensão do caulim na água, contendo 20 % sólidos é introduzida num aparelho de eletrosmose, onde é sujeita a uma corrente elétrica (corrente contínua de 100 V e 0,01 A/cm<sup>2</sup>) chegando-se à umidade comum das tortas (14-18 %) (28);

2) Separação de rádio-contaminantes pela eletrosmose, importante para os efluentes radioativos (81);

3) A obtenção de água clarificada (polimento) pela remoção de metais pesados, é conseguida pelo uso de carvão ativado, melhor pela troca iônica e, mais eficiente pela eletrosmose inversa (EOI) (82);

4) Tratamento de água, combinando a eletrosmose com a ultrafiltração (83);

5) No processo de dessalinização, através da EOI ou combinando EOI com eletrodialise, obtém-se água clarificada e uma salmoura mais concentrada, a qual poderia possibilitar a obtenção de sais da água do mar, junto com água potável (83);

6) Para reciclagem da água, a eletrosmose fornece uma água usada, liberada de contaminantes (lamas), que normalmente, limitariam a porcentagem de reciclagem; uso no polimento da água (84).

## 9. SISTEMAS DE ÁGUA DE PROCESSO EM USINAS DE BENEFICIAMENTO

### 9.1. Apresentação das Usinas Visitadas

Nos meses de setembro e outubro de 1994, a autora da dissertação fez uma visita técnica objetivando a observação dos sistemas de água de processo, em quatro usinas de beneficiamento em Minas Gerais, cada uma de perfil diferente\*<sup>9</sup>

- 1 - Mineração Morro Agudo S.A. - Paracatu (MMA);
- 2 - ARAFÉRTIL - Araxá S.A. Fertilizantes e Produtos Químicos - Araxá (ARAFÉRTIL).
- 3 - Mineração Morro Velho S.A. - Queiróz (MMV);
- 4 - SAMARCO Mineração S.A. - Mariana (SAMARCO);

A Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração - Araxá - (CBMM) foi visitada, porém de maneira informal, sem coleta de dados técnicos. Conseqüentemente esta visite não será abordada na exposição.

Os aspectos de engenharia que foram observados são: o suprimento de água, os custos operacionais e os investimentos específicos. Há soluções diversificadas para a captação de água de processos, dependendo do tamanho da usina; do consumo específico; da posição da captação em relação à usina; da disponibilidade de água nova, da distância usina-bacia de rejeitos; da qualidade da água reciclada ao processo de concentração etc.

A diversidade de soluções e dos critérios de projeto conduzem a investimentos e a custos variáveis, dentro de amplas faixas, para a água por tonelada de minério.

---

<sup>9</sup>As usinas foram escolhidas após uma consulta aos engenheiros Olintho P. da Silva, M.Sc. Gildo A. de Sa e M.Sc. Salvador L.M. de Almeida, co-autor do Manual de Usinas de Beneficiamento

As usinas visitadas têm as características, que passamos a expor.

(1) MINERAÇÃO MORRO AGUDO: usina de porte médio (300.000 a 500.000 t/ano ROM); opera com minério sulfetado de chumbo e zinco, sendo o processo básico a flotação seletiva; captação de água situada não distante da usina; bacia de rejeitos bem próxima à usina; venda parcial do rejeito dolomítico.

(2) MINERAÇÃO ARAFÉRTIL: usina de grande porte (> 3.000.000 t/ano ROM); opera com apatita e barita, sendo o processo básico a flotação reversa e seletiva; a barita é flotada no início do processo, sendo o concentrado estocado; segue a flotação reversa da apatita (finos naturais, finos de cominuição e grossos). O processamento inclui a remoção da magnetita e ilmenita por separação magnética de baixa e alta intensidade, respectivamente; a captação da água encontra-se a 6 km da usina; a bacia de rejeitos fica localizada não longe da usina; a reciclagem é parcial; o consumo de água de processo, nova e reciclada, é alto (8,4 a 6,4 m<sup>3</sup>/t ROM); a água serve também para retirar os finos naturais ou de cominuição por deslamagem prévia aos processos de concentração.

(3) MINERAÇÃO MORRO VELHO (Raposos - Cuiabá): usina de porte médio (900.000 t/ano ROM); opera com minério aurífero e pirito-aurífero; a água é trazida de aproximadamente 3 km, numa tubulação de grande diâmetro; a deposição de rejeitos realiza-se em várias bacias, cada uma com papel tecnológico definido; a reciclagem é alta, mas as sangrias reduzem a participação da água reciclada; a variedade de processos de concentração e extração conduz a uma participação diferente da água no processo sendo a concentração física o alto consumidor.

(4) MINERAÇÃO SAMARCO: é uma usina de flotação reversa do minério hematítico com ganga silicosa; a produção é alta (perto de 12.000.000 t/ano ROM); o processo de flotação utiliza, para purificação final do concentrado, colunas de flotação; a água é trazida de 5 km de distância; a bacia de rejeitos é reduzida; a reciclagem da

água realiza-se com o OF dos espessadores, sendo da ordem de 40 %; o consumo de água de processo é reduzido.

O Quadro 9.1. indica as diferenças mineralógicas, de abastecimento de água, de destino do efluente e de grau de reciclagem, em cada usina. Evidentemente, tamanha o diversificação conduz a aspectos técnico-econômicos diferentes de uma usina a outra.

Quadro 9.1 - Comparação de quatro usinas brasileiras

	Morro Agudo	ARAFÉRTIL	Morro Velho	SAMARCO
Mineral útil	sulfetos de Pb e Zn	barita; apatita em quartzo	Au livre, grafita aurífera, Au em pirita e arsenopirita	óxidos de Fe em quartzito
Processo de concentração	flotação seletiva	flotação reversa em colunas e separação magnética	concentração gravítica e flotação convencional	flotação reversa; purificação da hematita por flotação em colunas
Captação da água (perto, a média distância, longe da usina)	média	longe	média	perto
Distância usina-bacia de rejeitos	perto	perto	perto	perto-media
Consumo de água de processo (m <sup>3</sup> /t)	médio (L/S=3,9/1)	alto (L/S=8,4/1)	médio (L/S=5,7/1)	reduzido (L/S=1,9/1)
Grau de reciclagem	0	23 %	68 %	38 %
Consumo de água fresca (m <sup>3</sup> /t)	3,9/1	6,4/1	1,8/1	1,2/1



## 9.2. Descrição das usinas visitadas

As Diretorias das usinas visitadas colocaram à nossa disposição um amplo material de informação, que nos permitiu:

- conhecer os processos tecnológicos com seus aspectos de ponta;
- coletar dados econômicos referentes à água;
- concluir sobre a variedade de aspectos da água de processo dentro de cada usina de beneficiamento.

Será indicada nos fluxogramas a diluição da polpa ( $m^3$  água/t sólido) em vários pontos de interesse tecnológico, o que permitirá visualizar o consumo de água. Para não divulgar dados internos das empresas, as proporções líquido/sólido (L/S) não foram acopladas a balanços de massa, porém permitirão concluir sobre o consumo reduzido ou importante de água, o grau de reciclagem e as sangrias.

### 9.2.1. Mineração Morro Agudo (Sulfetos de Chumbo e Zinco)

O fluxograma da Usina Morro Agudo (MMA) é indicado na Figura 9.01. O fluxo consta das seguintes operações unitárias; britagem, moagem primária a 80% -325 #, flotação da galena, flotação da blenda com remoagem do concentrado *rougher* de blenda a -25  $\mu$ m, deposição dos rejeitos, aproveitamento de parte do rejeito dolomítico para venda como corretivo de solo.

O fluxograma indica a diluição em vários pontos do processo. O consumo de água é de 3,92  $m^3$ /t ROM. Estão em andamento pesquisas efetuadas pelo corpo técnico da empresa para reduzir este consumo. Ainda não se pode falar de estabilidade operacional, devido ao fato de que a produção ficou paralisada; após um determinado período recomeçou a extração e a estocagem do minério. Há menos de dois anos a usina de beneficiamento recomeçou a operar, tendo alcançado, em setembro de 1994, 1.000 t/dia, que poderá ser comparada com a sua produção nominal de 1.500 t/dia. A usina é

alimentada com minério estocado, o que gera dificuldades na flotação do minério, exposto por muito tempo a intemperismo.

Até o fim de 1994, não havia reciclagem nenhuma.

As proporções L/S [ $\text{m}^3$  água/t sólido] expressivas são:

- *overflow* dos ciclones primários 3,21 / 1,
- circuito de flotação do chumbo 3,57 / 1,
- saída do scavenger da flotação do chumbo 3,60 / 1,
- entrada no ciclone de remoagem 3,12 / 1,
- alimentação dos cliners do zinco 4,37 / 1,
- rejeito final 3,89 / 1.

As Figuras 9.02 e 9.03 mostram aspecto da flotação de galena (células *WEMCO*) e a captação de água de processo.

#### 9.2.2. ARAFÉRTIL (Apatita e Barita)

O minério é britado em três estágios, após os quais é colocado numa pilha de homogeneização. O minério homogeneizado é cominuído em três estágios: moinho de barras, moinho de bolas e moinho de seixos. O primeiro moinho opera em circuito aberto e os outros dois em circuitos fechados com ciclones.

O material muito fino - lama - que dificulta a flotação, é de duas naturezas principais: o fino natural e o fino gerado durante as operações de cominuição.

O processo de concentração consta de separação de magnetita e ilmenita (dois estágios de separação magnética de baixa e alta intensidade); da flotação da barita, que no momento está sendo estocada e da flotação reversa da apatita (fino natural, fino de

cominuição e grosso). O circuito de flotação foi modernizado, passando a utilizar apenas colunas de flotação.

A filtragem dos concentrados de apatita é precedida de espessadores, os quais permitem a reciclagem de uma fração da água de processo.

A Figura 9.04. indica o fluxograma e as diluições em vários pontos do processo. O fluxograma foi dividido em 9 campos, sendo cada um caracterizado por entradas e saídas de minério e água, balanceados em cada campo (Tabela 9.2.).

O consumo, sem tomar em conta a reciclagem, é de 8,4 m<sup>3</sup>/t ROM; a reciclagem de 23,4 % reduz o consumo de água nova a 6,4 m<sup>3</sup>/t ROM.

O consumo de água constitui uma preocupação para a Diretoria da empresa e o corpo técnico estuda opções de redução do consumo.

Outro assunto que preocupa a Diretoria é a turbidez da água reciclada.

As diluições expressivas são:

- rejeito magnético (após a retirada da magnetita)	4,93 / 1,
- lamas retiradas após a primeira deslamagem	18,26 / 1,
- concentrado da primeira flotação de apatita	3,08 / 1,
- <i>overflow</i> da deslamagem prévia á segunda flotação	35,40 / 1,
- concentrado da segunda flotação	3,84 / 1,
- alimentação da terceira flotação	2,41 / 1,
- concentrado da terceira flotação	1,51 / 1,
- <i>overflow</i> da moagem de seixos	3,00 / 1,
- concentrado da quarta flotação	1,87 / 1,
- rejeito final	8,79 / 1,

- água da reciclagem do segundo espessador      90,69,% do total reciclado,
- água de reciclagem do primeiro espessador      9,31 % do total reciclado.

A Figura 9.05 mostra uma vista parte superior das colunas de flotação e Figura 9.06 um dos espessadores para reciclagem da água de processo (ver a espuma que acompanha o *overflow*), a reservatório de água nova e a bacia de rejeitos nos fundos.

