

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	FLOTAÇÃO	14
2.1.1	Princípios de propriedades das interfaces.....	18
2.1.2	Sistema de reagentes	19
2.1.3	Circuitos de flotação.....	26
2.1.4	Máquinas de flotação.....	27
2.2	FLOTAÇÃO DO COBRE DA MINERAÇÃO DO SOSSEGO.....	30
2.3	TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS NA MINERAÇÃO.....	32
2.3.1	Processos para o tratamento dos efluentes líquidos	35
2.3.2	Coagulação/Floculação.....	37
2.4	LEGISLAÇÃO FEDERAL QUANTO AO LANÇAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	TESTES DE DENSIDADE	42
3.1.1	Densidade do sólido	42
3.1.2	Densidade da polpa	43
3.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	43
3.2.1	Preparação da amostra para análise granulométrica.....	43
3.2.2	Preparação da amostra para análise das curvas de sedimentação	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	DENSIDADE DO REJEITO	46
4.2	DENSIDADE DA POLPA	46
4.3	PENEIRAMENTO.....	46
4.4	CURVAS DE SEDIMENTAÇÃO.....	48
5	CONCLUSÃO	52
6	RECOMENDAÇÕES	53
	REFERÊNCIAS	54
	ANEXOS	56

1 INTRODUÇÃO

A indústria de mineração atualmente gera grandes quantidades de efluentes líquidos provenientes do beneficiamento mineral. Na maioria das vezes contem, além de sólidos em suspensão, uma diversidade de reagentes utilizados fundamentalmente nos processos de tratamento de minérios e posteriormente no processo metalúrgico dos concentrados.

Assim sendo, a mineração necessita de elevada disponibilidade de água para usar em seus processos, tendo em vista a utilização de fontes de águas impuras com altos níveis de salinidade (incluindo sais de cálcio, magnésio e ferro como precipitados em potencial) e da recuperação de águas descartadas durante o processo de beneficiamento mineral, a partir de bacias de rejeitos, overflows de espessadores e filtragem.

A flotação é um processo de concentração mineral que permite a obtenção de concentrados com elevados teores e expressivas recuperações. É aplicado no beneficiamento de minérios com baixo teor e granulometria fina. O processo se baseia no comportamento físico-químico das superfícies das partículas minerais presentes numa suspensão aquosa. A utilização de reagentes específicos, denominados coletores, depressores e modificadores, permite a recuperação seletiva dos minerais de interesse por adsorção em bolhas de ar.

Desta forma, a introdução de consideráveis quantidades de espécies dissolvidas, a partir da dissolução de minerais, e a elevação do teor de orgânicos, devido à presença de quantidades residuais de depressores, ativadores, dispersantes, floculantes e coletores, pode afetar significativamente não só os custos e a eficiência, como a água que é descartada no final do processo.

O tratamento dos efluentes líquidos na mineração depende muito do seu objetivo final. Os efluentes, às vezes são depositados sem qualquer tipo de tratamento, ou podem ser tratados, visando, além da redução dos possíveis impactos ambientais, a extração de elementos de valor.

O tratamento de águas efluentes mais comum e mais empregado no setor mineral é a separação em bacias de decantação (lagoa de rejeitos). O objetivo básico é a decantação dos sólidos suspensos e, para tanto, esta deve ter suficiente área superficial, um elevado tempo de retenção e ausência de turbulência

O presente trabalho tem o objetivo de abordar o processo de coagulação/floculação como alternativa de auxílio na sedimentação das partículas sólidas dos efluentes líquidos

gerados na flotação do cobre sulfetado. A relevância do trabalho está na otimização do tempo de sedimentação das partículas e recuperação da água que pode ser reutilizada no processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FLOTAÇÃO

A Flotação é a mais versátil e eficiente técnica de concentração de beneficiamento de minérios, sendo também a mais complexa. É um processo de separação, de natureza físico-química, aplicado a partículas sólidas suspensas em fase aquosa (polpas), que explora as diferenças de características superficiais dos diversos minerais a partir da utilização de reagentes seletivos na separação das espécies.

A concentração de minerais requer três condições básicas: liberabilidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica (Silva, 1973)¹ (apud CHAVES, 2006). A liberação dos grãos dos diferentes minerais é obtida através de operações de fragmentação (britagem e moagem) intercaladas com etapas de separação por tamanho. A separabilidade dinâmica está diretamente ligada aos equipamentos empregados. As máquinas de flotação se caracterizam por possuírem mecanismos capazes de manter as partículas em suspensão e de possibilitar a aeração da polpa. A diferenciabilidade é a base da seletividade do método (CHAVES, 2006).

A seletividade do processo de flotação se baseia no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade. O conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associada a sua umectabilidade ou “molhabilidade” pela água. Partículas mais hidrofóbicas são menos ávidas por água. O conceito oposto à hidrofobicidade é designado como hidrofiliabilidade, afinidade por água (CHAVES, 2006).

Em termos de polaridade, os compostos químicos se dividem em polares e apolares, em função de apresentarem ou não um dipolo permanente. A importância da polaridade reflete-se no fato de que existe afinidade entre substâncias ambas polares ou ambas apolares (ou não-polares), não havendo, geralmente, afinidade entre uma substância polar e apolar como mostra a figura 01 (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

¹ SILVA, A. T. Tratamento de Minérios. Volume 1. Edições Engenharia. EEUFMG, Belo Horizonte, 1973.

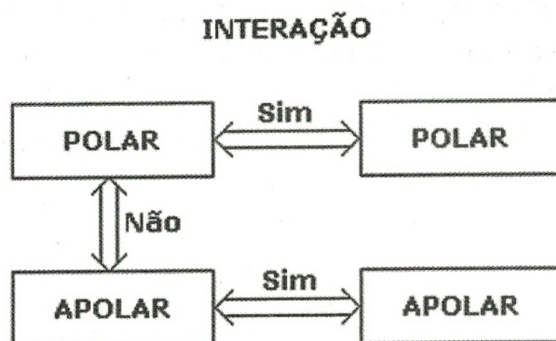


FIGURA 01 – Ilustração de interações moleculares.
Fonte: Baltar (2010)

Nos sistemas de flotação a fase líquida é sempre a água, uma espécie polar, e a fase gasosa é quase sempre o ar, constituído basicamente por moléculas apolares. Uma substância hidrofóbica pode, agora, ser melhor caracterizada como aquela cuja superfície é essencialmente não-polar, tendo maior afinidade com o ar que com a água. Por outro lado, substância hidrofílica é aquela cuja superfície é polar, indicando maior afinidade com a água que com o ar (CHAVES, 2006).

De acordo com Valadão e Araujo (2007) entre os minerais encontrados na natureza muito poucos são naturalmente hidrofóbicos (grafita – C; molibdenita – MoS_2 ; talco – $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$; pirofilita – $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$; alguns carvões – C e ouro nativo livre de prata – Au). A separação entre partículas naturalmente hidrofóbicas e partículas naturalmente hidrofílicas é teoricamente possível fazendo-se passar um fluxo de ar através de uma suspensão aquosa contendo as duas espécies. As partículas hidrofóbicas seriam carregadas pelo ar e aquelas hidrofílicas permaneceriam em suspensão.

Em geral, a mera passagem de um fluxo de ar não é suficiente para carrear as partículas hidrofóbicas. Faz-se necessária a formação de uma espuma estável, que é obtida através da ação de reagentes conhecidos como espumantes, os quais abaixam a tensão superficial na interface líquido/ar e tem ainda a importante função de atuar na cinética da interação partícula-bolha, fazendo com que o afinamento e ruptura do filme líquido ocorram dentro do tempo de colisão como se observa na figura 02 (CHAVES, 2006).

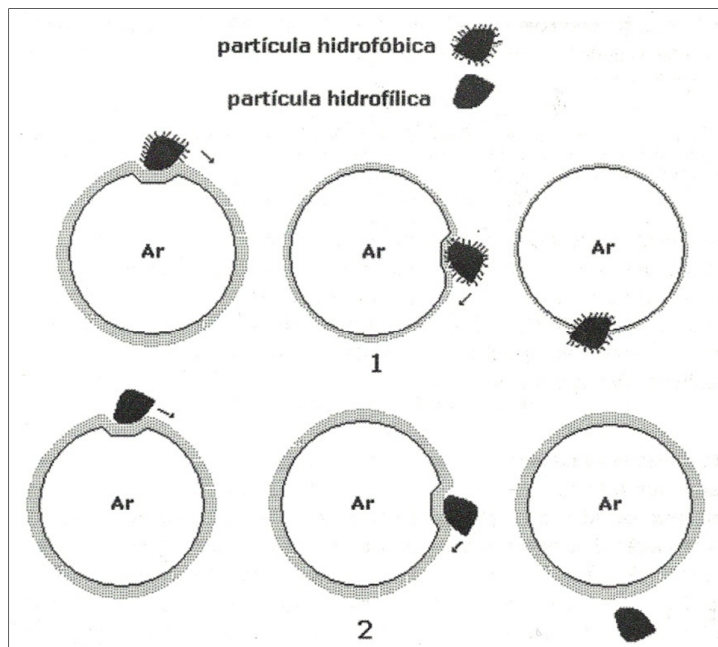


FIGURA 02 – Ilustração do contato partícula bolha: (1) partícula hidrofóbica (afinamento e rompimento da película antecedendo a adesão); (2) partícula hidrofílica (película estável e repulsão).

Fonte: Baltar (2010)

O pequeno número de minerais naturalmente hidrofóbicos seria indicativo de uma gama restrita de aplicações da flotação. A vastíssima aplicação industrial da técnica se deve ao fato de que minerais naturalmente hidrofílicos podem ter sua superfície tornada hidrofóbica através da adsorção (concentração na interface) de reagentes conhecidos como coletores. Em outras palavras, a propriedade diferenciadora pode ser induzida (VALADÃO, 2007).

Na maioria dos sistemas de flotação a seletividade do processo requer a participação de substâncias orgânicas ou inorgânicas, designadas como modificadores ou reguladores. As ações dos modificadores são diversas, destacando-se: ajustar o pH do sistema, ajustar o Eh do sistema, controlar o estado de dispersão das partículas na polpa, facilitar e tornar mais seletiva a ação do coletor (função designada como ativação) e tornar um ou mais minerais hidrofílicos e imunes à ação do coletor (função conhecida como depressão).

Em termos de teor do minério a ser tratado, a flotação apresenta enorme flexibilidade. No limite superior encontram-se carvões com teores de até 80% de carbono e magnesita com conteúdo em $MgCO_3$ acima de 90%. No outro extremo situam-se os minérios de cobre de origem porfírica dos quais pode ser recuperado molibdênio, sob a forma de molibdenita, com teores de ordem de 0,02% (CHAVES, 2006).

À medida que diminui o tamanho das partículas, as diferenças nas propriedades físicas vão perdendo a importância de modo a dificultar, cada vez mais, a separação. Ao contrário, a influência das propriedades superficiais cresce progressivamente. Isso explica porque a técnica de flotação é a mais tolerante com relação à presença de finos, podendo ser aplicada com êxito a minérios com até $10\mu_m$ (Warren, 1984)² e distribuição granulométrica heterogênea (Lynch, 1984)³ (apud BALTAR, 2010).

Na maioria dos casos o tamanho máximo é fixado pela liberação dos grãos do mineral cuja recuperação é o objetivo do tratamento. Quando a granulometria de liberação é maior que aquela que possibilita o transporte das partículas pelas bolhas de ar, esse fator passa a governar o tamanho máximo na alimentação. O limite inferior da faixa granulométrica está relacionado com o conceito de lamas e com o fato de se tratar de flotação de sulfetos ou de outros minerais (CHAVES, 2006).

Segundo Valadão e Araujo (2007) tradicionalmente, apesar das lamas serem prejudiciais em todos os sistemas de flotação, geralmente, a flotação de sulfetos é processada sem deslamagem prévia e a dos demais minerais após deslamagem. Existe uma tentativa de se quantificar o conceito de lamas. Partículas entre $100\mu_m$ e $10\mu_m$ são designadas como “finos”; entre $10\mu_m$ e $1\mu_m$ “ultrafinos”; abaixo de $1\mu_m$ “colóides”; a faixa dos ultrafinos e colóides constitui as lamas.

Na prática, a deslamagem não é feita necessariamente em $10\mu_m$. O tamanho de corte é definido em função do consumo exagerado de reagentes e da perda de seletividade no processo. Um fenômeno comum é o recobrimento da superfície de um mineral por lamas de outro(s), conhecido como “slimes coating”, que pode chegar a inibir completamente a seletividade na flotação. Na flotação, assim como em outros processos que envolvem a partição de fluxos de polpa, as partículas menores que certo tamanho crítico acompanham a partição da água (VALADÃO; ARAUJO, 2007, p. 119).

