



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MINERAL



# FLOTAÇÃO COLUNAR REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO: O EFEITO DA GRANULOMETRIA DA SÍLICA

WILLIAM RICARDO DE CARVALHO

OURO PRETO  
2003

William Ricardo de Carvalho

**FLOTAÇÃO COLUNAR REVERSA DE  
MINÉRIO DE FERRO:  
O EFEITO DA GRANULOMETRIA DA SÍLICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Tratamento de Minérios.

Orientador: Prof. Jader Martins.

Universidade Federal de Ouro Preto.

Ouro Preto

UFOP – EM – DEMIN – PPGEM

2003

Dissertação defendida e aprovada, em 19 de dezembro de 2003, pela banca examinadora constituída por:

---

Prof. Dr. Jader Martins – Orientador

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. – Rosa Malena Fernandes Lima. DEMIN – UFOP.

---

Prof. Dr. – Antônio Eduardo Clark Peres. DEMET – UFMG.

*Dedico este trabalho à minha  
mãe, Leda Maria de Carvalho, que  
hoje está junto de Deus e sempre me  
incentivou na busca dos meus ideais.*

## **AGRADECIMENTOS**

---

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de mais uma conquista e crescimento na carreira profissional.

Aos meus pais, irmã, tios e parentes por todo o auxílio prestado ao longo da minha carreira.

À Universidade Federal de Ouro Preto e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, por fornecerem os conhecimentos técnico-científicos.

À SAMARCO Mineração S.A. e aos seus engenheiros Ivan Santos e Alessandra Mangabeira, aos técnicos João Miranda e Márcio Cruz pelo fornecimento do concentrado de minério de ferro, pelas análises e pela compreensão.

À Omega Mineração S.A., pelo fornecimento das amostras de quartzito para a realização dos experimentos.

Ao Prof. Dr. Jader Martins, pela orientação prestada.

Aos membros da banca examinadora, Profa. Dra. Rosa Malena Fernandes Lima e Prof. Dr. Antônio Eduardo Clark Peres.

Aos técnicos do Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas, Antônio, Jesus, João e Luiz, pelo auxílio nos ensaios de flotação.

À secretária do Departamento de Engenharia de Minas, Denise e à secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Luciana, pela amizade e apoio desprendidos ao longo da realização do trabalho.

Ao Centro de Treinamento e Transferência de Tecnologia (CT<sup>3</sup>) da Fundação Gorceix, ao Lourival, ao José Geraldo, aos técnicos Flávio e Geraldo, e aos estagiários, pela atenção.

À Fundação Gorceix, pelo fornecimento da bolsa de mestrado no período de realização do mesmo.

Ao aluno graduando em Engenharia de Minas, Adilson Melo, pelo auxílio voluntário que muito contribuiu para a realização dos experimentos.

Aos colegas, pela amizade, compreensão e companheirismo e às demais pessoas que colaboraram para a elaboração deste trabalho.

## SUMÁRIO

---

	<b>PÁG.</b>
Resumo .....	11
Abstract .....	12
1 – Introdução .....	13
2 – Objetivo .....	15
3 – Revisão Bibliográfica .....	16
3.1 – Generalidades .....	16
3.2 – Características do Minério de Ferro .....	16
3.3 – Beneficiamento do Minério de Ferro .....	17
3.3.1 – A Flotação de Minério de Ferro .....	17
3.4 – A Coluna de Flotação .....	18
3.4.1 – Parâmetros de Projeto .....	18
3.4.2 – Parâmetros Operacionais .....	20
3.4.3 – As Zonas da Coluna de Flotação .....	21
3.4.3.1 – A Zona de Coleta .....	21
3.4.3.1 – A Zona de Limpeza .....	22
3.5 – A Capacidade de Carregamento .....	22
3.5.1 – Definição da Capacidade de Carregamento .....	22
3.5.2 – Fatores que Influenciam na Capacidade de Carregamento .....	23
3.5.2.1 – Fluxo de Sólidos na Alimentação .....	23
3.5.2.2 – Altura da Zona de Coleta .....	24
3.5.2.3 – <i>Drop-Back</i> Preferencial de Partículas Grosseiras .....	25
3.6 – A Influência do Tamanho das Partículas Mineraias na Flotação .....	25
3.6.1 – O Processo de Interação Partícula-Bolha na Flotação Colunar .....	26
3.6.1.1 – A Eficiência de Colisão .....	27
3.6.1.2 – A Eficiência de Adesão .....	32
3.6.2 – Probabilidade de Coleta .....	34
3.6.2.1 – Probabilidade de Colisão .....	35
3.6.2.2 – Probabilidade de Adesão .....	36
3.6.2.3 – Velocidade (Taxa) de Coleta .....	37
3.6.3 – Flotação Colunar com <i>Bias</i> Negativo .....	37