Quadro 9.2. - Proporção L/S em campos da usina ARAFÉRTIL

Campo N°	descrição da operação	entrada e saída	entrada e saída	L/S
		t/h	m <sup>3</sup> /h	
I	moagem de barras e bolas e classificação; separação magnética de baixa intensidade	434	2.073	4,8/1
II	deslamagem e flotação da barita	260	1.420	5,5/1
III	deslamagem do fino natural	147	1.292	8,8/1
IV	flotação da apatita fina natural	49	341	7,0/1
V*	flotação da apatita fina gerada + lama B- 2	95	1.326	14,0/1
V**	-	95	477	5,0/1
VI	flotação da apatita, após retirada do concentrado de barita (flotação de grossos)	176	424	2,4/1
VII	remoagem (moinho de seixos)	106	318	3,0/1
VIII	flotação da apatita remoída (seixos) e deslamagem prévia	106	562	5,3/1
IX	separação magnética de alta intensidade e filtração de finos e grossos	85	134	1,6/1

\* do total da água, 894 m<sup>3</sup>/h representam o OF dos espessadores sendo reciclada, e,

\*\* o novo balanço, após reciclagem da água será V.

### 9.2.3. Mineração Morro Velho - Usina Queiróz (Ouro)

A usina Queiróz recebe minérios de Raposos e de Cuiabá. Os minerais úteis são ouro livre, grafita aurífera, pirita e arsenopirita auríferas. A ganga é principalmente a sílica.

São duas as linhas distintas de processo, que passamos a analisar.

Minério Raposos (840 t/dia ROM): é britado a -7,5 mm, após segue a moagem em circuito fechado, com o *overflow* à 80 % -200#. Na saída do moinho, são montadas mesas estáticas tipo "Rand Lease Plane Table", cujo pré-concentrado é conduzido às mesas vibratórias. O concentrado das mesas vibratórias é um produto final - ouro liberado. Os rejeitos das duas linhas de mesas são conduzidos aos ciclones dos moinhos. O *overflow* dos ciclones segue para cianetação e o *underflow* constitui a carga circulante da moagem.

A diluição de água de processo é de 5,29 / 1. Após reciclagem o consumo de água fresca é de 2 / 1, sendo a reciclagem de 62 %. A sangria representa aproximadamente 1/1.

As diluições representativas do circuito Raposos são:

- alimentação do circuito gravitacional	1,66 / 1,
- alimentação do espessador	5,29 / 1,
- água reciclada	81 %,
- água de sangria	1 / 1 (19 %).

Minério Cuiabá (1.680 t/dia ROM): o circuito de moagem é semelhante àquele de Raposos. A produção de ouro liberado representa 20 % da produção total de ouro.

O *overflow* dos ciclones da moagem é, após espessamento, conduzido a uma flotação convencional de sulfetos, grafita aurífera e ouro liberado, não recuperado na fase gravítica.

As características da flotação são:

- diluição da alimentação da flotação 1,57 / 1,
- concentrado da flotação 1,76 / 1,
- rejeito da flotação 1,51 / 1.

O rejeito da flotação é o rejeito final; ele segue para separação por ciclonagem em duas classes. O *overflow* vai para a barragem de rejeitos Rapaunha. O efluente desta bacia é conduzido à bacia Cocuruto. O *underflow* é dirigido à bacia de calcinados, para formar o dique (taludes de contenção).

Os concentrados da flotação espessados e filtrados alimentam a metalurgia extrativa, que inicia-se com a ustulação, sendo o SO<sub>2</sub> utilizado *in loco* na produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. O sólido ustulado é dirigido a um espessador, cujo *overflow*, contendo As, é conduzido para o tratamento do efluente. O *underflow* do espessador alimenta a cianetação. Todas essas operações e instalações não alteram o consumo global de água de processo das operações de beneficiamento.

O fluxograma é indicado na Figura 9.07.

A Figura 9.08 indica em primeiro plano, um dos espessadores de rejeitos e, no segundo plano, uma das bacias de rejeitos. A Figura 9.09 mostra as bombas e a caixa de água nova, tratada.

#### 9.2.4. Mineração SAMARCO (Minério de Ferro)

A Figura 9.10. indica o fluxograma da usina SAMARCO.

O mineral útil é a hematita recuperável que representa ,37 % do minério. A produção de minério é de 1.500 t/h ou seja  $11,30 \times 10^6$  t/ano e, a produção de concentrados é de  $4,38 \times 10^6$  t/ano.

Os concentrados, após o espessamento, são transportados por um mineroduto de cerca de 400 km, até o porto de Ubú, onde ocorre o processamento final (filtração e pelotização).

O fluxograma consta de britagem, moagem primária, deslamagem a  $-10 \mu\text{m}$ . O minério deslamado, segue para flotação reversa, onde é removida a sílica. O concentrado hematítico após remoagem é purificado em colunas de flotação, onde se consegue reduzir o teor de sílica de aproximadamente 2 % a 1 %. O concentrado final é sujeito a uma etapa de espessamento, para alcançar um produto transportável por mineroduto, ou seja com 65 % sólidos.

O *overflow* dos espessadores, conforme a figura 9.4., é reciclado. O consumo de água de processo é reduzido  $L/S = 1,9 / 1$ . A reciclagem 37 % reduz a quantidade de água fresca a uma proporção água/minério de  $1,2 / 1$ . No momento, recicla-se a água da bacia de rejeitos de maneira intermitente.

As diluições significativas são:

- <i>overflow</i> dos ciclones primários	1 / 1,
- alimentação da flotação convencional	1 / 1,
- concentrado da flotação convencional	1 / 1,
- rejeito da flotação convencional	2,71 / 1,
- rejeito das colunas de flotação	4,20 / 1,
- concentrado das colunas de flotação	0,97 / 1,
- <i>underflow</i> do segundo espessador	0,33 / 1,
- <i>overflow</i> do primeiro espessador	54,4 % da água reciclada,

- *overflow* do segundo espessador 37,2 % da água reciclada,
- água da bacia de rejeitos 8,3 % da água reciclada,
- diluição do rejeito final 2,66 / 1.

A Figura 9.11 mostra as colunas de flotação. A Figura 9.12 mostra o *overflow* do espessador de concentrados, reciclável. Nota-se o anel de contenção de espuma e o raspador de espuma .

### 9.3. Investimento no sistema de água

O investimento específico para água, nova e reciclada, não é fácil de definir, principalmente as operações de manuseio e tratamento da água dentro do pátio industrial. Em princípio foram delimitadas as seguintes seções para estimativa do investimento do sistema:

- captação da água nova;
- tratamento da água de rio;
- transporte (tubulação e bombeamento) da usina de tratamento ao reservatório;
- reservatório de água nova e reciclada;
- tratamento da água reciclada;
- transporte da água reciclada.

Em todos os casos, uma estimativa resultou da cooperação com o corpo técnico da cada usina, alcançando-se valores parciais ou totais do investimento.

Cada usina apresenta de maneira detalhada ou global o investimento para captação, tratamento e transporte da água.



Tabela 9.3. - Investimento em Morro Agudo (valores de 1982)

	US\$ 1,000
Tubulação e anexos	115
Captação	20
Rede elétrica	55
Bombas de água	50
Montagem	10
Sub-total 1	250
Engenharia, 8 %	20
Sub-total 2	270
Contingências, 5%	15
Total	285

Atualização desde 1982 até 10 / 1994: US\$ 456,000

Tabela 9.4. - Investimento em Morro Velho (Raposos e Cuiabá) (valores de 1982)

	US\$ 1,000
Implantação do projeto elaborado no ano de 1982	1,200
Obras, terraplenagem, 30 %	360
Montagem, 25 %	300
Sub-total 1	1,860
Engenharia, 8 %	150
Sub-total 2	2,010
Contingências, 5 %	100
Total	2,110

Atualização desde 1982 até 1994: US\$ 3,380,000

### Investimento na ARAFÉRTIL

Estimativa em dólares de outubro de 1994: US\$ 9,000,000

### Investimento na SAMARCO

Estimativa em dólares de setembro de 1994: US\$ 4,500,000

#### **9.4. Custo anual da água**

O custo anual da água pode ser estimado da seguinte maneira:

- (a) amortização do capital: 10 % do investimento;
- (b) custo da energia elétrica: a partir da potência da bomba ativa, colocando um fator de carga de 0,75 e transformando a potência do HP em kW; considerando o preço do kWh como US \$ 0,03;
- (c) produtos químicos: sulfato de Al ou cal - 50 US \$/t, consumo estimado em  
4 kg/t ou 1 kg/m<sup>3</sup>; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 130 US \$/t (o consumo é de 1 kg/m<sup>3</sup>);
- (d) mão de obra: 5 operários × 450 US \$/mês (inclusive encargos sociais);
- (e) manutenção: 10 % do investimento.

Os resultados estão expostos na Tabela 9.5.

Tabela 9.5. - Custos anuais da água de processo, US \$ 1,000

	Morro Agudo	Morro Velho	ARAFÉRTIL	SAMARCO
Amortização do capital	46,0	338,0	900,0	450,0
Energia elétrica	26,0	57,0	400,0	40,0
Produtos químicos	70,0	210,0	187,0	-
Mão de obra	27,0	27,0	27,0	27,0
Manutenção	46,0	338,0	900,0	450,0
Total, 10 <sup>3</sup> US \$/ano	215,0	970,0	2,414,0	967,0
ROM, 10 <sup>3</sup> t/ano	350,0	830,0	3,080,0	11,330,0
ROM, (US \$/t)	<b>0,63</b>	<b>1,16</b>	<b>0,78</b>	<b>0,09</b>

### 9.5. Soluções e Tentativas nas Quatro Usinas e a Temática da Dissertação

Alguns problemas das usinas - ou assunto para pesquisa em andamento - coincidem com os itens examinados na dissertação. Desta maneira, a realidade industrial foi permeado no conteúdo da dissertação; há a possibilidade de que as soluções mencionadas na dissertação sugiram temas de pesquisa para as usinas.

Vamos citar alguns problemas comuns às usinas e à dissertação:

- reciclagem: em estudo a MMA; existente a usinas MMV e SAMARCO; ARAFÉRTIL tem reciclagem reduzida (aproximadamente 26 %);

- melhoramento da qualidade da água reciclada; processos possíveis: troca iônica a MMA (água com tendências de ser dura); floculação a ARAFÉRTIL; aeração "In Line" a MMV, para eliminar a acidez;

- remoção suplementar da sílica dos concentrados: pesquisa eventualmente a SAMARCO, por floculação seletiva semelhante àquele da usina *Cleveland Cliffs* (24); a mesma solução - floculação seletiva - a ARAFÉRTIL, retomando-se a pesquisa da COPPE(33);

- remoção de metais pesados do efluente (adsorção com carvão ativado ou com carreadores magnéticos); de interesse para todas as usinas, especialmente MMA e MMV.

- adsorção do arsênio pela pirita fina; pesquisa de potencial interesse para a MMV;

- espessamento com água fracamente salina: ARAFÉRTIL (cujo OF apresenta turbidez) e MMA;

- purificação da água reciclada, por troca iônica ou eletrosmose reversa: ARAFÉRTIL (para reduzir a sangria alta) e MMV.