Ao contrário da maioria dos métodos físicos de concentração, a flotação pode ser utilizada em larga escala sendo apropriado o seu uso nas maiores usinas de beneficiamento (Palagi e Stillar, 1976)⁴. O custo moderado viabiliza a sua aplicação mesmo nos casos da produção de concentrados com baixo valor agregado, assim como possibilita trabalhar com finos antes descartados (apud BALTAR, 2010).

² WARREN, L. J. *Ultrafine Particles in Flotation*. Principles of Mineral Flotation. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1984. 185 – 213 p.

³ LYNCH, A. J. *The technology of flotation*. Principles of Mineral Flotation The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1984. 233 – 253 p.

⁴ PALAGI, C. G.; STILLAR, S. S. The Anaconda C. E. Weed Concentrator. In.: Flotation, volume 2. American Institute of Mining Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 1976. 1029 – 1042.

2.1.1 Princípios de propriedades das interfaces

Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea, fisicamente distinta e mecanicamente separável de um sistema. Em outras palavras, é uma região do espaço em que a composição química é uniforme e as propriedades físicas e mecânicas são as mesmas. A transição de propriedades entre duas fases se faz de maneira gradual ao longo de uma região espacial, que apresenta uma de suas dimensões extremamente reduzida, designada como interface (CHAVES, 2006).

Considerando-se os três estados da matéria – sólido, líquido e gasoso – é possível a identificação de cinco tipos de interface: sólido/sólido, sólido/líquido, sólido/gás, líquido/líquido e líquido/gás. Todos os tipos estão presentes em sistemas de flotação.

Uma interface sólido/sólido é exemplificada por uma partícula mineral coberta por lamelas de outra espécie, através de um mecanismo essencialmente de atração eletrostática, fenômeno conhecido como “slimes coating”. Uma partícula mineral imersa em meio aquoso caracteriza uma interface sólido/líquido. Uma bolha gás aderida a uma partícula mineral exemplifica uma interface sólido/gás, supondo-se, no momento da adesão, a película líquida que circunda a bolha sofre um processo de um afinamento até a ruptura (CHAVES, 2006).

Alguns reagentes de flotação são imiscíveis em água, caracterizando uma interface líquido/líquido. Para facilitar o acesso desses reagentes às interfaces sólido/líquido e líquido/gás, muitas vezes, faz-se necessária sua emulsificação. O melhor exemplo da interface líquido/gás é a película líquida que envolve uma bolha, apesar de geralmente a literatura citar como exemplo desse tipo de interface uma bolha imersa em meio aquoso. Considera-se que essas interfaces apresentam espessuras muito pequenas, especialmente quando uma fase gasosa está envolvida, da ordem de nanômetros ou até fração de nanômetros (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

2.1.2 Sistema de reagentes

Reagentes de flotação são compostos orgânicos e inorgânicos empregados com o objetivo de controle das características das interfaces envolvidas no processo. Qualquer espécie, orgânica ou inorgânica, que apresente tendência a concentrar-se em uma das cinco interfaces possíveis é um agente ativo na superfície (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

Em flotação os reagentes costumam ser classificados conforme a sua função específica no processo. Dessa forma, podem ser: espumante, coletor, depressor, ativador, regulador de pH e dispersante, entre outros (BALTAR, 2010). A escolha adequada contribui para o sucesso de quatro eventos que são essenciais para a flotação: a dispersão das partículas na polpa; a adsorção seletiva do coletor; a estabilidade das bolhas e a adesão partícula-bolha.

Hoje, no mercado, existe uma gama enorme de reagentes orgânicos e inorgânicos, que atuam como coletores, quando adsorvem nas interfaces sólido- líquido, ou como espumantes, quando atuam na interface ar- líquido. Estima-se que sejam tratados 2 bilhões de toneladas de minério somente pelo de processo de flotação, o que promove um consumo enorme de coletores, espumantes, depressores e modificadores (Pearse, 2005)⁵ (apud BALTAR, 2010).

Coletores são aqueles reagentes que atuam na interface sólido/líquido, alterando a superfície mineral, que passa de caráter hidrofílico para hidrofóbico. Os coletores são agentes surfatantes que apresentam em uma extremidade um grupo hidrofílico, polar, e na outra um grupo hidrofóbico, apolar. Segundo sua natureza iônica, são classificados como aniônicos ou catiônicos (Cytec, 2002; Luz e eds, 2004)⁶ (apud LOYOLA, 2006).

A parte polar, solidofílica (afinidade por sólidos) e hidrofílica (afinidade por água), tem a função de interagir com a superfície do mineral promovendo a adsorção. Sendo assim, o grupo polar é a parte da molécula responsável pela seletividade e pela intensidade da ligação com a superfície. Além disso, a presença desse grupo contribui para aumentar a solubilidade da molécula em meio aquoso. Por sua vez, a parte apolar da molécula, aerofílica e hidrofóbica, é constituída por uma cadeia hidrocarbônica cuja função é a de promover a necessária hidrofobicidade da superfície.

⁵ PEARSE, M. J. *An overview of the use of chemical reagents in mineral processing*. Minerals Engineering, 1976. 18 p.

⁶ CYTEC MINING CHEMICALS HANDBOOK. Revised Edition, Cytec Industries Inc, 2002.
LUZ, A. B. et al. Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral, 2004.

O coletor adsorvido forma uma película hidrofóbica que impede a hidratação da superfície, possibilitando a adesão da partícula à bolha de ar (Figura 03). Por sua vez, as partículas não hidrofobizadas, cobertas por moléculas de água, permanecem na polpa até a descarga (BALTAR, 2010).

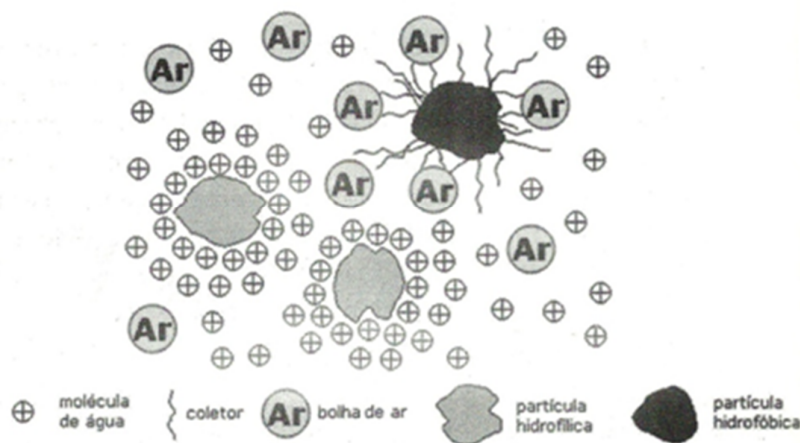


FIGURA 03 – Representação de um sistema trifásico de flotação com a presença de partículas hidrofobizadas e de partículas hidrofílicas.

Fonte: Baltar (2010)

Fazem parte do grupo de coletores aniônicos (Tabela 01), os coletores sulfetados e os ácidos graxos.

TABELA 01 – Coletores aniônicos típicos.

$\begin{array}{c} \text{S} \\ \\ \text{ROC-S}^-\text{M}^+ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{S} \\ \\ \text{RO}-\text{P}-\text{S}^-\text{M}^+ \\ \\ \text{RO} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{O} & \text{O} \\ & \\ \text{RC-OH,} & \text{RC-O}^-\text{M}^+ \end{array}$
Xantato	Ditiofosfato	Ácidos graxos

Fonte: Loyola (2006)

De acordo com Valadão e Araujo (2007) classicamente, os sistemas de flotação são divididos em sulfetos e não sulfetos. Os coletores empregados na flotação de sulfetos são conhecidos como tiocompostos. A classe dos não sulfetos é mais complexa, pois engloba um número muito grande de minerais. A maior parte deles se enquadra na classificação de oximinerais.

Os grupos polares dos tiocompostos contêm, pelo menos, um átomo de enxofre não ligado a oxigênio. São usualmente derivados de um composto de origem oxigenado, através da substituição de um ou mais átomos de oxigênio por enxofre. Partindo-se de compostos de origem da química inorgânica, a transição para tiocomposto requer a substituição de um ou mais hidrogênios por radicais de hidrocarboneto. Os tiocompostos são normalmente comercializados sob a forma de sais de sódio ou potássio (VALADÃO; ARAUJO, 2007, p 128)

As principais propriedades dos tiocompostos são: baixa ou nenhuma atividade na interface líquido/ar (caracterizando ação exclusivamente coletora e ausência de ação espumante); alta atividade química com relação a ácidos; agentes oxidantes e íons metálicos; diminuição da solubilidade com o aumento da cadeia hidrocarbônica (CHAVES, 2006).

A importância das reações de oxidação de tiocompostos leva a uma forma de apresentação dos mesmos, que abrange a seqüência: composto de origem, tioderivativo, produto de oxidação, conforme a Tabela 02.

TABELA 02 - Tiocompostos

Composto de origem	Tioderivado	Produto de oxidação
Ácido carbônico H_2CO_3	Monotio carbonato ROCOSNa	Carbonato dissulfeto (ROCOS) ₂ Dixantógeno (ROCS ₂) ₂
	Ditiocarbonato ROCS ₂ Na	
	Tritiocarbonato RSCS ₂ Na	
	Perxantato ROCS ₂ O	
	Éter xântico ROCS ₂ C ₃ H ₇	
	Formato xantógeno ROCS ₂ CO ₂ C ₃ H ₇	
Ácido carbâmico H ₂ NCOOH	Ditiocarbamato R ₂ NCS ₂ Na	Dissulfeto de tiouretana (R ₂ NCS ₂) ₂
	Éster de tionocarbamato C ₃ H ₂ NHCSOC ₂ H ₅	
Ácido fosfórico H ₃ PO ₄	Monotiofosfato de dicresila (H ₂ C©OHO) ₂ PSO ₂ Na	Monotiofosfatógeno Ditiofosfatógeno Ditiofosfatógeno (análogos ao dixantógeno)
	Ditiofosfato de monoalquila ROHOPS ₂ Na	
	Ditiofosfato de dialquila ROROPS ₂ Na	
Ácido fosfínico H ₂ POOH	Ditiofosfinato R ₂ PS ₂ Na	
Uréia (H ₂ N) ₂ CO	Tiocarbanilida (©NH) ₂ CS	
	Mercaptobenzotiazol ©SNCSH	
Água H ₂ O	Mercaptana R ₂ SHSNa	Dissulfeto de dialquila (RS) ₂
Amoníaco NH ₃	Tioeteramina	
	H ₇ C ₃ S(CH ₂) _n NCH ₃ RC ₂ H ₅	

© = benzeno

Fonte: Valadão e Araujo (2007)

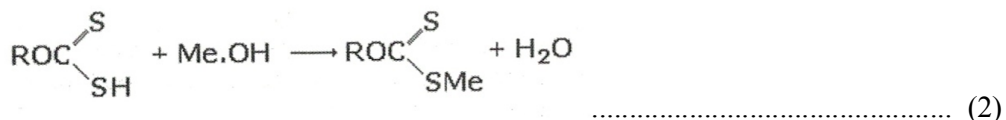
Os tiocarbamatos e os xantatos são utilizados na flotação de sulfetos e metais nativos. Na fórmula química, o metal pode ser Na⁺ ou K⁺ e R é uma cadeia carbônica relativamente curta, contendo de 2 a 5 átomos de carbono. O poder coletor aumenta com o aumento da cadeia carbônica. São relativamente instáveis em pH baixo.

Os xantatos vêm sendo usados há mais de 75 anos. O amil xantato é um poderoso coletor, com seletividade relativamente baixa, agindo praticamente sobre todos os sulfetos.

Xantatos de cadeia curta tais como o isopropil, butil e etil xantato são mais seletivos e mais utilizados na flotação de cobre, chumbo e zinco, sendo seletivos em relação à pirita (LOYOLA, 2006).

“Os xantatos (e demais reagentes tióis) se caracterizam por um odor bastante forte e desagradável. Em geral, são comercializados em estado sólido, com cor variando da branca à amarela, dependendo do grupo álcool de origem e do metal de sua composição” (BALTAR, 2010).

Em solução aquosa o ácido ditiocarbônico, conhecido como ácido xântico, é obtido a partir da reação de um álcool com o disulfeto de carbono conforme a form. (1). Em flotação, costuma-se usá-lo na forma de sal (xantato), resultado da reação do ácido xântico com um metal, hidróxido de sódio ou potássio, form (2) (Baltar ,2010).



Sendo, Me = Na ou K.

O xantato de sódio ou de potássio é bastante solúvel em água. Com a liberação do metal (Me), surge o íon xantato ou íon coletor, form. (3):



Os ditiofosfatos são reagentes conhecidos como promotores, sendo mais seletivos em relação à pirita que os coletores de cadeia mais curta, os xantatos (Thompson, 2003)⁷ (apud LOYOLA, 2006). São coletores formados por um éster secundário ou ácido ditiofosfórico, sendo líquidos de pouca solubilidade. Por terem um poder de coleta menor que os xantatos, na flotação de alguns minérios, são necessários a adição do ditiofosfato juntamente com o xantato para se obter uma recuperação aceitável. Vários ditiofosfatos foram desenvolvidos especificamente para a flotação de ouro, uma vez que este está presente tanto na forma liberada como associado a outros sulfetos, tais como a calcopirita e a pirita. Os ditiofosfatos são utilizados na flotação de chumbo, zinco e sulfetos de prata (LOYOLA, 2006).

De acordo com Loyola (2006) os tionocarbamatos constituem uma classe de coletores muito estáveis e de longa durabilidade. Foram desenvolvidos para serem empregados na flotação de sulfetos de cobre, sendo seletivos em relação à pirita, em polpas com pH alcalino. Recentemente, uma variante desse reagente foi desenvolvida para ser empregada em polpas com pH abaixo de 7, sendo também seletivo em relação à pirita.

Também fazem parte do grupo de coletores aniônicos, os tióis ou mercaptanas. São alcoóis com radical alquila ou arila, em que o oxigênio foi substituído pelo enxofre. Utilizados na flotação de sulfetos de cobre e zinco e para minerais oxidados. O uso de mercaptanas sempre foi limitado devido ao seu forte odor. Já o mercaptobenzotiazol foi desenvolvido para melhorar a recuperação de minérios semi-oxidados de cobre. Em geral, são utilizados combinados com o xantato, melhorando assim a recuperação global.

“Já os ácidos graxos são coletores de minerais semi-solúveis, oxidados e não metálicos. São amplamente utilizados na flotação de fosfatos e fluorita. Exemplos desses ácidos são: “tall oil”, óleo de arroz, óleo de mamona e óleos comestíveis” (LOYOLA, 2006).

O grupo de coletores catiônicos é constituído pelas aminas que são derivadas da amônia (NH₃) pela substituição de um ou mais de seus átomos de hidrogênio por um número correspondente de grupos orgânicos. As aminas podem ser primárias, secundárias, terciárias ou formar sais quaternários (Tabela 03), conforme o número dos radicais hidrocarbônicos unidos ao átomo de nitrogênio. Quando ocorre a substituição de apenas um átomo de hidrogênio, a amina é primária, e assim, sucessivamente (BALTAR, 2010)

⁷ THOMPSON, P. The Selection of Flotation Reagents via Batch Flotation Test. *Proceedings: Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, v. 1, p. 136 – 144, 2003.

TABELA 03 – Grau de substituição e tipo de amina resultante.

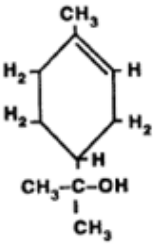
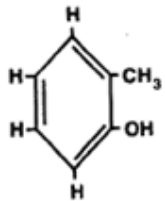
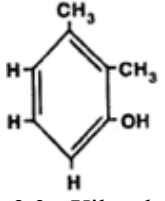
SUBSTITUIÇÕES	COMPOSTO
NH ₃	Amônia
RNH ₂	Amina primária
R ₂ NH	Amina secundária
R ₃ N	Amina terciária
R ₄ N. Cl	Sal quartenário de amônia

Fonte: Baltar (2010)

Os coletores catiônicos são largamente empregados na flotação de partículas de silicatos, aluminosilicatos e vários óxidos, talcos, micas, etc., na flotação reversa. As propriedades coletoras desses reagentes são aumentadas com o aumento da cadeia carbônica. Para a separação de minerais facilmente flotáveis, podem-se empregar aminas de cadeias de 8 a 15 carbonos.

Os espumantes são surfatantes assim como os coletores. São moléculas neutras, de cadeia carbônica mediana, contendo um grupo funcional apolar (interage na interface sólido-gás) e um grupo polar (interage na interface líquido- gás). Os espumantes utilizados são alquil ou aril álcoois e suas propriedades intensificam-se com o aumento da cadeia carbônica não polar até 7-8 carbonos. Na Tabela 04, são apresentados os espumantes mais típicos (LOYOLA, 2006).

TABELA 04 – Espumantes típicos.

Cíclico	Alifático	Poliglicol	Aromático
 <p>α - Terpinol</p>	$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{OH} \end{array}$ <p>Metil Isobutil Carbinol (MIBC)</p>	$\text{R}-(\text{O}-\text{C}_3\text{H}_6)_n-\text{OH}$ <p>Onde R = H ou CH₃ n = 3 a 7</p>	 <p>c- Cresol</p>
	$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_3-\text{CH}_2 \end{array}$ <p>2- Etil Hexanol</p>		 <p>2,3 - Xilenol</p>

Fonte: Loyola (2006)

O agente espumante age na redução da tensão interfacial ar/água, permitindo a formação da espuma. Confere uma estabilidade à mesma, permitindo que ela sustente o mineral de interesse até a superfície aerada da polpa, quando ocorre sua separação. Os

espumantes podem, também, co-adsorver juntamente com os coletores, permitindo uma redução da dosagem desse último.

Podem ser usados para solubilizar ou emulsificar coletores insolúveis, agem diretamente na cinética de flotação e controlam o tamanho e a distribuição das bolhas. A função específica desse reagente é determinada pelo sistema (Pearse, 2005) (apud LOYOLA, 2006). O MIBC, metil- isobutil-carbinol, é o álcool mais utilizado na flotação, por permitir uma espuma com boa drenagem, evitando a retirada de ganga na espuma.

Além dos coletores e espumantes, têm-se ainda os agentes modificadores. Dependendo da função que desempenha no processo, recebem as denominações de: depressores, ativadores, dispersantes e reguladores de pH. Apresentam composição, estrutura e propriedades bastante variadas, podendo ser reagentes orgânicos ou inorgânicos.

Os depressores são substâncias que atuam na superfície do mineral, inibindo a adsorção do coletor e evitando a hidrofobização das superfícies dos minerais que não devem flotar. O depressor pode ser um reagente orgânico ou inorgânico. Entre os inorgânicos mais conhecidos estão: silicato de sódio, sulfeto de sódio, cromato e dicromato de potássio, cianeto de sódio, e outros sais. Por sua vez, os depressores orgânicos mais usados são os polissacarídeos e os polifenóis. Alguns polímeros sintéticos também podem ser usados como depressor.

Os agentes ativadores são introduzidos no sistema com o objetivo de intensificar a adsorção do coletor sobre o mineral (ou minerais) que se deseja flotar. É usado em situações onde há necessidade de aumentar a recuperação. O ativador é sempre um reagente inorgânico, solúvel em água, que pode atuar: diretamente na superfície do mineral, modificando a sua composição química pela formação de um composto; como elo entre a superfície e o coletor ou pela incorporação de íons na rede cristalina do mineral. Os mais utilizados são: sulfato de cobre (CuSO_4), sulfeto de sódio (Na_2S), ácidos e bases e adição de eletrólitos.

Os dispersantes são agentes químicos que basicamente alteram a interação partícula-partícula, promovendo uma maior fluidez da polpa. São utilizados para a separação de partículas com dimensões coloidais que tendem a se depositar nas superfícies das partículas maiores (slime coating) ou formar agregados entre si, impedindo a adsorção do coletor. Reagentes comumente empregados como dispersantes são as poliacrilamidas, silicato de sódio e vários metafosfatos (LOYOLA, 2006).

Os agentes denominados reguladores são empregados na flotação para ajustar o pH da polpa. As substâncias comumente utilizadas com essa função são a cal, soda cáustica, ácido sulfúrico e ácido clorídrico.

2.1.3 Circuitos de flotação

O arranjo de um circuito de flotação varia de acordo com a mineralogia do minério, grau de liberação do material de interesse, teor (pureza) do produto exigido e valor do produto. As características próprias de cada sistema de flotação impedem qualquer generalização de um circuito padrão, porém a definição de cada estágio em um circuito é apresentada a seguir:

A etapa rougher é o primeiro estágio de flotação após a moagem. O objetivo desse estágio é produzir concentrado com alta recuperação. O concentrado, por ter baixo teor, é composto por contaminantes requerendo um estágio de re-tratamento. O rejeito desse estágio pode ser enviado para mais um estágio de flotação ou ser considerado como rejeito final (LOYOLA, 2006).

A scavenger do rougher é a fase seguinte, usada com o intuito de reduzir a perda do material de interesse e elevar a recuperação, muitas vezes, o rejeito rougher é enviado para esse estágio para mais uma etapa de flotação, precedida ou não de adição de reagente para melhorar a cinética de flotação.

O concentrado scavenger do rougher, dependendo do seu teor, pode se juntar ao concentrado rougher e seguir para o estágio seguinte, ou retornar na alimentação do rougher (Figura 03). O rejeito scavenger do rougher é considerado rejeito final.

Na etapa cleaner o concentrado rougher e, dependendo do caso, o concentrado scavenger pode seguir diretamente para mais uma etapa de flotação, denominada cleaner ou, se necessário, for, passar previamente por uma etapa de remoagem, aumentando o grau de liberação e permitindo um maior teor no produto. Se o concentrado cleaner não tiver alcançado o teor desejado, ele pode seguir para mais uma etapa de limpeza, denominada simplesmente por cleaner 2. Já o rejeito, por apresentar um teor elevado, é enviado para de concentração.

Scavenger do cleaner: nesse estágio, o rejeito cleaner é reflatado. O concentrado desse estágio geralmente retorna para a alimentação do primeiro cleaner e o rejeito, se apresentar baixo teor, é descartado como rejeito final (LOYOLA, 2006).

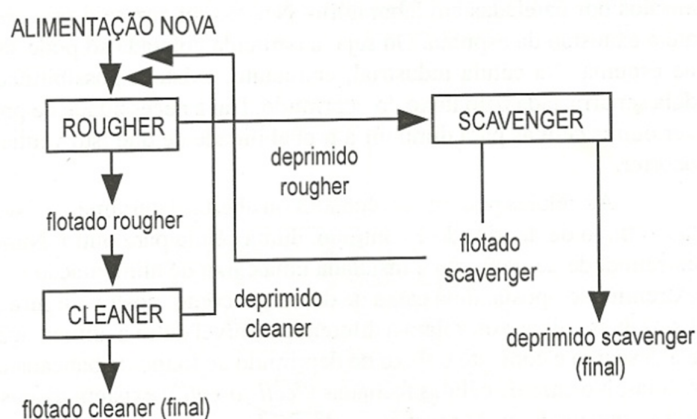


FIGURA 03 – Circuito típico de beneficiamento.
Fonte: Chaves (2006)

2.1.4 Máquinas de flotação

Máquinas de flotação podem ser divididas em 4 categorias: (1) mecânicas, (2) pneumáticas, (3) separação de espumas e (4) colunas. As células pneumáticas e de separação de espuma são pouco utilizadas na indústria e, por esse motivo neste trabalho estas serão apenas citadas.

As Células mecânicas são constituídas de um tanque ou cuba, onde atua um rotor (impeller) envolvido por uma capa denominada estator (Nelson *et al.*, 2003)⁹ (apud LOYOLA, 2006). As máquinas mecânicas de flotação são dimensionadas para cumprir as funções descritas abaixo:

- ideal contato ar/polpa;
- adequada suspensão dos sólidos;
- mistura adequada da polpa, sem que haja formação de zonas mortas ou curto circuitos;
- formação de zona quiescente para que ocorra a separação da espuma da polpa;
- adequada remoção da espuma;
- tempo de residência que permita recuperação desejada do material de interesse.

⁹ NELSON, M. G. et al., Design of Mechanical Machines. *Proceedings: Mineral Processing Plant Design, Practice and control*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, v. 1, p. 1179 – 1203, 2003.

Como nas bombas centrífugas, o giro do rotor faz com que a polpa seja impelida na direção do topo do tanque, atingindo certa altura a partir da qual a polpa experimenta movimento descendente, até atingir o nível do rotor, quando é novamente sugada e impelida em direção ao topo (LOYOLA, 2006). Na Figura 04, é apresentada uma célula de flotação e, em detalhe, o rotor e o estator.