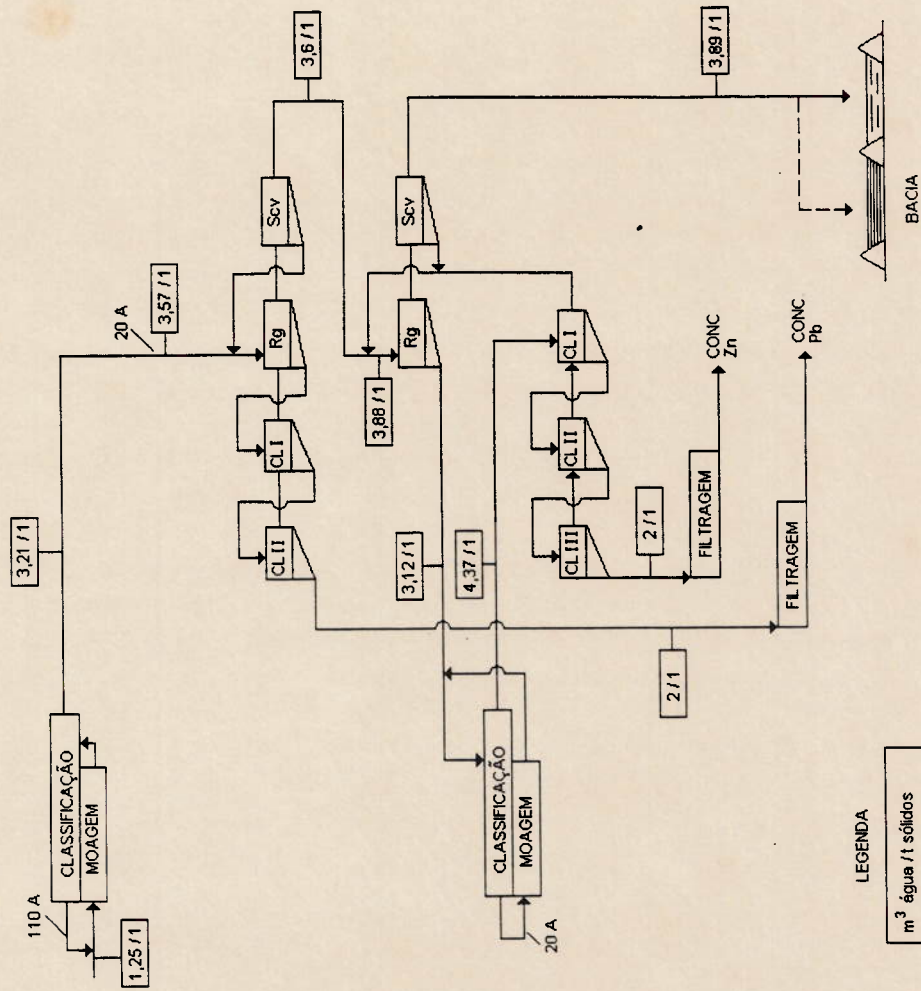


FIG. 9.01 - FLUXOGRAMA DA USINA, MINERAÇÃO MORRO AGUDO  
1 - 09 - 1994 - R. M. T. SCARLAT

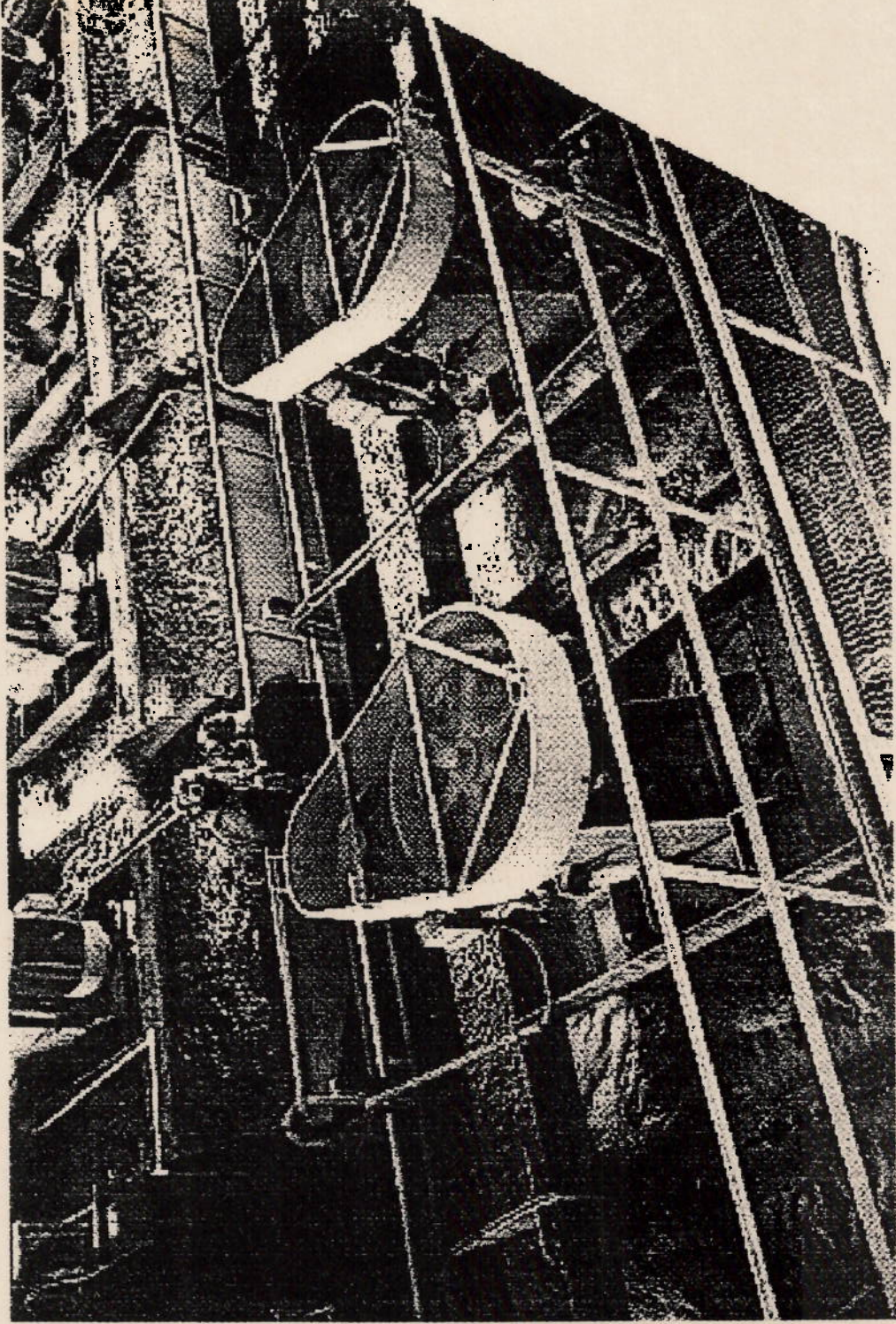


Figura 9.02 - Mineração Morro Agudo, Usina. Flotação da galena e da blenda no primeiro e segundo plano respectivamente.

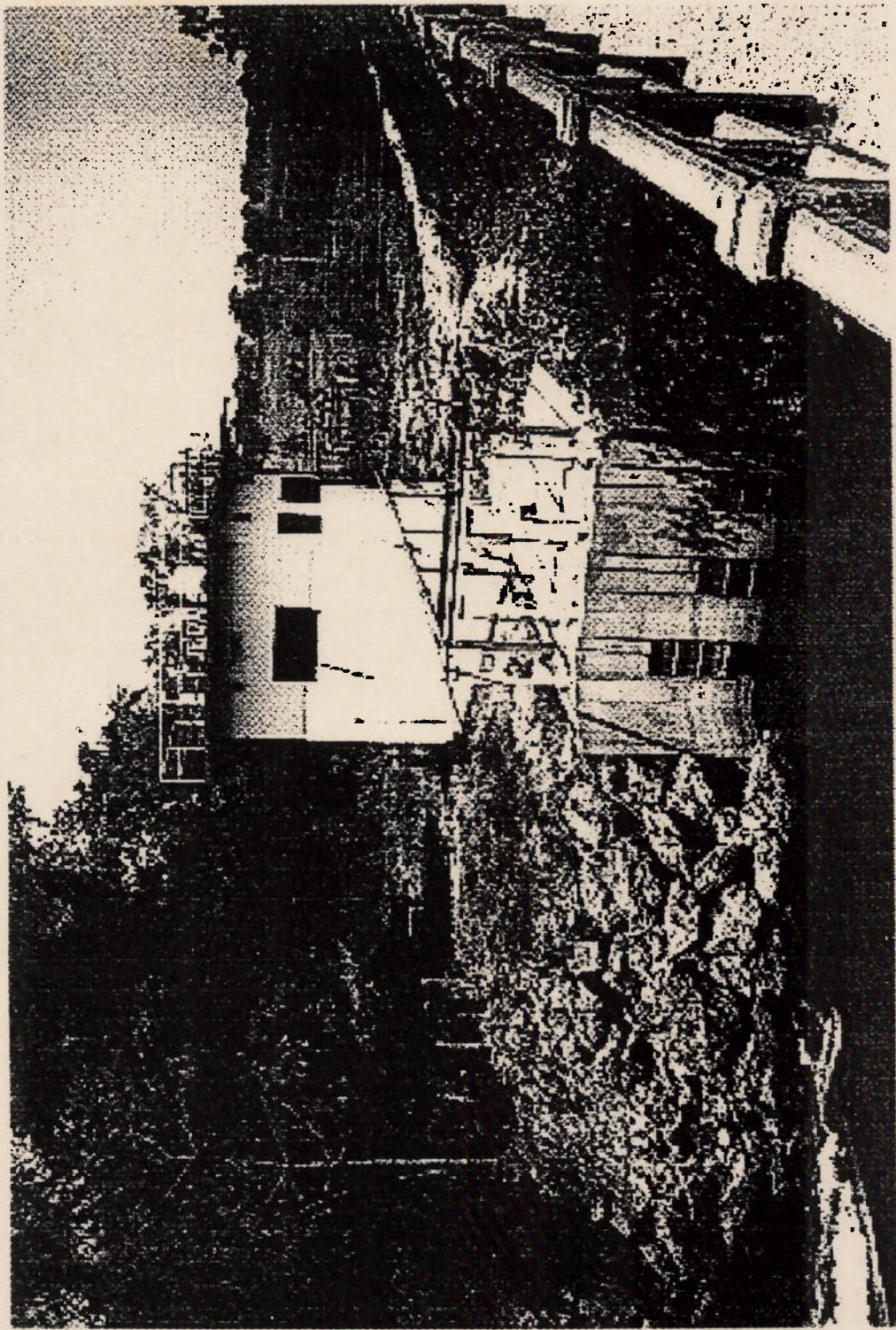


Figura 9.03 - Mineração Morro Agudo, Usina, Captação de Água do Rio Traíras.