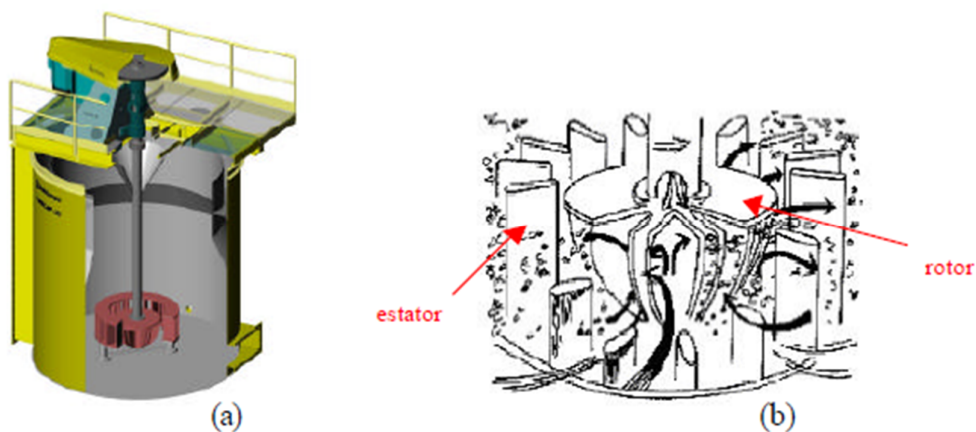


FIGURA 04 – (a) Célula de Flotação; (b) Detalhe do rotor e estator.
Fonte: (www.outokumpo.com) (apud Loyola, 2006)

É uma prática determinar o tamanho e o número das células de flotação a serem utilizadas na planta industrial com base no tempo de residência obtido nos ensaios executados em escala de laboratório (ensaios de bancada) e confirmados em escala piloto. O conceito de tempo de residência ou tempo de retenção vem do arranjo de reatores químicos, sendo largamente aplicado para as máquinas de flotação (Nelson *et al.*, 2003) (apud LOYOLA, 2006).

A aplicação industrial de colunas de flotação revolucionou o universo de máquinas de flotação a partir dos anos de 80. A flotação em coluna foi desenvolvida a partir do princípio de fluxos em contracorrente e ausência de sistema de agitação.

As colunas diferem drasticamente das células mecânicas de flotação em vários aspectos:

- não há agitação mecânica;
- são relativamente altas e estreitas: 6 a 14 metros de altura e 0,5 a 5 metros de diâmetro;
- as bolhas de ar são geradas por aspersores;
- a camada de espuma é mais profunda e a água de lavagem é liberada na superfície da espuma.

Segundo Loyola (2006) assim como nas células mecânicas, existem duas zonas distintas: a zona de coleta, situada da entrada do ar até a interface polpa-espuma, e a zona de espuma, situada da interface até a descarga do concentrado (Figura 05). A interação entre essas duas zonas é fundamental para a compreensão da operação das colunas.

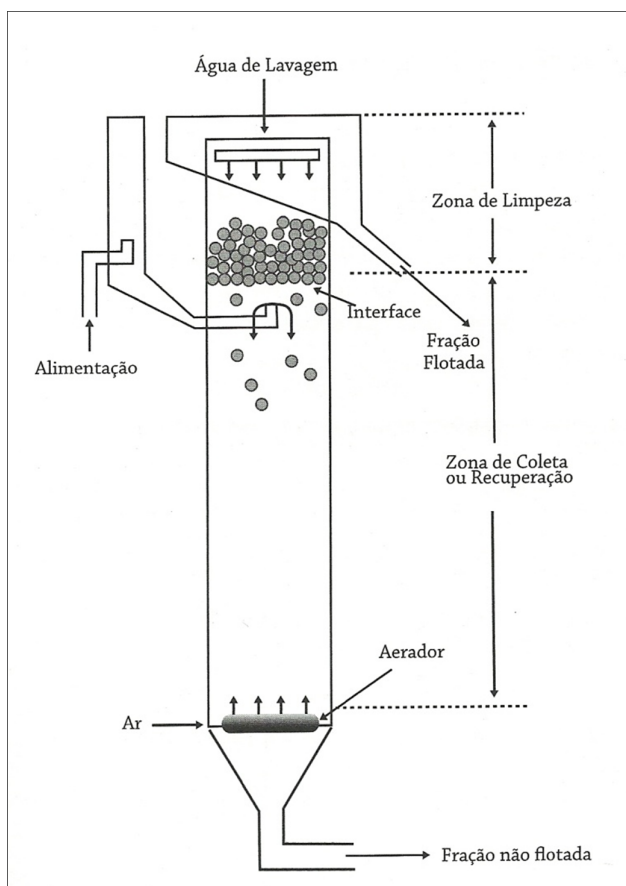


FIGURA 05 – Esquema básico de uma coluna de flotação.
Fonte: Valadão e Araujo (2007)

Na zona de coleta, as partículas da alimentação são postas em contato com as bolhas, geradas na zona inferior da coluna, em movimento ascendente (contracorrente). As partículas hidrofóbicas colidem com as bolhas e se aderem, sendo retiradas no topo da coluna. As partículas hidrofílicas continuam seu movimento descendente, sendo retiradas pelo fundo da coluna.

“A coluna pode operar numa faixa ampla de porcentagem de sólidos, 15 a 50%, sem reduzir significativamente a seletividade, desde que a quantidade de água de lavagem seja superior à quantidade de água no sentido contrário, ou seja, ascendente” (LOYOLA, 2006).

A altura da camada de espuma é uma variável importante para se obter uma boa seletividade no processo de flotação. As colunas geralmente trabalham com uma espessura de

espuma entre 0,5 e 1,0 m. A altura dessa camada de espuma aliada à sua lavagem permite a obtenção de um processo com alta seletividade

A espuma é lavada por um chuveiro que pode ser instalado interno ou externamente à coluna. Essa água de lavagem tem por objetivo diminuir o arraste de partículas indesejáveis, melhorando assim a seletividade. Normalmente, a quantidade de água utilizada é a mesma presente na espuma.

Em geral, as colunas de flotação são empregadas no estágio cleaner, por serem mais seletivas, evitando o arraste de ganga na espuma.

2.2 FLOTAÇÃO DO COBRE DA MINERAÇÃO DO SOSSEGO

A mina de Sossego está situada no município de Canaã dos Carajás, no Pará, a 835 km de Belém. Possui uma reserva provada de aproximadamente 245 milhões de toneladas de minério sulfetado de cobre, que será lavrada durante 17 anos, contados a partir do seu “start up” em 2003. A Usina do Sossego tem capacidade para produzir cerca de 500 mil toneladas de concentrado de cobre por ano. Trata-se de uma planta de flotação convencional, que opera de acordo com um processo consolidado na indústria do cobre.

O cobre ocorre sob forma de calcopirita, disseminada em vênulas e veios ou como brecha sulfetada encaixada em granitos, gabros e rochas vulcânicas ácidas alteradas hidrotermalmente. A lavra na Mina do Sossego é feita a céu aberto, em bancadas, com atividade de desmonte, carregamento e transporte de minério e de estéril. O complexo Sossego é formado por duas cavas principais. A cava do Sequeirinho, primeira a ser minerada, atingirá cerca de mil metros de largura por 2,8 mil metros de comprimento e uma profundidade de 450 metros. Já a cava do Sossego, um pouco menor, terá em torno de mil metros de comprimento por 800 metros de diâmetro e até 350 metros de profundidade.

Após ser reduzido na estação de britagem primária, o minério segue por uma correia transportadora de 4 quilômetros de extensão até a usina, onde passa pelos processos de moagem e concentração. A moagem é efetuada por um moinho semi-autógeno, SAG, (“semiautogeneous grinding”) de 38 pés, seguido por dois moinhos de bolas em paralelo (Figura 10), que operam em circuito fechado com ciclones

O produto da moagem de bolas, após classificação, alimenta o circuito de flotação com um P80 de 210 mm. O estágio de flotação rougher é composto por duas linhas em

paralelo, contendo, cada uma, 7 células de 160 m³. O concentrado rougher é enviado para uma etapa de remoagem, feita em dois moinhos verticais (“vertmill”), com cargas de bolas de aço e em circuito fechado com ciclones.

Após a remoagem, o material com P80 de 44 µm é bombeado para o estágio de flotação cleaner, realizado em 6 colunas de 4,27 m de diâmetro e 10 m de altura. O rejeito “cleaner 1” alimenta uma linha de 6 células de 160m³, scavenger do cleaner. O concentrado desse estágio e o concentrado rougher são enviados conjuntamente para a etapa de classificação, que antecede a remoagem. O rejeito scavenger do cleaner, juntamente com o rejeito rougher, é enviado para a barragem de rejeito como mostra a figura 06.

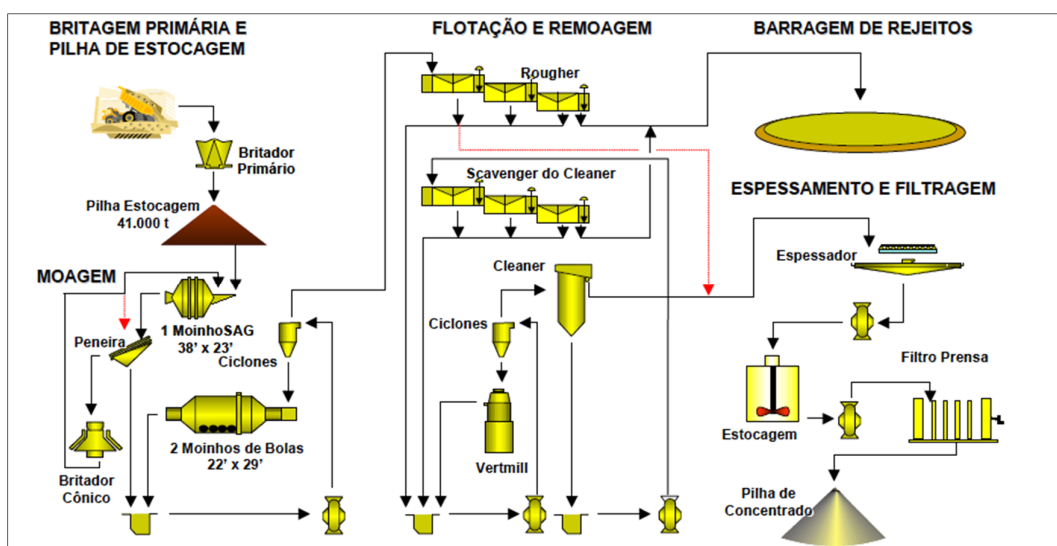


FIGURA 06 – Fluxograma da usina do Sossego.
Fonte: Chaves (2006)

O concentrado das colunas constitui o concentrado final, que é enviado para as etapas de espessamento e filtragem, que opera com alimentação de 15,5% de sólidos. A floculação é realizada com o auxílio de poliacrilamida aniônica na dosagem de 31 g/t de concentrado. Este é estocado em uma pilha cônica, em galpão fechado, para posterior envio, por caminhão, até o terminal ferroviário. Abaixo são apresentadas tabela 05 e 06 com valores típicos dos produtos obtidos nas etapas rougher e cleaner da flotação, além de alguns equipamentos utilizados na usina de beneficiamento no Sossego (figura 07).

TABELA 05 – Valores típicos dos produtos da etapa rougher.

Produto	%Cu	%Sólidos
Alimentação	0,9 – 1,3	33 – 38
Concentrado	13 – 17	20 – 25
Rejeito	0,05 – 0,07	33 – 38

Fonte: Chaves (2006)

TABELA 06 – Valores típicos dos produtos da etapa cleaner

Produto	%Cu	%Sólidos
Alimentação	10 – 15	12 – 15
Concentrado	28 – 32	20 – 25
Rejeito	2 – 4	12 – 15

Fonte: Chaves (2006)



FIGURA 07 – Usina de beneficiamento Sossego.

Fonte: Loyola (2006)

2.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS NA MINERAÇÃO.

O setor minero-metalúrgico gera, diariamente, grandes volumes de resíduos aquosos contendo elementos de toxicidade variada, tais como partículas sólidas, íons (elementos com propriedades radioativas, metais pesados e ânions), óleos (emulsionados ou não), gases e reagentes residuais, entre outros. O atual quadro é caracterizado por um volume crescente de atividades, com ênfase na otimização dos processos existentes e na busca de novas tecnologias para o controle dos impactos ambientais (Rubio; Tessele, 2002)¹⁰ (apud VALADÃO; ARAUJO, 2007).

¹⁰ RUBIO, J.; TESSELE, F. Processos para o tratamento de efluentes na mineração. In: LUZ, A. B. et al., *Tratamento de Minérios* 3ª Ed. CETEM/CNPq/MCT, 2002.

Os principais impactos nas operações de lavra são: ruídos, poeiras e, em alguns casos, contaminação de solos por explosivos derivados da glicerina e drenagem ácida, contendo metais pesados (Cu, Ni, Pb, Zn) e ânions (sulfato, fosfato, arseniato, fluoreto, cianeto). Também são importantes, o derrame de óleos, graxas, solventes orgânicos, os lodos (precipitados), rejeitos produtores de ácidos, a poluição visual, as alterações da biodiversidade, a deposição/estocagem de rejeitos (bacias, cavas), entre outros (RUBIO; TESSELE, 2002).

Os impactos mais comuns no beneficiamento são provocados por efluentes líquidos contendo metais pesados e ânions tóxicos, sólidos (às vezes coloidais), resíduos orgânicos (espumantes, coletores, surfactantes e óleos). Ainda, pode destacar a produção de poeiras e ruídos nas etapas de cominuição, as emissões gasosas (orgânicas) e os vapores, como, por exemplo, de mercúrio que mesmo em pequenas proporções apresenta um efeito impactante muito significativo.

“Na metalurgia os impactos ambientais são provenientes de efluentes líquidos contendo metais pesados, ânions, compostos organometálicos, complexos e quelatos tóxicos, óleos (solventes orgânicos) emulsificados ou não, sólidos finos ou coloidais (lodos)” (RUBIO; TESSELE, 2002).

Os efluentes líquidos provenientes do beneficiamento mineral contêm, na maioria dos casos, além de sólidos em suspensão, uma variada gama de reagentes utilizados fundamentalmente nos processos de tratamento de minérios e posteriormente no processamento metalúrgico dos concentrados. A Tabela 07 descreve os principais reagentes utilizados nestas operações, principalmente, na flotação.

TABELA 07 – Principais reagentes utilizados em Usinas de Tratamento de minérios (principalmente em flotação).

Coletores⁽¹⁾	Espumantes⁽²⁾	Modificadores⁽³⁾	Floculantes, Coagulantes, Dispersantes⁽⁴⁾
Mercaptanos	Óleo de pinho	Sulfato de cobre e zinco	Poliacrilamidas
Tioureas	Metil isobutil carbinol	Cromatos – dicromatos, hipocloritos	Polióxidos de etileno
Carboxilatos	Ácido cresílico	Permanganatos	Poliaminas
Tiocarbamatos, carbonatos e fosfatos	Polipropilenoglicóis	Sulfeto de sódio e pentasulfeto (Nokes)	Policarboxilatos
Óleos não iônicos, alcatrão	Parafinas alcoxi substituídas	Cianetos e ferrocianetos	Aluminatos sódicos
Ácidos graxos	Alcoóis (diversos)	Fluoretos e sulfitos de sódio	Sulfatos de ferro e alumínio
Dixantógenos		Quebracho, (polifenóis)	Silicatos solúveis
Aminas		Lignosulfonatos	Polissacarídeos
Aquil-sulfatos, Carbonatos, sulfonatos e fosfatos		Sais de chumbo	Polifosfatos
		Ácidos cítricos e tânicos	

⁽¹⁾ = em concentrações que variam entre 0,006 – 2,5 Kg/t ; ⁽²⁾ = 0,006 – 0,5 Kg/t ; ⁽³⁾ = ativadores – depressores – reguladores de pH, 0,006 – 6 Kg/t; ⁽⁴⁾ = 0,005 – 1 Kg/t.

Fonte: Rubio e Tessele (2002)

As Tabelas 08 e 09 apresentam as características e propriedades químicas e físico-químicas das águas residuais que, assim como os rejeitos sólidos, são normalmente constituídas por estes reagentes e podem atingir o meio ambiente.

TABELA 08 – Propriedades químicas e físico-químicas das águas residuais de circuitos de flotação.

Propriedade	Sulfetos metálicos	Não metálicos	Óxidos silicatos
Condutividade, microohms	175 – 675	650 – 17.000	130 – 550
Sólidos dissolvidos, ppm	120 – 4.300	190 – 18.500	1 – 1.100
Sólidos suspensos, ppm	2 – 550.000	4 – 360.000	0,4 – 1.900
DQO (*), ppm	15 – 240	2 – 40	0,2 – 36
TOC (**), ppm	8 – 290	9 – 3.100	-
Óleos e graxas, ppm	2 – 11	1 – 100	0,03 – 90
pH	8 – 11	5 – 11	5 - 11

Fonte: Rubio e Tessele (2002)

TABELA 09 – Características das águas residuais de circuitos de flotação. Concentração de íons mais frequentes em ppm.

Íons	Sulfetos	Não metálicos	Óxidos/silicatos
Ag ⁺¹	0,02 – 0,1	0,04	0,04
As ⁺³	0,02 – 3,5	<0,01 – 0,15	-
Be ⁺²	<0,002	-	20 – 36
Cd ⁺²	0,05 – 17	-	<0,02 – 0,01
Co ⁺²	1,0 – 1,7	-	-
Cr ⁺³	0,03 – 40	-	0,02 – 0,35
Hg ⁺²	0,0006 – 28	-	-
Pb ⁺²	0,01- 560	0,02 – 0,01	0,05 – 5,0
Mn ⁺²	0,007 – 570	0,2 – 49	0,007 – 330
Mo ⁺⁴	0,05 – 5	-	<0,2 – 0,5
Ni ⁺²	0, 01 – 3	-	0,15 – 1,5
Sb ⁺³	0,2 – 65	-	-
Se ⁺²	<0, 003 – 0, 155	-	0,06 – 0,14
Te ⁺²	<0,08 – 0,3	-	<0,2
Ti ⁺²	-	-	<0,5 – 2
Zn ⁺²	0,02 – 3000	-	0,02 – 20
PO ₄ ⁻²	20	2 – 200	0,8
SO ₄ ⁻²	5 – 2500	9 – 10000	5 – 5000
CN ⁻	0,01 – 0,45	-	<0,02

Fonte: Rubio e Tessele (2002)

A toxicidade dos reagentes e dos íons é variada havendo classes de muito tóxicos, como os coletores tiólicos, sulfonatos, aminas e cianetos, de moderados, como os espumantes à base de álcool e, de não tóxicos, como o polipropileno glicol. Ainda, a toxicidade pelos metais pesados dissolvidos é bem documentada e sua remoção envolve uma ampla linha de pesquisa, ainda em desenvolvimento (RUBIO; TESSELE, 2002).

2.3.1 Processos para o tratamento dos efluentes líquidos

Os processos para o tratamento de efluentes líquidos existentes são diferenciados em relação ao seu objetivo final. Os efluentes, às vezes, são depositados sem qualquer tipo de tratamento, ou podem ser tratados, visando, além da redução dos possíveis impactos ambientais, a extração de elementos de valor (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

De acordo com Valadão e Araujo (2007) no caso de deposição sem tratamento, são requeridas bacias de grande porte (bacia de deposição de resíduos). No segundo caso, os

processos devem ser eficientes, viáveis e, algumas vezes, de alta capacidade de processamento. A separação em bacias de decantação (lagoa de rejeitos) é, ainda, o tipo de processo mais empregado no tratamento de águas efluentes do setor minero-metalúrgico. O objetivo básico destas bacias é a decantação dos sólidos suspensos e, para tanto, esta deve ter suficiente área superficial, tempo elevado de retenção e ausência de turbulência. Opções de oxidação e destruição de algumas substâncias tóxicas podem ser realizadas com projetos adequados. O tempo de retenção varia significativamente com as condições climáticas e distribuição granulométrica das partículas presentes, sendo que o efluente pode sair da bacia por: simples extravasamento; difusão lateral ou pelo fundo da bacia; evaporação ou recirculação ao processo gerador.

Também, podem ser adicionada, para a neutralização, cal, dolomita, soda caustica amônia, ou ate cinzas, para as águas ácidas e, com ácido sulfúrico, para as básicas como forma de precipitar os metais pesados presentes no efluente. O desenvolvimento de novos floculantes poliméricos e/ou coagulantes permite a aplicação desses processos em sistemas com altos teores de sólidos, ultrafinos e partículas coloidais .

Entre as tecnologias reconhecidas e emergentes (técnicas), diversos esforços vêm sendo realizados para o desenvolvimento de tecnologias mais limpas de remoção- separação de ânions e metais pesados dissolvidos. Várias delas são originárias da indústria química, do petróleo e de alimentos.

TABELA 10 – Técnicas (tecnologias) emergentes.

Técnicas emergentes	Generalidades
Extração por solvente	Extração com agentes quelantes em meios apolares. Altos custos de capital e de operação; tecnologia bem estabelecida.
Adsorção/troca iônica	Adsorção otimizada em carvão ativado, biomassa ou resinas e zeólitas.
Eletrólise redutiva, eletrocinética e eletroosmose	Eletroquímica aplicada na remoção de elementos poluentes.
Separação magnética	Remoção de poluentes através da utilização de partículas magnéticas adsorventes.
Biorremediação	Degradação microbiológica de poluentes.
Oxidação por fotólise e/ou aeração	Destruição de complexos cianetados.

Fonte: Valadão e Araujo (2007)

A flotação é conhecida há mais de um século nas áreas minero-metalúrgica, entretanto, sua aplicação como tecnologia de tratamento de efluentes líquidos é pouco conhecida nesse setor, com exceção da flotação por ar dissolvido (FAD) (RUBIO et al., 2002; RUBIO, 2003)

As unidades formadas por bolhas e partículas (ou gotículas) apresentam uma densidade aparente menor do que no meio aquoso e flutuam ou flutam até a superfície do reator (célula de flotação) ou interface líquido/ar, onde são removidas.

As principais diferenças entre a flotação convencional de minérios e a flotação aplicada ao tratamento de efluentes líquidos são (RUBIO, 2003 e RUBIO et al, 2002):

- o método de produção de bolhas de ar (gás) nos equipamentos de flotação para tratamento de efluentes produz bolhas bem menores que as utilizadas para minérios;
- a massa de sólidos (concentração) a ser separada no tratamento de efluentes é muito menor, normalmente da ordem de 1 % a 4 % em peso;
- o tipo de separação é sólido/sólido/líquido no tratamento de minérios e sólido/líquido, sólido/líquido1/líquido2 ou líquido/líquido no tratamento de efluentes;
- as aplicações da flotação no tratamento de efluentes mineiros e metalúrgicos objetivam: remoção/recuperação de íons, complexos, quelatos, macromoléculas, tensoativos; separação de óleos emulsificados ou não, compostos orgânicos, redução de DBO e DQO; separação de partículas coloidais, finas e ultrafinas (Rubio, 2003; Rubio et al, 2002; Rodrigues e Rubio, 2007, Matis, 1995).

2.3.2 Coagulação/Floculação

O processo de coagulação/floculação é caracterizado como o sistema mais tradicional, tem por finalidade a remoção de substâncias coloidais, ou seja, material sólido em suspensão e/ou dissolvidos. Essa operação é considerada como um pré-tratamento que objetiva o condicionamento do despejo para o tratamento subsequente, por sedimentação e/ou filtração.

Segundo Cardoso (2007)¹¹ (apud VAZ, 2009) diz que os termos de coagulação e floculação são utilizados como sinônimos, uma vez que ambos significam o processo integral de aglomeração das partículas. Sendo a coagulação, o processo através do qual o agente coagulante adicionado à água, reduz as forças que tendem a manter separadas as superfícies em suspensão, e a floculação é a aglomeração dessas partículas por meio de transporte de fluido, formando partículas maiores que possam sedimentar.

¹¹ CARDOSO, V. C. Estudo do processo de Coagulação/Floculação por meio da *Moringa oleifera* Lam para obtenção de água potável. Universidade Estadual de Maringá – PR, 2007.

A coagulação anula as forças de repulsão entre as partículas coloidais, por meio de mecanismos de ligação e adsorção na superfície da partícula coloidal, pela adição de agentes químicos, denominados de eletrólitos (CPRH, 2001)¹². Segundo Di Bernardi e Dantas (2005) para que o processo de coagulação seja eficiente, este deve ser realizado por meio de agitação intensa (mistura rápida) para que ocorram interações entre o coagulante e a água (efluente) (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A floculação das partículas já coaguladas pela ação do eletrólito resulta das várias forças de atração que atuam entre as partículas neutralizadas que se agregam umas às outras formando os denominados flocos. A velocidade de formação desses flocos depende, no início da agitação térmica (movimento Browniano) e, ao atingirem um tamanho de cerca de a, 1 mm, depende também da agitação mecânica do meio. Evidentemente, essa agitação mecânica deve ser em nível moderado (mistura lenta), pois, do contrario, poderá provocar a desagregação dos flocos já formados, o que dificultará a sua remoção (CPRH, 2001)¹³.

De acordo com Pavanelli (2001) os principais mecanismos que atuam na coagulação são: compressão da camada difusa; adsorção e neutralização; varredura; adsorção e formação de pontes.

A compressão da camada difusa faz com que ocorra a desestabilização das partículas coloidais pela adição de íons de carga contrária. A desestabilização de um colóide por um eletrólito diferente, ocorre devido às interações eletrostáticas, ou seja, íons de mesma carga são repelidos e de carga contrária são atraídos pelos colóides (DI BERNARDI; DANTAS, 2005).

Os principais aspectos relacionados a este mecanismo de coagulação são: a quantidade de eletrólitos necessários para conseguir a coagulação é independente da concentração de colóides na água e não é possível causar a reversão de cargas dos colóides (Spinelli, 2001)¹⁴ (apud VAZ, 2009).

¹² CPRH – Companhia Pernambucana do Meio Ambiente. Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização: Tipologia Galvanoplastia. Recife, CPRH/GTZ, 2001.

¹³ Ibid. 2001.

¹⁴ SPINELLI, V. A. Quitosana: Polieletrólito natural para o tratamento de água potável. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis – SC, 2001.