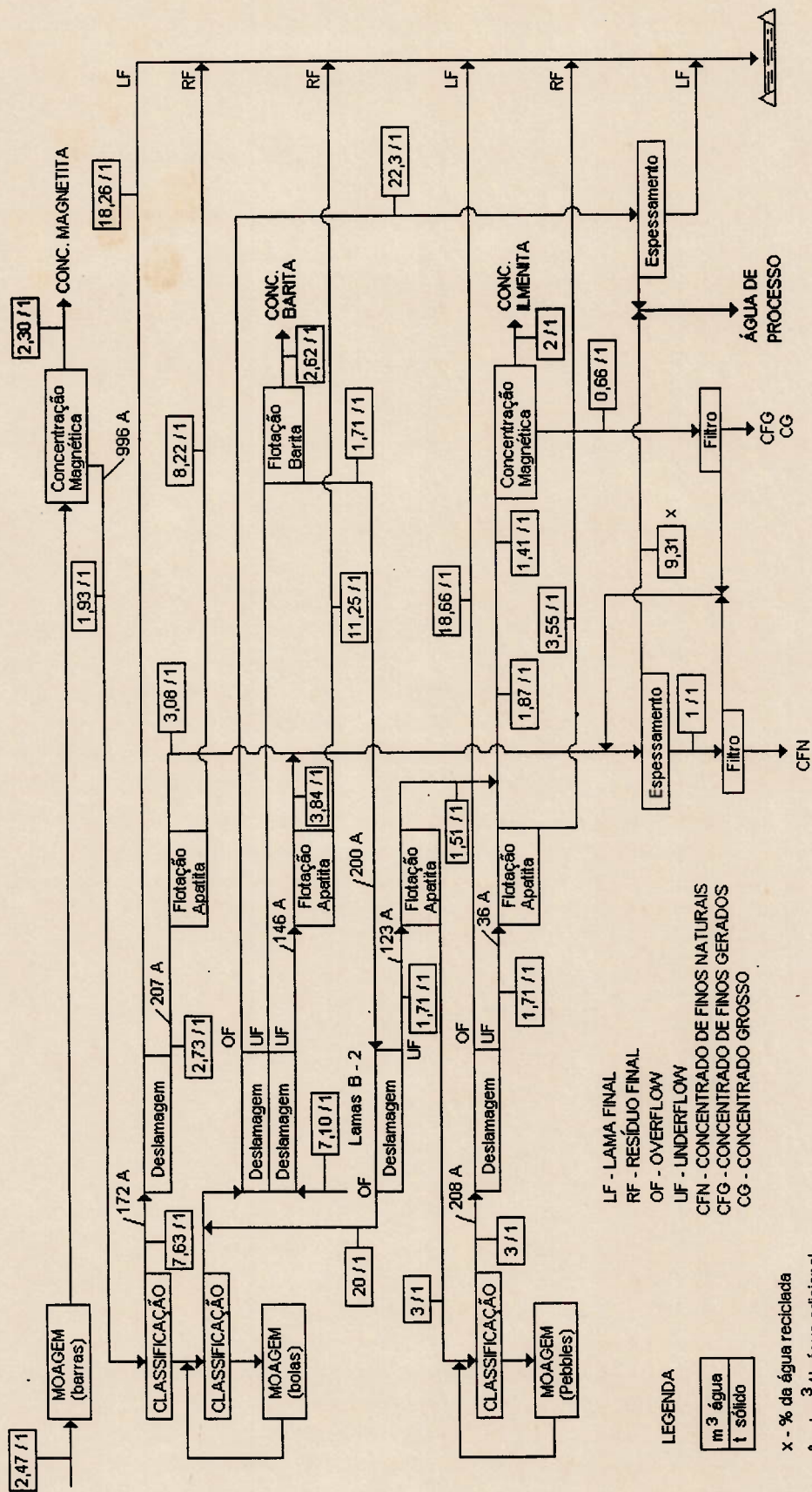


FIG. 9.04 - FLUXOGRAMA DA USINA, MINERAÇÃO ARAFÉRTIL  
 1 - 09 - 1994 - R. M. T. SCARLAT



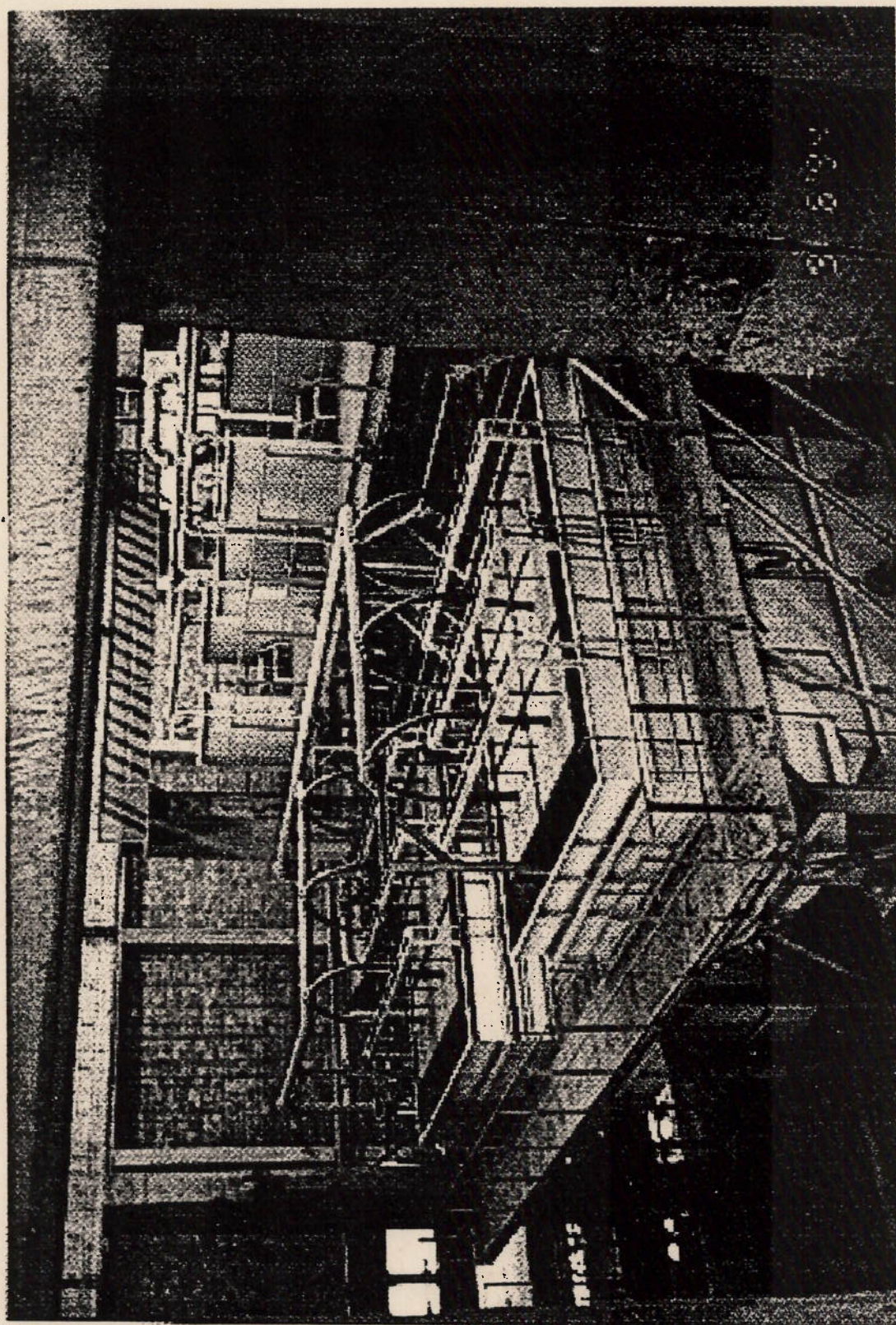


Figura 9.05 - Mineração ARAFÉRTIL, Usina. Vista da parte superior das colunas de flotação reversa.

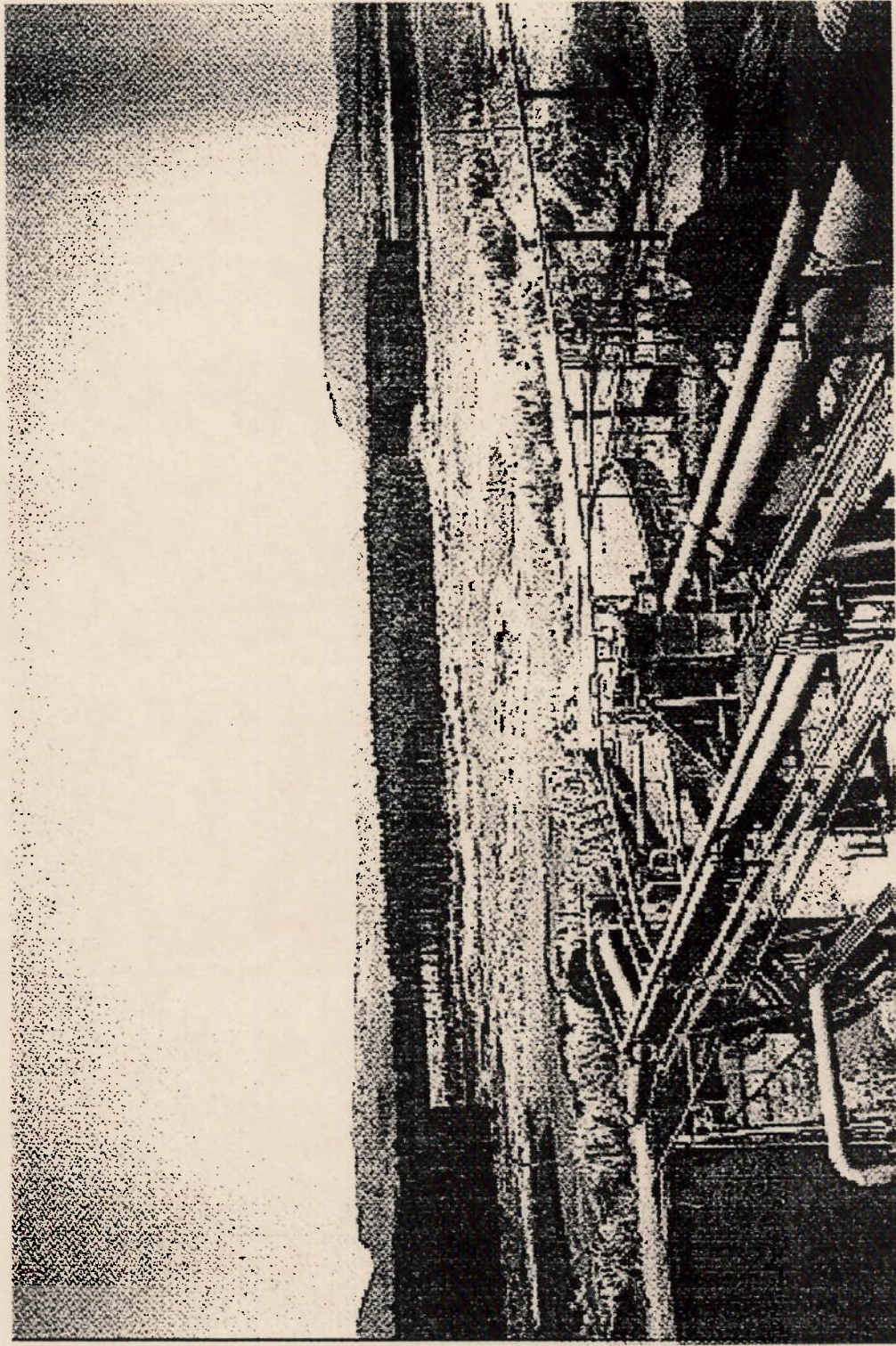


Figura 9.06 - Mineração ARAFÉRTIL, Usina. Espessador para reciclagem d'água de processo, piscina de água nova e no segundo plano a bacia de rejeitos.