Na desestabilização dos colóides ocorrem interações coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. algumas espécies químicas são capazes de serem adsorvidas na superfície das partículas coloidais. Como tais espécies são de carga contrária à da superfície dos colóides, ocorrerá a desestabilização. Esta desestabilização é causada pelo coagulante em dosagens bem inferiores às do mecanismo da dupla camada. E é possível a reversão de carga superficial das partículas coloidais através da superdosagem de espécies adsorvíveis (MENDES, 1989).

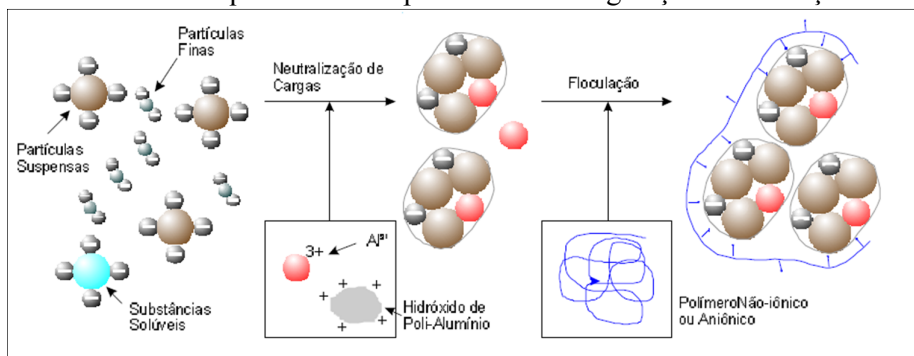
O mecanismo de adsorção e neutralização de cargas deve ser utilizado quando após a coagulação ocorra a filtração direta, fazendo com que as partículas desestabilizadas fiquem retidas no interior do meio filtrante (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

“Na varredura, conforme a quantidade de coagulante adicionado ao meio, do pH da mistura, da concentração de alguns íons presentes na água, poderá ocorrer a formação de precipitados” (SILVA, 2005) (apud VAZ, 2009). É bastante utilizado em estações de tratamento de água, com floculação e sedimentação e posterior filtração (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

“Os flocos formados são maiores do que aqueles formados quando se utiliza do mecanismo de adsorção e neutralização, resultando assim, em velocidades de sedimentação maiores” (PAVANELLI, 2001). Todos esses mecanismos podem ser observados na figura 08.

O mecanismo de adsorção e formação de pontes envolve a utilização de compostos orgânicos, sintéticos ou naturais, os quais apresentam sítios ionizáveis ao longo de sua cadeia, servindo de ponte entre a superfície à qual estão aderidos e outras partículas, podendo ser classificados como catiônicos, aniônicos ou anfóteros. Este comportamento dos polímeros como coagulante pode ser explicado baseando-se na sua adsorção à superfície das partículas coloidais, seguida pela redução de carga ou pelo entrelaçamento das partículas na cadeia do polímero (MENDES, 1989).

FIGURA 08 – Modelo esquemático dos processos de coagulação e floculação.



Fonte: Silva e Carvalho, 2008

Há vários tipos de coagulantes/floculantes de origem química e vegetal. Dentre os vários coagulantes químicos, os sais de alumínio e ferro são os mais utilizados. Os de origem orgânica naturais ou sintetizados, conhecidos universalmente como polieletrólitos, são constituídos por grandes cadeia moleculares e dotados de sítios com cargas positivas ou cargas negativas. Os sais de alumínio são amplamente utilizados em todo o mundo como agente coagulante. O sulfato de alumínio, é fácil de transportar e manejar, apresenta custo reduzido e é produzido em diversas regiões do Brasil. A coagulação com este coagulante é geralmente efetiva na faixa de pH entre 5,0 a 8,0 (VAZ, 2009).

Os flocos resultantes da coagulação com sulfato de alumínio são essencialmente de natureza inorgânica, portanto, o lodo não entra em decomposição biológica, isto é, não é biodegradável, dificultando sua disposição final. Além disso, apresenta um lodo gelatinoso e volumoso.

2.4 LEGISLAÇÃO FEDERAL QUANTO AO LANÇAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS

Segundo a resolução N° 430, de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução N° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

Das condições e padrões de lançamento de efluentes. Art. 16. Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedçam as condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis:

I - condições de lançamento de efluentes:

- a) pH entre 5 a 9;
- b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- c) materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone *Inmhoff*. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

- d) regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;
- e) óleos e graxas:
- óleos minerais: até 20 mg/L;
 - óleos vegetais e gorduras animais: até 50 mg/L;
- f) ausência de materiais flutuantes; e
- g) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;

II – Padrões de Lançamento de Efluentes:

TABELA 11 - Padrões de Lançamento de Efluentes.

Parâmetros inorgânicos	Valores máximos
Arsênio total	0,5 mg/L As
Bário total	5,0 mg/L Ba
Boro total (Não se aplica para o lançamento em águas salinas)	5,0 mg/L B
Cádmio total	0,2 mg/L Cd
Chumbo total	0,5 mg/L Pb
Cianeto total	1,0 mg/L CN
Cianeto livre (destilável por ácidos fracos)	0,2 mg/L CN
Cobre dissolvido	1,0 mg/L Cu
Cromo hexavalente	0,1 mg/L Cr ⁺⁶
Cromo trivalente	1,0 mg/L Cr ⁺³
Estanho total	4,0 mg/L Sn
Ferro dissolvido	15,0 mg/L Fe
Fluoreto total	10,0 mg/L F
Manganês dissolvido	1,0 mg/L Mn
Mercúrio total	0,01 mg/L Hg
Níquel total	2,0 mg/L Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg/L N
Prata total	0,1 mg/L Ag
Selênio total	0,30 mg/L Se
Sulfeto	1,0 mg/L S
Zinco total	5,0 mg/L Zn
Parâmetros Orgânicos	Valores máximos
Benzeno	1,2 mg/L
Clorofórmio	1,0 mg/L
Dicloroeteno (somatório de 1,1 + 1,2cis + 1,2 trans)	1,0 mg/L
Estireno	0,07 mg/L
Etilbenzeno	0,84 mg/L
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,5 mg/L C ₆ H ₅ OH
Tricloroeteno	1,0 mg/L
Tolueno	1,2 mg/L
Xileno	1,6 mg/L

Fonte: CONAMA (2011)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para os ensaios de Coagulação/Flotação se baseia em tratamentos químicos para estações de tratamento de água (ETA's), que prescreve as etapas e o tratamento de efluentes líquidos em geral.

O rejeito de cobre sulfetado utilizado para os testes são originários da mina do Sossego. Cerca de 3,5 kg de rejeito foram usados nos procedimentos. Os reagentes utilizados na flotação foram: Ditionofosfato de Sódio, Amil Xantato de Potássio, MIBC, Propileno Glicol. Todos a 1% conforme valores utilizados na indústria

3.1 TESTES DE DENSIDADE

3.1.1 Densidade do sólido

A densidade foi obtida a partir do método do picnômetro. O método consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar. Exigi-se também uma balança de precisão, com, no mínimo, duas casas decimais. Para assegurar que o procedimento foi utilizado corretamente, a determinação da densidade foi feita em duplicata. Foi utilizada uma amostra contendo 45% de sólido, cerca de 22,5 g em um picnômetro de 50 ml.

Primeiramente, foi pesado o picnômetro vazio, limpo e seco na estufa a 100 °C e resfriado no dessecador, correspondendo o valor de A_1 . Com o picnômetro vazio e seco foi adicionado 22,5 g da amostra de rejeito de cobre, e foi pesado, obtendo o valor de A_2 . Em seguida foi adicionado água no picnômetro juntamente com a amostra de cobre, até transbordar, obtendo o valor de A_3 . O A_4 é obtido com o picnômetro cheio apenas com água destilada.

Em seguida foi calculada a densidade real do cobre, através da Equação:

$$ds = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

d_s = densidade dos sólidos;

A_1 = peso do picnômetro vazio;

A_2 = peso do picnômetro com a amostra;

A_3 = peso do picnômetro com a amostra e a água;

A_4 = peso do picnômetro com água;

3.1.2 Densidade da polpa

Há necessidade de se conhecer a densidade da polpa “ dp ”, trata-se de um parâmetro importante que deve ser sempre controlado. Para sua determinação, deve-se antes determinar, por picnometria, a densidade do sólido que compõe a polpa.

A densidade da polpa foi calculada pela equação de Determinação da Percentagem de Sólidos (%S). Nas práticas de laboratório, utilizam-se percentagens de sólidos próximos aquelas praticadas nos circuitos pilotos e industriais.

$$(\% \text{ sólidos}) = 100 \frac{d_s (dp - 1)}{dp (d_s - 1)} \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:

d_s = densidade do sólido;

dp = densidade da polpa.

3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.2.1 Análise granulométrica por peneiramento.

O peneiramento é compreendido como um processo de classificação de partículas por tamanho. Embora fatores como forma e densidade das partículas sejam significativos nesse processo, o tamanho da partícula é o fator predominante na classificação por tamanho. Em

geral, o peneiramento, nas operações de laboratório, de material fino, compreende a faixa granulométrica desde 37 até 10 μm .

O processo de peneiramento fino pode ser usado tanto a seco quanto a úmido. No peneiramento a seco, método realizado no presente trabalho, as partículas rolam sobre a superfície da tela e são expostas às aberturas das mesmas por várias vezes, numa verdadeira disputa probabilística na tentativa de encontrar a abertura da tela.

A amostra foi homogeneizada na forma de tronco de cone e posteriormente quarteada, separando cerca de 1 kg para análise granulométrica.

Depois, baseado na abertura em malhas em escala industrial, defini-se a distribuição granulométrica em peneiras da série Tyler, no intervalo de 425 μm a 38 μm . Convertem-se as aberturas em micrometros para aberturas em mesh Utilizou-se peneiras com valores correspondentes em mesh de 35, 65, 100, 150, 200, 325 e 400.

TABELA 12 – Distribuição granulométrica típica do rejeito de flotação.

Malhas (μm)	Massa (g)	Retido Simples (%)	Retido Acumulado (%)	Passante e Acumulado
425	11,9	3,57	3,57	96,43
210	57,8	17,34	20,91	79,09
150	35,2	10,56	31,46	68,54
106	32	9,6	41,06	58,94
75	32,1	9,63	50,69	49,31
45	32,8	9,84	60,53	39,47
38	15,8	4,74	65,27	34,73
0	115,8	34,73	100	0
Soma	333,4			
P 80	221 μm			

3.2.2 Ensaios de sedimentação

A sedimentação é um dos processos de separação sólido-líquido baseado na força gravitacional. De baixo custo e simplicidade operacional, baseia-se na diferença entre as densidades dos constituintes sólidos ou em outras propriedades, como diâmetro das partículas, para promover a separação seqüencial de sólidos ou das fases sólida e líquida.

A curva de sedimentação foi analisada em provetas de 2000 ml. Foi preparada uma polpa contendo 45 % de sólidos (900 g) de rejeito e 1200 ml de água. A velocidade foi calculada pelo quociente da altura pelo tempo decorrido.

Foram feitas curvas de sedimentação com:

- polpa contendo apenas água;
- polpa contendo reagentes da flotação, Ditiofosfato de Sódio, Amil Xantato de Potássio, MIBC, Propileno Glicol. Todos a 1% valores utilizados na indústria;
- polpa com reagentes mais o coagulante sulfato de alumínio com a dosagem de 200mg em conformidade com as estações de tratamento de água (ETA's);
- polpa com reagentes, coagulante e solução padrão de NaOH a 0,1 M.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DENSIDADE DO REJEITO

A densidade real do rejeito de cobre sulfetado foi determinada pelo método do picnômetro. A densidade relativa foi de 3 g/cm³.

4.2 DENSIDADE DA POLPA

Para a simulação do que ocorre na lagoa de rejeito, foi definido que a porcentagem da polpa teria 45% de concentração de sólido em massa (de rejeito). A densidade do sólido (rejeito) fora calculado por picnometria, então, calculou-se a densidade da polpa, 1,0003g/cm³.

4.3 PENEIRAMENTO

A análise granulométrica foi feita por peneiramento do produto fino nas malhas de 35, 65, 100, 150, 200, 325 e 400 (mesh) durante 10 minutos no agitador de peneiras de marca Betel, realizados em duplicata, contendo cada um 520 g.

A importância do processo está no fato de determinar a quantidade de finos envolvidos no rejeito de flotação como já foi mencionado e classificar essas partículas quanto ao tamanho, possibilitando observar a presença de partículas finas, ultrafinas ou coloidais.