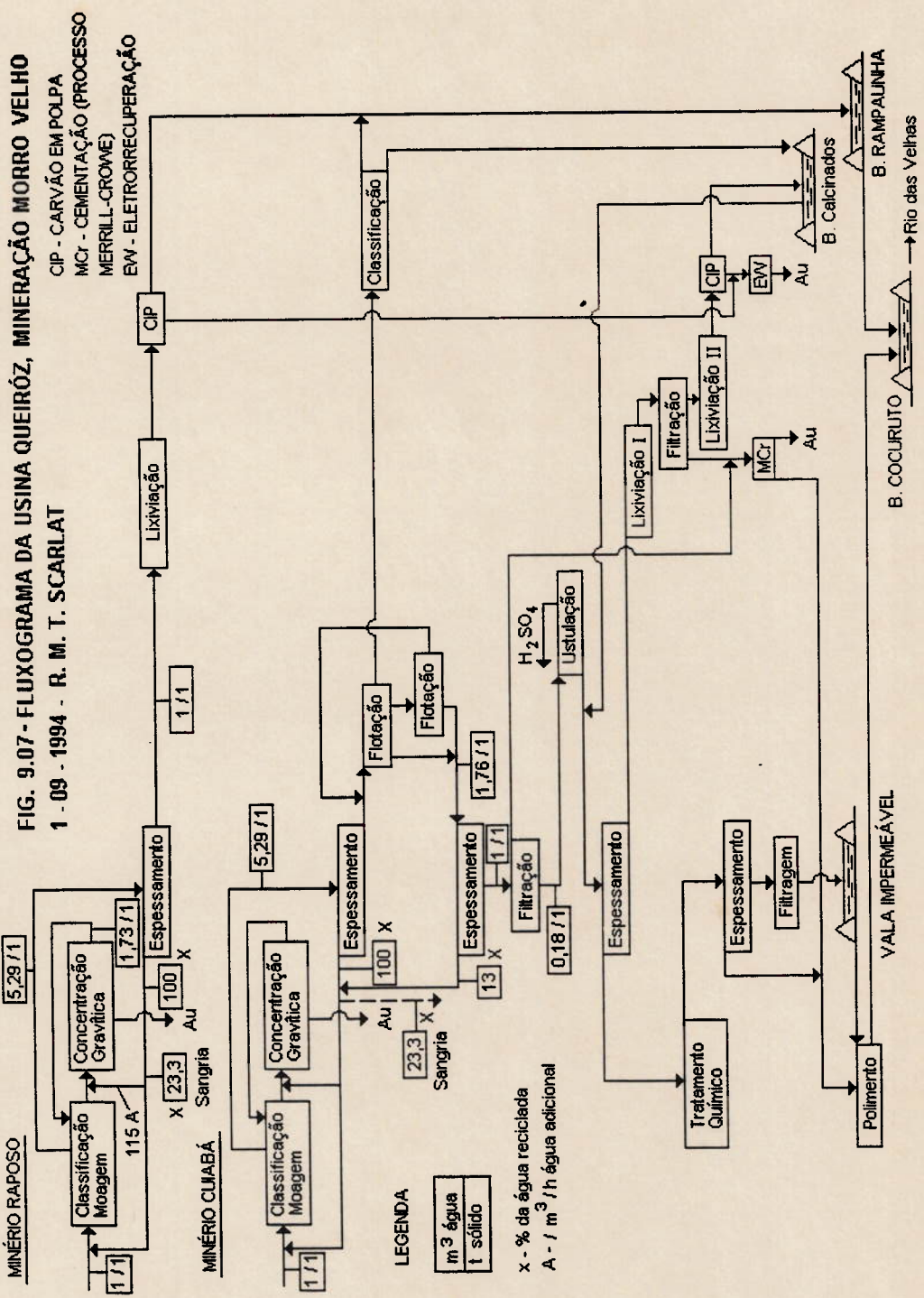




Figura 9.08 - Mineração Morro Velho, Usina Queiróz. Os espessadores prévios ao tratamento e polimento dos efluentes. No segundo plano a bacia de Calcinados e a bacia Cocuruto.

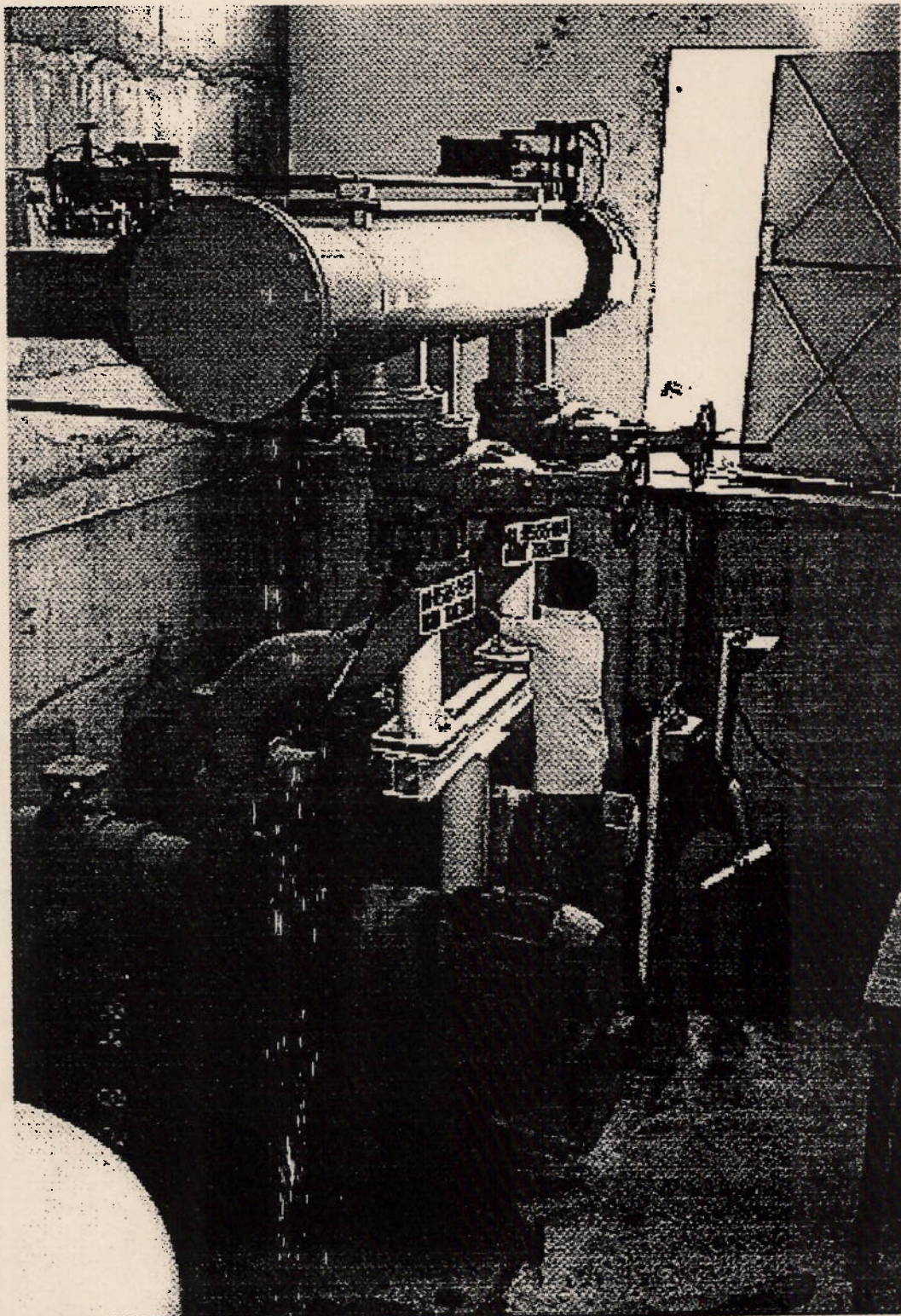


Figura 9.09 - Mineração Morro Velho, Usina Queiróz.  
Caixa e bombas de água tratada.

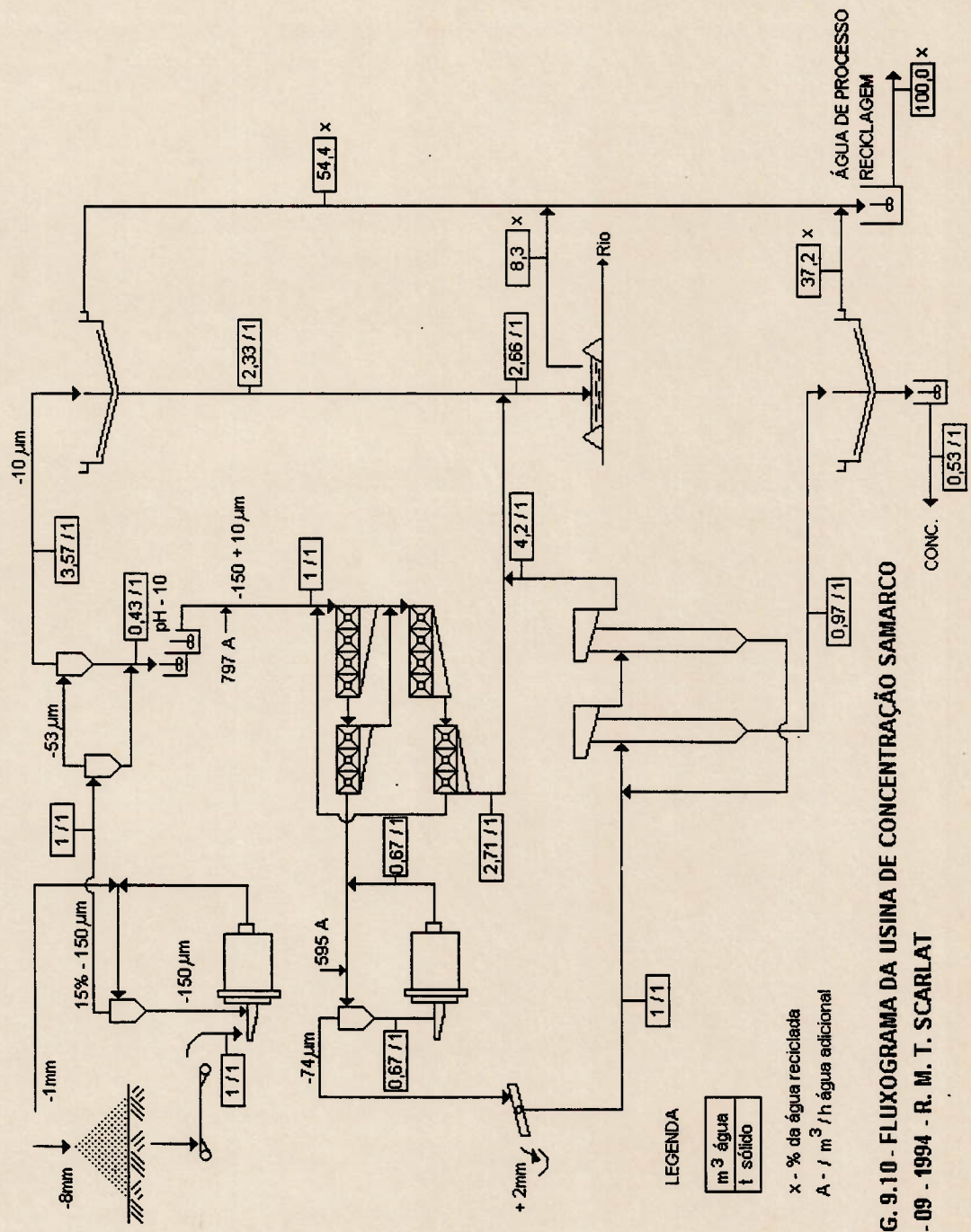


FIG. 9.10 - FLUXOGRAMA DA USINA DE CONCENTRAÇÃO SAMARCO

1 - 09 - 1994 - R. M. T. SCARLAT

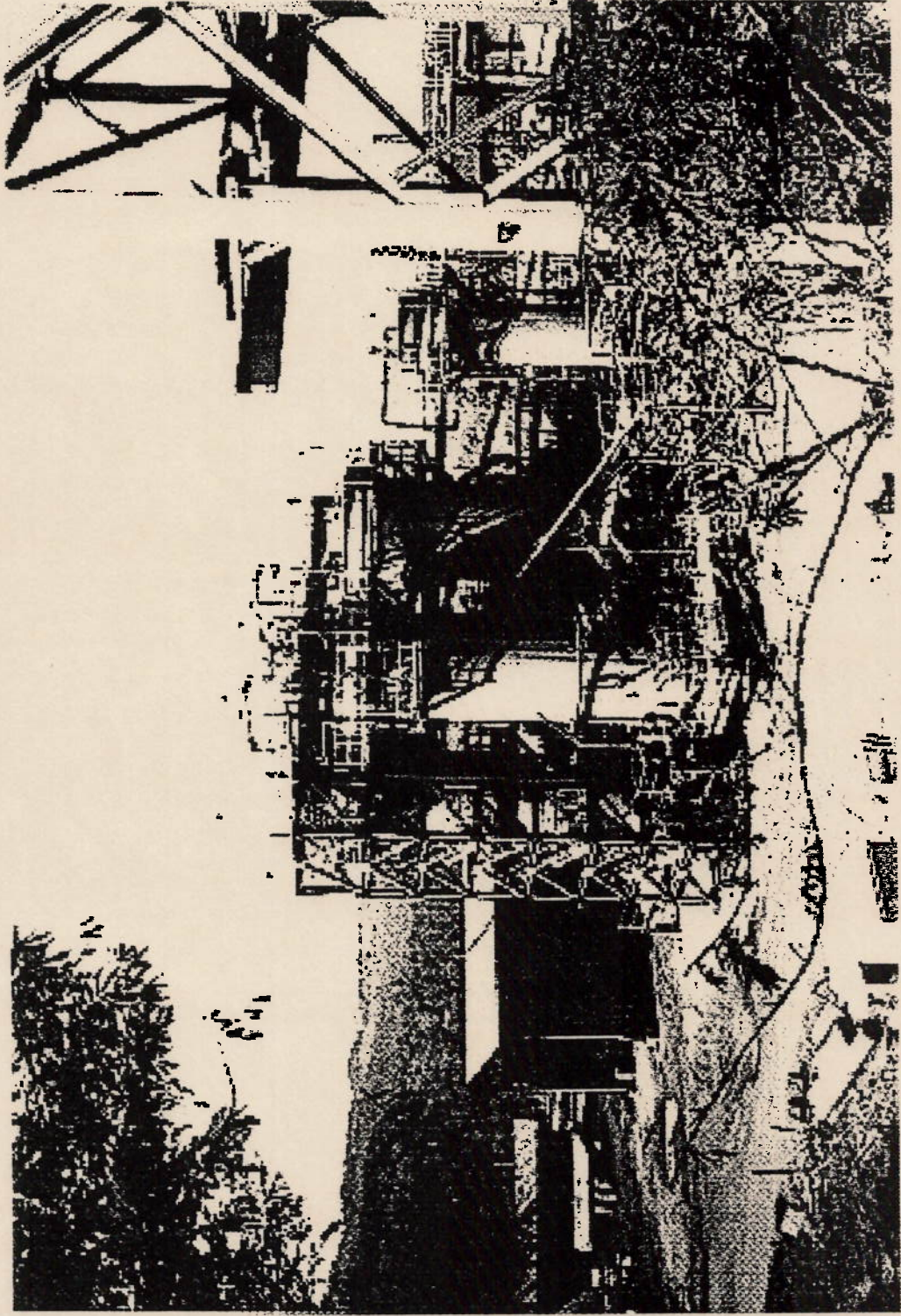


Figura 9.11 - Mineração SAMARCO, Usina. Colunas de flotação reversa  
(*cleaner* dos concentrados de hematita)

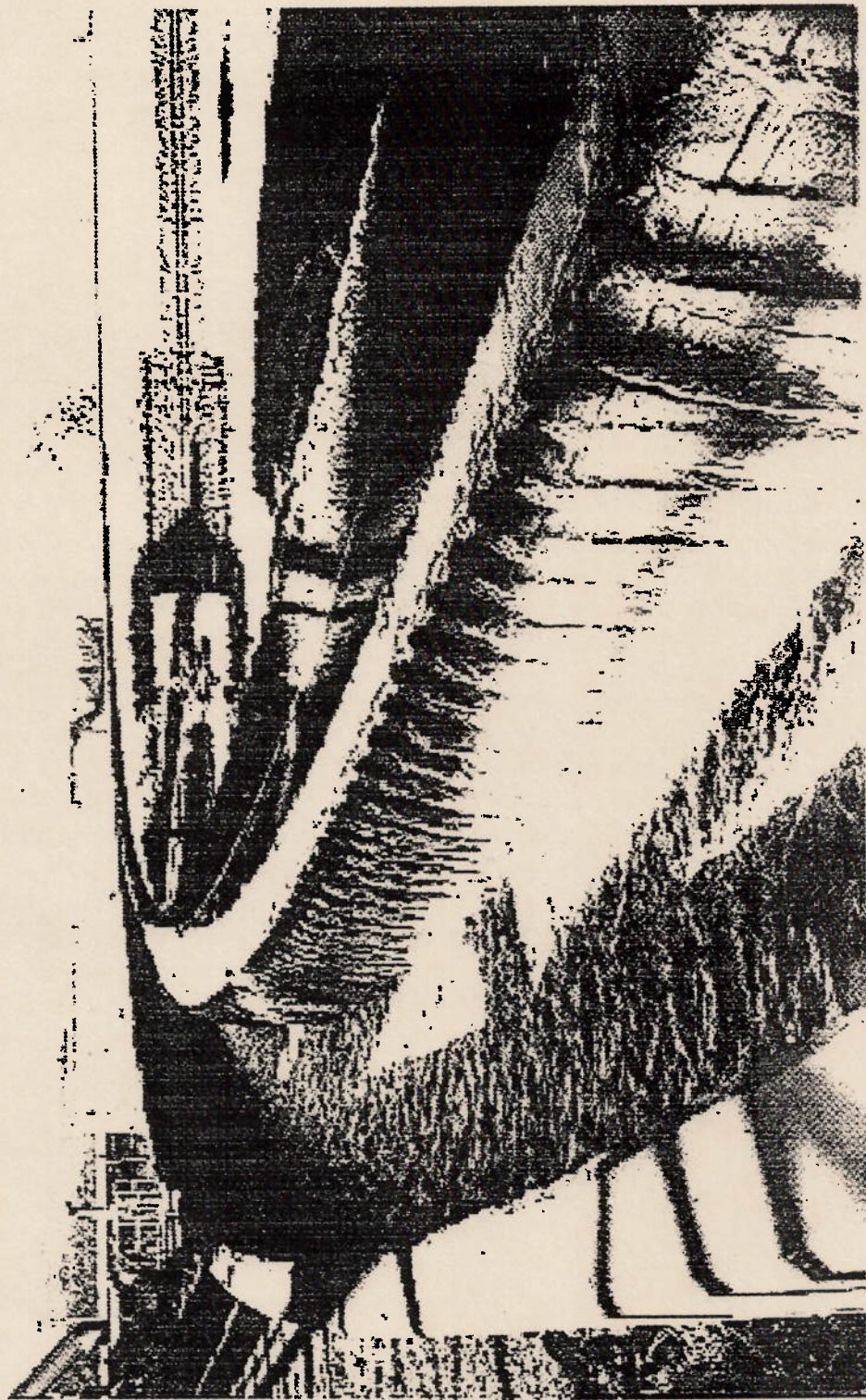


Figura 9.12 - Mineração SAMARCO, Usina. Calha de *overflow* - água reciclável - do espessador de concentrado de hematita.



## CONCLUSÕES

Esta dissertação objetivou tratar o aspecto teórico do inter-relacionamento água-minério. Os aspectos da aplicabilidade prática desse inter-relacionamento devem ser desenvolvidos pelos engenheiros de processos e de projetos.

Uma conclusão nítida deste trabalho é a de que o estudo da participação da água no processamento mineral abre perspectivas para o desenvolvimento desses processos. Vários aspectos dos sistemas água-minério colocam num plano de primeira ordem fatores, tais como: papel do pH, corrosão, floculação, sedimentação e a aceleração dela etc. A percepção dos fenômenos envolvidos conduz a soluções para os problemas e, em muitos casos, as soluções são de última geração.

A escassez da água manifesta em certas regiões do país (sem porém alcançar o nível mundial de escassez) coloca como questão fundamental a ampliação técnica de recursos hídricos naturais. Menciona-se, só a título de exemplo, o crescente uso da reciclagem da água de processo.

O conjunto água-minério forma o centro da dissertação. Por motivos meramente expositivos, o estudo dessa interação foi dividido em:

- aspectos mecânicos da interação,
- aspectos químicos,
- aspectos de viscosidade e reologia,
- aspectos físico-químicos da superfície,
- aspectos elétricos.

Cada conjunto de aspectos de interação conduz a aplicações convencionais e/ou menos convencionais. Nessas conclusões são salientados os aspectos menos convencionais recentemente aplicados industrialmente ou em fase de pesquisa avançada.

A presença mecânica da água nos sistemas água-minérios conduz à possibilidade de utilizar noções, tais como: turbidez que permite medir mais rapidamente a área específica do minério; aceleração da sedimentação via floculação e via salinidade, que amplia a facilidade operacional dos equipamentos de separação líquido/sólido.

O conhecimento dos aspectos químicos do conjunto água-minério permite evitar os efeitos da corrosão sobre máquinas e principalmente sobre corpos moedores e revestimentos, sobretudo pela utilização de novos materiais e de novas maneiras de aplicar os materiais de proteção. É melhor percebida a importância da moagem sobre modificações da rede cristalina dos minerais e da capacidade de solubilizar minerais conhecidos como insolúveis (processo GLPF para cobre). Novos minerais ganharam mercado, devido às suas propriedades de troca iônica colocadas em favor da proteção ambiental. A importância do pH já é bem conhecida nos processos como flotação, lixiviação e floculação seletiva. O pH aparece agora como fator importante em processos gravíticos, por exemplo.

A viscosidade e a reologia são relacionadas ao número de *Reynolds* ou à química coloidal. Porém, o escoamento não-newtoniano para processos com polpas ampliou o uso da reologia à classificação hidráulica (classificador HUKKI por exemplo). A melhor percepção da tixotropia pode conduzir à remoção desse fenômeno em casos indesejáveis, tais como perturbação da vazão em tanques de grande diâmetro (processo de lavagem em contracorrente).