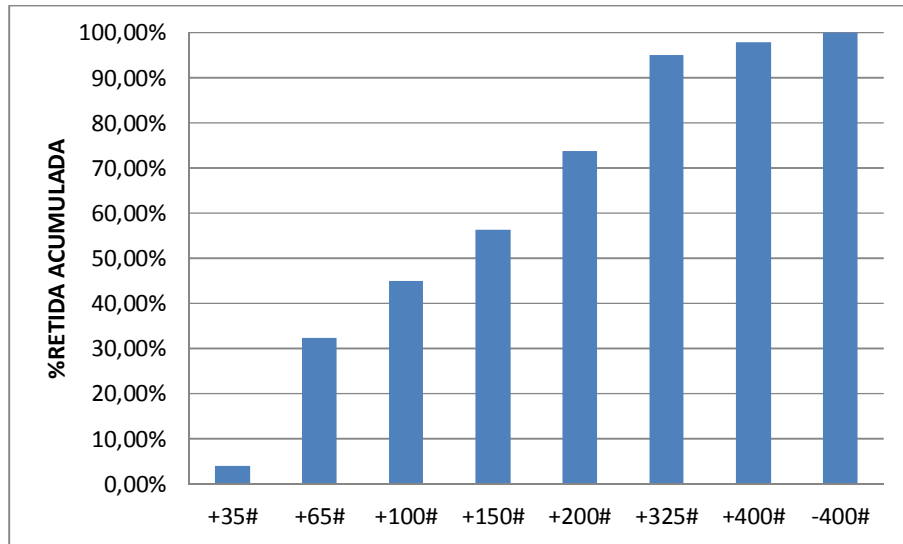


FIGURA 09 - Peneiramento 1

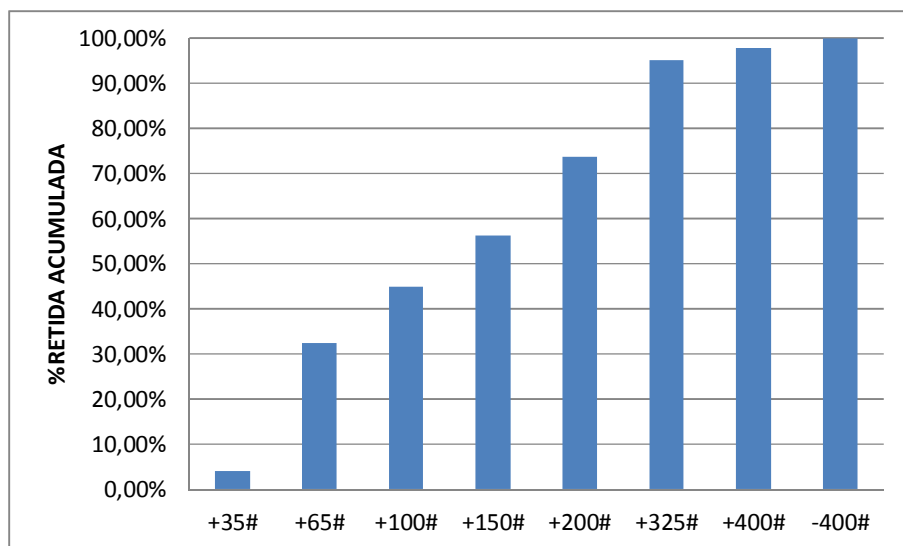


FIGURA 10 - Peneiramento 2

Verifica-se em ambos os peneiramentos as porcentagens retidas acumuladas são maiores nas malhas mais finas, comprovando a grande quantidade de finos envolvidos no processo.

4.4 CURVAS DE SEDIMENTAÇÃO

Foram realizadas cinco curvas de sedimentação com o objetivo de verificar o tempo de sedimentação das partículas sólidas presentes na polpa de rejeito. Observando-se a influência dos compostos adicionados a polpa através do tempo de sedimentação após sua adição. Realizou-se também medições de pH e temperatura após a adição dos reagentes, com auxílio de um phgmetro.

No primeiro ensaio foi utilizada 900 g de sólido e 1100 ml de água em uma proveta de 2000 ml de água.

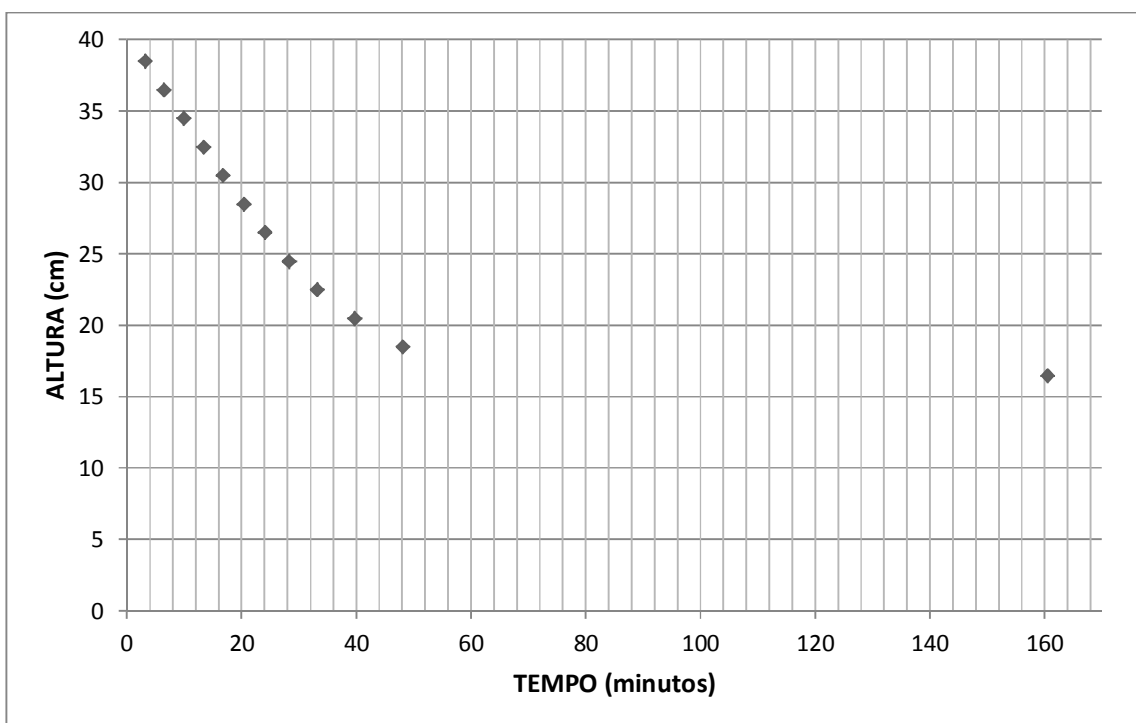


FIGURA 11 – Primeiro ensaio de sedimentação.

O material sedimentou totalmente, nota-se o leito de partículas compactadas no fundo da proveta (produto espessado), em uma altura de 16,5 cm (800ml), observa-se na Figura 11 a velocidade de sedimentação foi de 0,10 cm/min. Sedimentando totalmente em torno de três horas.

No segundo ensaio também foi utilizada 900 g de sólido e 1100 ml de água em uma proveta de 2000 ml de água.

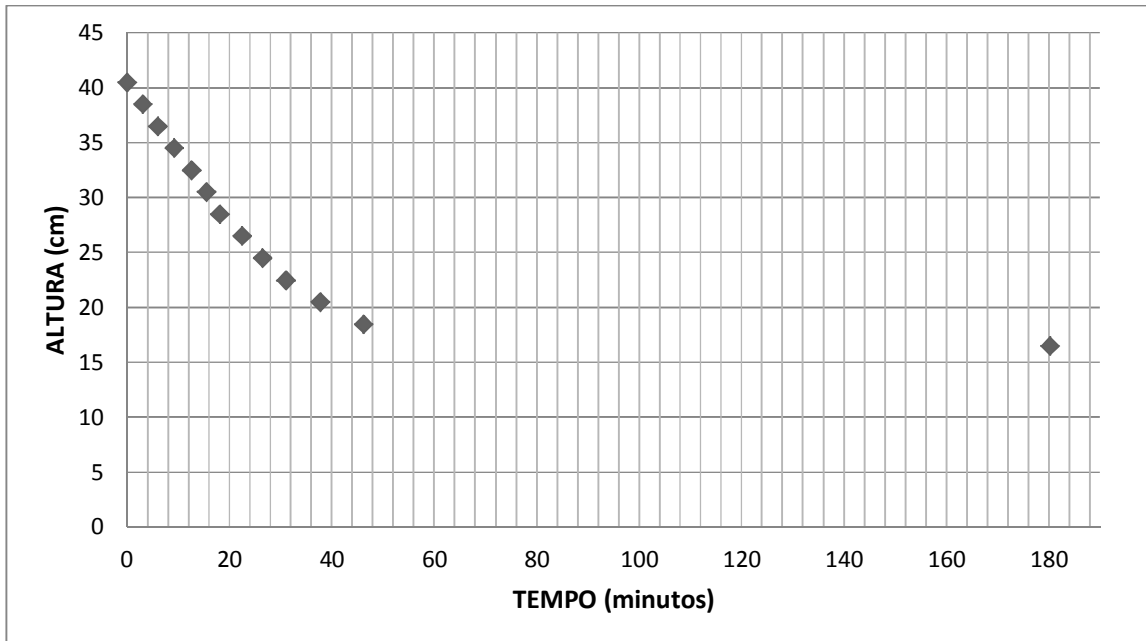


FIGURA 12 - Segundo ensaio de sedimentação

O material sedimentou em uma altura de 16,5 cm (800 ml), observa-se na Figura 12 a velocidade de sedimentação foi de 0,9 cm/min. Sedimentando totalmente em torno de três horas.

No terceiro ensaio foram utilizados 45% de sólidos e adicionados os reagentes da flotação, Dítiofosfato de Sódio, Amil Xantato de Potássio, MIBC, Propileno Glicol. Todos a 1% , valores em conformidade com as quantidades utilizadas na indústria.

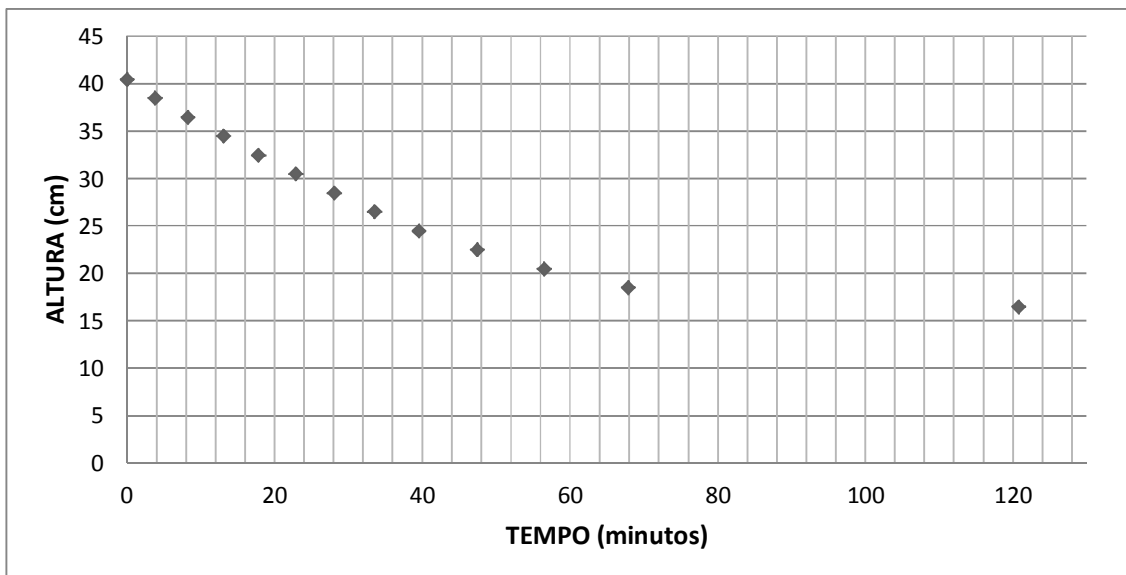


FIGURA 13 - Terceiro ensaio de sedimentação

O material sedimentou em uma altura de 16,5 cm (800 ml), observa-se na Figura 13 a velocidade de sedimentação foi de 0,13 cm/min. Verifica-se que a velocidade de sedimentação foi relativamente maior, logo, o tempo de sedimentação foi menor, sedimentando totalmente em torno de duas horas. A solução da polpa contendo os reagentes da flotação apresentou um pH neutro de 7,05 e temperatura de 25°C.

No quarto ensaio utilizou-se 45% de sólidos com uma polpa contendo os reagentes da flotação mais o coagulante sulfato de alumínio. O coagulante foi usado com o intuito de acelerar a sedimentação.