Os aspectos físico-químicos superficiais da interação água-minério são a tensão superficial, a capilaridade, a molhabilidade, o espalhamento líquido/líquido e, principalmente, a adsorção. A medida da molhabilidade das partículas finas torna-se agora uma técnica acessível. A adsorção como fenômeno de purificação de efluentes (finos de pirita adsorvendo arsênio; carvão ativado utilizado na remoção ou valorização

de metais pesados dos efluentes) revela um uso potencial atípico de fenômenos menos convencionais.

Os aspectos elétricos da interface água-minério são relacionados à dupla camada elétrica, aos íons determinantes de potencial, ao potencial zeta etc. Um exemplo de utilização não-convencional de tais aspectos é a osmose reversa para ultra-filtração, onde as partículas de soluto são da mesma ordem de grandeza das partículas de solvente. A dessalinização da água salgada impulsionou o desenvolvimento desse processo; ele foi utilizado há muitos anos na filtração do caulim. Hoje, preconiza-se o uso da eletrosmose reversa para purificar as águas efluentes, visando à reciclagem.

A parte final deste trabalho trata de alguns aspectos dos sistemas de água observados durante visitas técnicas a quatro usinas de beneficiamento em Minas Gerais (Morro Agudo, ARAFÉRTIL, Morro Velho e SAMARCO). Os problemas que as empresas enfrentam são detalhados durante a dissertação (reciclagem, purificação dos efluentes e do OF dos espessadores, processamento de lamas, eliminação da acidez dos efluentes, aceleração da sedimentação etc.). Constatamos com satisfação, que tais problemas estão contemplados em diversos itens desta dissertação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (01) D'ARCY, G.R.; RILEY, J.M.; CROKER, L. **Preliminary process development studies for desulfating great Salt Lake brines and sea water.** Washington, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1967. (U. S. Bureau of Mines. Report of Investigations, 6928).
- (02) SCHULTZE, L.E.; BAUER, D.J. **Recovering lithium chloride from a geothermal brine.** Washington, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1984. (U.S. Bureau of Mines. Report of Investigations, 8883).
- (03) SCHULTZE, L.E.; BAUER, D.J. **Recovering zinc-lead sulfide from a geothermal brine.** Washington, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1985. (U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations, 8922.).
- (04) FERGUSSON, J.E. **The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects.** Oxford, Pergamon, 1990.
- (05) FURON, R. **Le probleme de l'eau dans le monde.** Paris, Payot, 1963.
- (06) AGARWAL, J.C.; et al. A new FIX on metal recovery from sea nodules. In: THOMAS, R., ed. **E/MJ operating handbook of mineral processing,** New York, Mc.Graw Hill, 1977. p. 206-10. (E/MJ Library of Operating Handbooks, v.1).
- (07) MEYER, G. Water: sources and utilization. In: **ENCYCLOPAEDIA of chemical technology.** New York, John Wiley, 1978. v. 24., p. 257-65.
- (08) FAIR, G.M.; GEYER, J.CH.; OKUN, D.A. **Elements of water supply and wastewater disposal.** New York, John Wiley, 1971.
- (09) LITEANU, E.; STAMATIU, M. Geologia tehnica si hidrogeologia. In: MURGU, M.; USER, I., eds. **Indreptar tehnic in minerit.** Bucuresti, Tehnica, 1956. Sectiunea III, p. 66-74.
- (10) FORNARI, M. Em Itabira, a preocupação ambiental começou em 1972. **Brasil Mineral,** p. 14-25, Oct., 1989. Especial: Meio Ambiente.
- (11) STANLEY, D.A.; SCHEINER, B.J.; BROWN, P. **Treatment of Florida surface waters for used in phosphate beneficiation.** Washington, US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1981. (U.S. Bureau of Mines. Report of Investigations, 8535).
- (12) AITKEN, M. D. Waste treatment applications of enzymes opportunities and obstacles. **The Chemical Engineering Journal,** v. 52, n. 2, p. B49-B58, Set. 1993.
- (13) BAKRISH, R. Water: supply and desalination. In: **ENCYCLOPEDIA of chemical technology.** New York, John Wiley, 1978. v. 24, p. 328-65.
- (14) MOTTA, J. P. **Economia mineira nacional.** São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1977. v. 1, p. 133-8.
- (15) YEZZI, E.F. Water. In: WEISS, N.L., ed. **SME mineral processing handbook.** New York, SME/AIME, 1985. Part 4, section 33, p. 33-12/33-17.
- (16) IONESCU, T. et al. **Ape industriale si reziduale.** Bucuresti, Tehnica, 1964. p. 30-5.

- (17) BUSWELL, A. M.; RODEBUSH, W. H. Atmospheric phenomena. In: LYNCH, I.; DAVID, K. **Scientific American**. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1980.
- (18) NENITESCU, C. **Chimie generala**. Bucuresti, Tehnica, 1963.
- (19) MATTER-MULLER, C. Water: Properties. In: **ENCYCLOPAEDIA of chemical technology**. New York, John Wiley, 1978. v. 24, p. 276-93.
- (20) GRAY, H.B.; HAIGHT, J. JR.; GILBERT, P. **Princípios básicos de química**. Buenos Aires, Reverte, 1975.
- (21) HABASHI, F. **Extractive metallurgy**. New York, Gordon and Breach, 1968.
- (22) THRUSH, P. W. **A dictionary of mining, mineral and related terms**. Washington, U.S. Department of the Interior U.S. Government Printing Office, 1968.
- (23) EMMETT Jr., R.C.; DAHLSTROM, D.A. Steam drying of filter cake. **Chemical Engineering Progress**, v. 68, n. 1, p. 51-5, Jan. 1972.
- (24) SISSELMAN, R. Cleveland-Cliffs takes the wraps off revolutionary new Tilden iron ore process. **Engineering and Mining Journal**, v. 176, n. 10, p. 79-84, Oct. 1975.
- (25) **Hydrometallurgy**: a short course sponsored by the TMS continuing Education Committee. S.n.t.
- (26) TEOREANU, I. **Introducere in stiinta materialelor anorganice**. Bucuresti, Tehnica, 1987.
- (27) MATEIESCU, C. **Hidraulica**. Bucuresti, Didactica si Pedagogica, 1963.
- (28) HUBER-PANU, I. Prepararea minereurilor si carbunilor. In: STAMATIU, M. coord. **Manualul inginerului de mine**. Bucuresti, Tehnica, 1956. v. 6, sectiune 32, p. 32-01/32-436.
- (29) BADGER, W.L.; BANCHERO, T.J. **Introduction to chemical engineering**. New York, McGraw-Hill, 1955. p.34-7.
- (30) CHAVES, A.P. **Separação sólido / líquido**. São Paulo, EPUSP, 1994. (Curso apostilado do Convênio EPUSP / CETEM).
- (31) DALE, L.A. Clarification test procedure for dilute pulps. In: **ENVIROTECH RESEARCH CENTER**, S.n.t.
- (32) POLING, G.W. Sedimentation of mill tailings in fresh water and in sea water. **CIM Bulletin**, v. 66, n. 736, p. 97-102, Aug. 1973.
- (33) ANDRADE, G.J.I.; OLIVEIRA, J.F.; Gomes, J.I. Estudo de recuperação de finos de fosfato por floculação seletiva. In: **ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL**, 1, Rio de Janeiro, 1987, **Anais**. Rio de Janeiro, CAPES, s.d. v. 1, p.139-46.
- (34) TRAWINSKI, H. Die mathematische Formulierung der Tromp-Kurve. **Aufbereitungs-Technik**, v. 17, n. 519, p. 248-54 / 449-59, 1976.
- (35) LEJA, J. **Surface chemistry of froth flotation**. New York, Plenum, 1983.
- (36) BURT, R.O. **Gravity concentration technology**. Amsterdam, Elsevier, 1984.
- (37) TAGGART, A.F. **Handbook of mineral dressing ores and industrial minerals**. New York, John Wiley, 1966.
- (38) MENEZES FILHO, L. A. D. et al. Otimização do circuito de moagem/classificação de carbonatitos de Jacupiranga. In: **ENCONTRO**

- DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, 1, Rio de Janeiro, 1987, *Anais*. Rio de Janeiro, CAPES, s.d. v. 1, p.114-28.
- (39) PATCHEJIEFF, B.; GAIDARJIEV, ST.; LAZAROV, D. Technical note opportunities for fine gold recovery from a copper flotation circuit using a Knelson concentrator. *Minerals Engineering*, v.7, n. 2/3, p. 405-9, 1994.
- (40) LINDSBERG, R. **Flotation in grinding circuit by skim-air flotation machine - operational experience from present installations**. Espoo, Outokumpu Oy, Industrial Equipment Division, 1985.
- (41) CHIFU, E. **Chimie coloidală**. Bucuresti, Didactica si Pedagogica, 1969.
- (42) HARRIS, G. E.; FUCHS, M. R.; HOLCOMBE, L. J. A guide to environmental testing. *Chemical Engineering*, v. 99, n. 11, p.98-108, Nov. 1992.
- (43) MARON, S.H.; PRUTTON, C.F. **Principles of physical chemistry**. London, Collier MacMillan, 1965
- (44) SAMART, R.B.; MANCY, K.H. Water analysis. In: **ENCYCLOPAEDIA of chemical technology**. New York, John Wiley, 1978. v. 24, p. 316-26.
- (45) FUERSTENAU, D.W. Mineral-water interface and the electric double layer. In: KING, R.P. **Principles of flotation**. Johannesburg, Institute of Mining and Metallurgy, 1982. p.17-70.
- (46) BRANDÃO, P.R.G.; CAIRES, L.G.; QUEIROZ, D.S.B. Vegetable lipid oil based collectors in the flotation of apatite ores. *Minerals Engineering*, v. 7, n. 7, p. 917-25, 1994.
- (47) HODGKINSON, G. et al. Pyrite flotation from gold leach residues. *Minerals Engineering*, v. 7, n. 5/6, p. 691-8, 1994.
- (48) O'CONNOR, C.T.; DUNNE, R.C. The flotation of gold bearing ores - a review. *Minerals Engineering*, v. 7, n. 7, p. 839-49, 1994.
- (49) ZOUBOULIS, A.I.; KYDROS, K.A.; MATIS, K.A. Arsenic (III) and arsenic (V) removal from solutions by pyrite fines. **Separation Science and Technology**, v. 28, n. 15/16, p. 2449-63, 1993.
- (50) THOMAS, R.A. The dollars and sense of selecting wear materials. **Engineering and Mining Journal**, v. 176, n. 7, p. 83-9, July 1975.
- (51) BERALDO, J.L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo, Edgard Blucher, 1987.
- (52) ESNA-ASHARI, M.; KAUSEL, E.; PASCHEN, P. Vibrating mill as high efficiency reactor for simultaneous grinding, leaching, precipitation and flotation of oxide / sulfide copper ore (GLPF Process). In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DE PROCESSAMENTO DE MINERAIS, 12**, São Paulo, 1977. *Anais*. São Paulo, s.e., 1977. (p. 15, Terceira circular, mesa redonda).
- (53) HIGGINSON, A.; WHITE, R. T. A preliminary survey of the corrosivity of water in gold mines. In: HIGGINSON, A.; WHITE, R.T., **Council for mineral technology**, Randburg, South Africa, 1983. (MINTEK Report CE., n. M 65)
- (54) TELLES, P.C.S. **Tubulações industriais**. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1970.
- (55) SUSSMAN, S. Water (Industrial treatment). In: **ENCYCLOPAEDIA of chemical technology**. New York, John Wiley, 1978. v. 24, p. 367-83.

- (56) U. S. BUREAU OF MINES METALLURGY RESEARCH STAFF. Fighting metals corrosion and abrasion: two techniques push toward wider acceptance. *Engineering and Mining Journal*, v. 176, n. 7, p. 93-8, July 1975.
- (57) BOAS, R.C.V. **Os novos materiais e a corrosão**. Rio de Janeiro, CNPq/CETEM, 1991. (Série Tecnologia Mineral, n. 53).
- (58) ACKMAN, T. E.; KLEINMANN, R.L.P. **In-line aeration and treatment of acid mine drainage**. Washington, U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1984. (U.S. Bureau of Mines. Report of Investigations, 8868).
- (59) RABOCKAI, T. **Físico-química de superfície**. Washington, Secretaria Geral das Organizações dos Estados Americanos, 1979.
- (60) HARRIES-RIE, K. Minerals in waste and effluent treatment. *Industrial Minerals*, n. 308, p.29-39, May 1993.
- (61) WILSON, R. J.; VEASEY, T. J.; SQUIRES, D. M. The application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes. *Minerals Engineering*, v. 7, n. 8, p. 975-84, 1994.
- (62) STOKOVSKI JR., S.; SHAPIRO, A.; PINCOMB, A. Industrial minerals for acid neutralisation. *Industrial Minerals*, n. 302, p.67-73, Nov. 1992.
- (63) ATKINSON, K. The role of mineral processing in reducing the environmental impact of mining activity in Cornwall, UK. *Minerals Engineering*, v. 7, n. 8, p. 967-73, 1994.
- (64) RICH, L.G. **Unit operations of sanitary engineering**. New York, John Wiley, 1961.
- (65) CIOC, D. **Hidraulica**. Bucuresti, Didactica si Pedagogica, 1983.
- (66) HEISKANEN, K.; LAAPUS, H. **On the effects of fluid rheological and flow properties in the wet gravitational classification** Department of Mining and Metallurgy, Helsinki University of Technology, s.d.
- (67) LEILEY, P. E; GAMBILL, W.R. Prediction and correlation of physical properties. Viscosity. In: PERRY, R.H; CHILTON, C.H. **Chemical engineers' handbook**. Tokyo, Japan, 1973. Wc.Graw-Hill Kogakusha. Section 3, p. 246-9.
- (68) ARRUNÁTEGUI, H.C. **Processamento de minerais**. Ouro Preto, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, s.d. p. 74-9.
- (69) VOICULESCU, D.S. **Epurarea apelor industriale în suspensii minerale**. Bucuresti, Editura Tehnica, 1975.
- (70) ROSEN, M.G. **Surfactants and interfacial phenomena**. New York, John Wiley, 1988.
- (71) MATIS K, A.; ZOUBOULIS, A.I.; HANCOCH, I. C. Biosorptive flotation in metal ions recovery. *Separation and Technology*, v. 29, n. 8, p. 1055-71, 1994.
- (72) WATSON, J.H.P.; ELLWOOD, D.C. Biomagnetic separation and extraction process for heavy metals from solutions. *Minerals Engineering*, v. 7, n. 8, p. 1017-29, 1994.

- (73) ZOUBOULIS, A.I.; LAZARIDIS, N.K.; ZAMBOULIS, D. Powdered activated carbon separation from water by foam flotation. **Separation Science and Technology**, v. 29, n. 3, p. 385-400, 1994.
- (74) MOFFAT, G. et al. Selective separations in environmental and industrial processes using magnetic carrier technology. **Minerals Engineering**, v. 7, n. 8, p. 1039-56, 1994.
- (75) LIU, Q.; FRIEDLAENDER, F.J. Fine particle processing by magnetic carrier methods. **Minerals Engineering**, v. 7, n. 4, p. 449-63, 1994.
- (76) KLEINMANN, R.L.P; ERICKSON, P. **Control of acid drainage from coal refuse using anionic surfactants**. Washington, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1983. (U.S. Bureau of Mines. Report of Investigations, 8847).
- (77) REED, B. E.; CLINE, S. R. Retention and release of lead by a very fine sandy loam. I. Isotherm modeling. **Separation Science and Technology**, v. 29, n. 12, p. 1529-51, 1994.
- (78) DOBRESCU, L. **Preparabilitatea substantelor minerale utile**. Bucuresti, Academiei Republicii Socialiste România, 1978.
- (79) BLAZY, P. **La valorisation des mineraux**. Paris, Presses Universitaires de France, 1970.
- (80) JOHNSON, J.S. Reverse osmosis. In: **ENCYCLOPAEDIA of chemical technology**, New York, John Wiley, 1978. v. 21, p. 230-7.
- (81) PRABHAKAR, S. et al. Reverse osmosis separation of radiocontaminants from ammonium diuranate effluents. **Separation Science and Technology**, v. 29, n. 8, p. 1001-10, 1994.
- (82) SILVEIRA, A. The ion exchange deal. **Chemical Engineering**, v. 99, n. 11, p.35-49, Nov. 1992.
- (83) RAMANATHAN, M. Water: pollution. In: **ENCYCLOPAEDIA of chemical technology**. New York, John Wiley, 1978. v. 24, p. 295-314.
- (84) PFAFFLIN, J. R. Water (Reuse). In: **ENCYCLOPAEDIA of chemical technology**. New York, John Wiley, 1978. v. 24, p.420-6.
- (85) CHAVES, A.P. **Caracterização e beneficiamento da fluorita de Apiaí-SP**. São Paulo, 1989. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- (86) SAMPAIO, J.A. **Um estudo eletroquímico da flotação da galena**. Rio de Janeiro, 1995. Tese (Doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- (87) CHAVES, A.P. **Flotação de carvão de Santa Catarina**. São Paulo, 1982. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- (88) PERES, A.E.C. **Controle de mecanismos de processo de flotação**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994 (Curso apostilado do Convênio EPUSP/CETEM).



## LISTA DE FIGURAS

- [2.01.] Precipitação, drenagem e estocagem superficial no desenvolvimento de uma bacia hidrográfica.
- [2.02.] Ciclo da água.
- [2.03.] Intensidade, duração e freqüência das chuvas intensas.
- [2.04.] Diagrama da unidade solar e a osmose reversa - França.
- [2.05.] Perfil geológico estrutural de um reservatório aquífero de sedimento de arenito poroso e permeável.
- [3.01.] Molécula de água.
- [3.02.] Moléculas de água. Distância entre núcleos dos átomos que formam, a molécula; Pontes de hidrogênio entre as moléculas.
- [3.03.] Estrutura do cristal de gelo. (a) visto de cima; (b) visto lateral.
- [3.04.] Curvas de solubilidade de alguns sais na água.
- [3.05.] Efeito do pH na oxidação aquosa da pirita.
- [4.01.] Curvas de sedimentação dos resíduos, em água do mar, com e sem magnetita e em água fresca.
- [4.02.] Curvas de sedimentação dos resíduos, em água fresca, com e sem magnetita e em água do mar artificial e natural.
- [5.01.] Efeito do pH sobre a eficiência de separação do concentrador *Bartles-Mozley*.
- [5.02.] Modelo Esponja do Trocadores de Íons.
- [5.03.] Seqüência das operações na troca iônica.
- [6.01.] Distribuição da velocidade numa tubulação. (a) regime laminar e (b) regime turbulento.
- [6.02.] Fenômeno interno de atrito. Distribuição das velocidades, da deformação e da rotação das partículas num movimento laminar.
- [6.03.] Elementos de escoamento em lamina de água.
- [6.04.] Reogramas para alguns tipos de fluidos.
- [7.01.] Pressão capilar. (a) Superfície concava do menisco e (b) Superfície convexa.
- [7.02.] Acensão capilar: (a) positiva e (b) negativa.
- [7.03.] Sólidos Hidrófilos.
- [7.04.] Sólidos Hidrófobos.
- [7.05.] Isotermas da tensão superficial para quatro ácidos alifáticos consecutivos.
- [7.06.] Isotermas da tensão superficial ( $\sigma$ ) e da adsorção ( $\Gamma$ ).

- [7.07.] (a) Isoterma de adsorção de íons surfatante ; (b) Representação esquemática da adsorção de íons surfatantes na dupla camada, mostrandó-se a adsorção de íons individuais e associados em hemimicelas.
- [8.01.] Estrutura da dupla camada elétrica.
- [8.02.] Variação do potencial elétrico com a distância da superfície mineral.
- [8.03.] Estrutura da dupla camada elétrica, sem e com reversão de potencial.
- [8.04.] Variação do potencial zeta ( $\zeta$ ), da cassiterita, com o pH.
- [8.05.] Variação do potencial electrocinético ( $\zeta$ ) e do total ( $\psi$ ) em função da concentração e valências dos eletrolitos presentes na solução.
- [8.06.] Dispositivo para evidenciar a eletrosmose.
- [9.01] Mineração Morro agudo, Usina Fluxograma
- [9.02] Mineração Morro Agudo, Usina. Flotação da galena e da blenda no primeiro e segundo plano respetivamente.
- [9.03] Mineração Morro Agudo, Usina, Captação de Água do Rio Traíras.
- [9.04] Mineração ARAFÉRTIL, Usina Fluxograma
- [9.05] Mineração ARAFÉRTIL, Usina. Vista da parte superior das colunas de flotação reversa.
- [9.06] Mineração ARAFÉRTIL, Usina. Espessador para recilagem d'água de processo, piscina de água nova e no segundo plano a bacia de rejeitos.
- [9.07] Mineração Morro Velho, Usina Queiroz Fluxograma
- [9.08] Mineração Morro Velho, Usina Queiróz. Os espessadores prévios ao tratamento e polimento dos efluentes. No segundo plano a bacia de Calcinados e a bacia Cocuruto.
- [9.09] Mineração Morro Velho, Usina Queiróz. Caixa e bombas de água tratada.
- [9.10] Usina de Concentração SAMARCO Fluxograma
- [9.11] Mineração SAMARCO, Usina. Colunas de flotação reversa (*cleaner* dos concentrados de hematita).
- [9.12] Mineração SAMARCO, Usina. Calha de *overflow* -água reciclável- do espessador de concentrado de hematita.

## LISTA DE TABELAS

- [2.1.] Qualidade da água de rios - Média mundial.
- [2.2.] Sustâncias comuns nos recursos hídricos naturais.
- [2.3.] Consumo de água nos processos minerais.
- [3.1.] Algumas propriedades da água líquida, a 1 atm.
- [3.2.] Pressão de vapores da água.
- [3.3.] Calor latente de ebulição de alguns líquidos.
- [3.4.] Resistências e condutibilidades.
- [3.5.] Algumas anomalias da água e efeito sobre o meio ambiente.
- [4.1.] Condutividade elétrica de águas de diversas salinidades.
- [5.1.] Efeito do pH e da alcalinidade sobre os níveis de Pb na água de rios.
- [5.2.] Variação da constante de equilíbrio com a temperatura.
- [5.3.] Materiais para troca iônica.
- [6.1.] Ponto crítico e ponto de fluidez zero. Resultados das experiências de *Shelton e De Vaney*.
- [8.1.] Os pH característicos para PCZ de vários minérios.
- [9.1.] Diferenciação de quartzo usinas brasileiras
- [9.2.] Proporção L/S em campos da usina ARAFÉRTIL
- [9.3.] Investimento na Morro Agudo
- [9.4.] Investimento na Morro Velho
- [9.5.] Custos anuais da água de processo