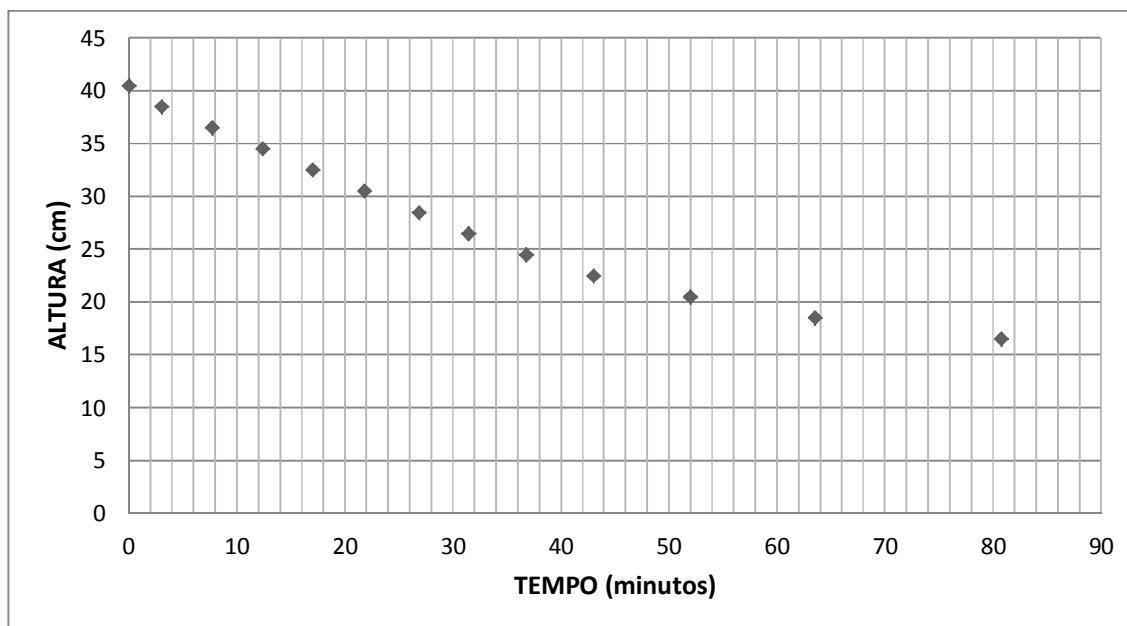


FIGURA 14 - Quarto ensaio de sedimentação

O material sedimentou em uma altura de 16,5 cm (800 ml), observa-se na Figura 14 a velocidade de sedimentação foi de 0,20 cm/min. A solução da polpa com a adição de sulfato de alumínio apresentou um pH de 7,55 e temperatura de 24,75 °C. Observa-se que a velocidade de sedimentação aumenta, diminuindo o tempo de sedimentação em uma hora, comparando com o tempo do terceiro ensaio. Porém se comparar com os ensaios 1 e 2 verifica-se a diminuição do tempo de sedimentação em duas horas.

No quinto ensaio foram utilizados 45% de sólidos com uma polpa contendo os reagentes da flotação, o coagulante sulfato de alumínio, mais o hidróxido de sódio com concentração de 1 M usado como auxiliador na coagulação/floculação das partículas sólidas, alterando o pH.

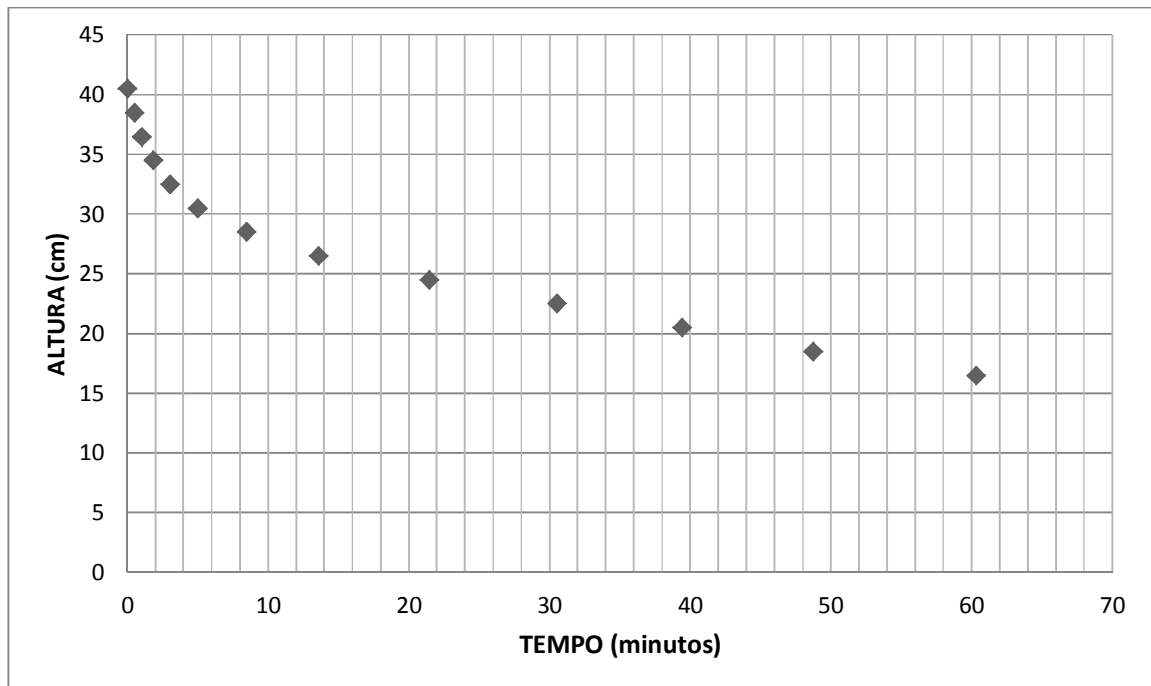


FIGURA 15 - Quinto Ensaio de sedimentação.

O material sedimentou em uma altura de 16,5 cm (800 ml), observa-se na Figura 15 a velocidade de sedimentação foi de 0,27 cm/min. Observa-se que a velocidade de sedimentação é elevada, diminuindo o tempo de sedimentação drasticamente. Verificou-se também o aumento do pH da solução que antes era aproximadamente neutra 7,05, tornando-se extremamente básica com o pH de 12,75.

Os coagulantes/floculantes costumam ser mais eficientes em uma faixa ótima de pH. O sulfato de alumínio, por exemplo, é mais eficiente em uma faixa ph entre 5 a 8.

. Sob essas condições não haveria necessidade de adicionar o NaOH como contribuinte do processo de floculação. Porém foi feita sua adição apenas para observação do tempo de sedimentação em uma polpa básica.

5 CONCLUSÃO

O aumento da preocupação com o meio ambiente e, em especial, com o uso dos recursos hídricos resultou na valorização da água como bem de consumo e tem levado os órgãos de controle ambiental a revisar a legislação em vigor e estipular limites mais rigorosos para o descarte de efluentes industriais.

A flotação por utilizar consideráveis quantidades de água e reagentes necessita de soluções que possam ser usadas para minimizar a quantidade de efluentes líquidos gerados a partir do seu processo. Assim faz-se necessário pensar na alternativa de reutilização da água usada no processo diminuindo o descarte de efluentes líquidos. Para tanto se faz possível a separação da fase sólido-líquido de forma mais rápida com a adição de um coagulante permitindo a recuperação da água.

Os processos de coagulação/floculação reúnem as melhores alternativas de atenuar a irregularidade na forma da partícula, ou ainda no seu diâmetro. Desse modo, o processo de aglomeração das partículas forma unidades maiores e o formato mais regular, que, conseqüentemente, sedimentam mais facilmente.

Pode-se observar ao longo dos ensaios de sedimentação a influência que o coagulante sulfato de alumínio teve sobre as partículas sólidas, aumentando a velocidade de sedimentação diminuindo, portanto o tempo de sedimentação.

6 RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho buscou demonstrar através de curvas de sedimentação a eficiência do sulfato de alumínio como agente coagulante dos efluentes líquidos da flotação do minério de cobre sulfetado. Analisando o tempo de sedimentação e a faixa ótima de pH que ele atua. No entanto, sugere-se mais ensaios variando a concentração de sulfato de alumínio e a faixa de pH. Além também de desenvolver o processo de coagulação/floculação com outros coagulantes.

REFERÊNCIAS

BALTAR, C. A. M. Flotação no Tratamento de Minérios. 2ª Ed. Editora Universitária da UFPE. Recife, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011*. Brasília: CONAMA, 2011.

CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - *Flotação: o estado da arte no Brasil*. 1ª Ed., v. 4. Signus. São Paulo, 2006.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2ª Ed., v. 1. Rima. São Carlos, 2005.

LOYOLA, L. M. Avaliação do desempenho da Mini Planta-Piloto de Flotação da CVRD: *Estudo Comparativo com Plantas Industriais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MENDES, C. G. N. Estudo da Coagulação e Floculação de águas sintéticas e naturais com cor e turbidez variáveis. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade Estadual do Estado de São Paulo, 1989.

PASTOR, J. R. et al. Tratamento Químico para Estações de Tratamento de Água. KURITA DO BRASIL LTDA – Soluções em Engenharia de Tratamento de Água. Copyright, 2008

PAVANELLI, G. *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. DAF-dissolved air flotation: *Potential applications in the mining and mineral processing industry*. Journal International Journal of Mineral Processing, v. 82, nº 1, p. 1-13, 2007.

RUBIO, J et al. Flotación como proceso de remoción de contaminantes: avances y aplicaciones em La flotación por aire disueltoc. *Minerals*, 57, n. 243, p. 21 – 28, 2002.

RUBIO, J.; BEAL, R. C.; DA ROSA, J. Tratamento e Recirculação de Águas de lavagem de veículos. IET/UFRGS/LTM, depositada em 11/00, INP (PI: 0006390-8). Patente concedida em 03/06/2003.

RUBIO, J.; TESSELE, F. Processos para o tratamento de efluentes na mineração. In: LUZ, A. B. et al., *Tratamento de Minérios* 3ª Ed. CETEM/CNPq/MCT, 2002. p. 639-700.

SILVA, D. O.; CARAVALHO, A. R. P. Etapas de um Tratamento de Efluente. KURITA DO BRASIL LTDA – Soluções em Engenharia de Tratamento de Água. Copyright, 2008.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. Introdução ao Tratamento de Minérios. Ed. da UFMG. Belo Horizonte, 2007, passim.

VAZ, L. G. L. *Performance do processo de Coagulação/Floculação do Tratamento do efluente líquido gerado na Galvanoplastia*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo – PR, 2009.

ANEXOS

ANEXO A – PRIMEIRO ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO (POLPA + ÁGUA)



ANEXO B – TESTE DE DENSIDADE UTILIZANDO O PICNÔMETRO



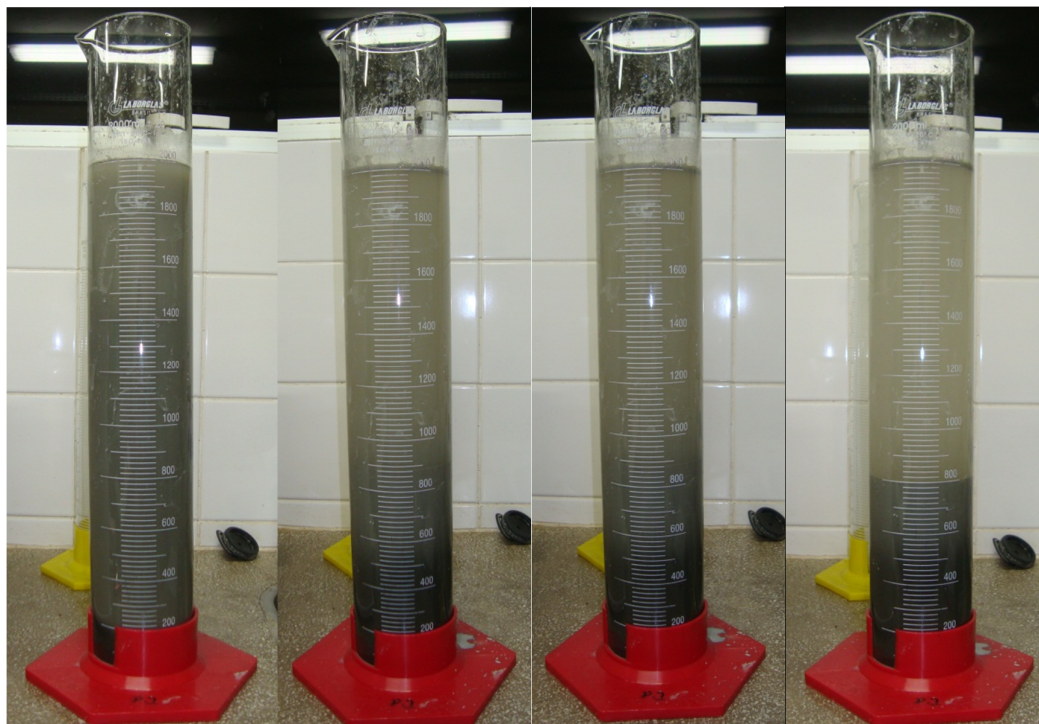
ANEXO C – ENSAIO DE PENEIRAMENTO



ANEXO D – REAGENTES UTILIZADOS NA FLOTAÇÃO DO COBRE SULFETADO



ANEXO E – ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO (POLPA + REAGENTES)



ANEXO F – ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO COM SULFATO DE ALUMÍNIO COMO COAGULANTE.