3.7 – Considerações Importantes .....	39
4 – Material e Métodos .....	41
4.1 – Generalidades .....	41
4.2 – Preparação das Amostras .....	41
4.2.1 – Preparação das Amostras de Sílica .....	41
4.2.2 – Preparação das Amostras de Concentrado .....	42
4.2.3 – Preparação das Amostras de Minério .....	42
4.3 – Equipamentos e Reagentes Utilizados .....	43
4.4 – Ensaios de Flotação .....	44
4.4.1 – Ensaios de Flotação Convencional .....	44
4.4.2 – Ensaios de Flotação em Coluna .....	46
5 – Resultados e Discussão .....	48
5.1 – Generalidades .....	48
5.2 – Gráficos de Recuperação x Granulometria .....	49
5.2.1 – Flotação Convencional .....	49
5.2.2 – Flotação em Coluna .....	55
5.3 – Gráficos de Comparação .....	59
5.4 – Gráficos de Teor x Granulometria .....	62
5.4.1 – Flotação Convencional .....	62
5.4.2 – Flotação em Coluna .....	65
6 – Conclusões .....	68
7 – Sugestões pra Trabalhos Futuros .....	69
8 – Referências Bibliográficas .....	70
Anexo I .....	75
1 – Análise Granulométrica do Quartzito .....	75
Anexo II .....	77
1 – Recuperação e Teores Obtidos .....	77

## I – LISTA DE FIGURAS

---

	<b>Pág.</b>
1 – Representação esquemática da coluna de flotação e suas principais zonas.....	19
2 – Aproximação de uma bolha ascendente e uma partícula descendente sob a influência da força gravitacional destacando a influência das forças de lubrificação e forças entre as partículas.....	28
3 – Três zonas do modelo de interação partícula-bolha no entorno da superfície de uma bolha de raio $r_b$ .....	29
4 – Representação esquemática da trajetória de escorregamento da partícula em torno da bolha.....	31
5 – Representação esquemática de uma partícula de tamanho $d_p$ , deslizando em torno de uma bolha de tamanho $d_b$ a partir de um ângulo de colisão ou ângulo de adesão, $\theta_a$ , para um ângulo máximo de deslizamento de $\pi/2$ .....	62
6 – Representação esquemática da coluna do DEMIN utilizada nos experimentos de flotação .....	43
7 – Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação convencional com 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	50
8 – Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação convencional com 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	51
9 – Gráfico da recuperação de sílica x granulometria para os ensaios de flotação convencional com 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	52
10 – Gráfico da recuperação de sílica x granulometria para os ensaios de flotação convencional com 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	54
11 – Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação em coluna com 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	55

12 – Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação em coluna com 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	56
13 – Gráfico da recuperação de sílica x granulometria para os ensaios de flotação em coluna com 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	57
14 – Gráfico da recuperação de sílica x granulometria para os ensaios de flotação em coluna com 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	58
15 – Gráfico de comparação entre as recuperações de sílica para a flotação convencional e para flotação em coluna, onde se utilizou uma dosagem de 50g/t de amina e 40% de sólidos em polpa .....	60
16 – Gráfico de comparação entre as recuperações de sílica para a flotação convencional e para flotação em coluna, onde se utilizou uma dosagem de 70g/t de amina e 40% de sólidos em polpa .....	61
17 – Gráfico do teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação convencional para uma dosagem de 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	62
18 – Gráfico do teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação convencional para uma dosagem de 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	63
19 – Gráfico do teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação convencional para uma dosagem de 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	64
20 – Gráfico do teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação convencional para uma dosagem de 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	64
21 – Gráfico do teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação em coluna para uma dosagem de 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	65

22 – Gráfico do teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação em coluna para uma dosagem de 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	66
23 – Gráfico do teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação em coluna para uma dosagem de 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	67
24 – Gráfico do teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação em coluna para uma dosagem de 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa .....	67
25 – Análise granulométrica do quartzito utilizado como contaminante dos minérios dos ensaios de flotação .....	76

**LISTA DE TABELAS**

---

	<b>PÀG.</b>
1 – Valores dos parâmetros $A$ e $n$ para a equação geral para a probabilidade de colisão .....	35
2 – Itens de variação para os ensaios de flotação em bancada .....	45
3 – Itens de variação para os ensaios de flotação em coluna .....	47
4 – Análise granulométrica do quartzito utilizado como contaminante dos minérios .....	75
5 – Valores das recuperações de ferro para os ensaios de flotação convencional, segundo as condições gerais .....	77
6 – Valores das recuperações de sílica para os ensaios de flotação convencional, segundo as condições gerais .....	77
7 – Valores das recuperações de ferro para os ensaios de flotação em coluna, segundo as condições gerais .....	78
8 – Valores das recuperações de sílica para os ensaios de flotação em coluna, segundo as condições gerais .....	78
9 – Valores dos teores de ferro no flotado para os ensaios de flotação convencional, segundo as condições gerais .....	78
10 – Valores dos teores de sílica no afundado para os ensaios de flotação convencional, segundo as condições gerais .....	79
11 – Valores dos teores de ferro no flotado para os ensaios de flotação em coluna, segundo as condições gerais .....	79
12 – Valores dos teores de sílica no afundado para os ensaios de flotação em coluna, segundo as condições gerais .....	80

## RESUMO

---

O presente trabalho se objetivou a verificar e avaliar a influência do tamanho das partículas de sílica na flotação colunar reversa de minério de ferro.

Para o tal foi utilizado um minério o qual foi constituído de um concentrado de minério com teor de ferro de 68,01%, proveniente da SAMARCO Mineração S.A. que foi contaminado, a percentagens de 20% e 30%, por quartzito com alta percentagem de sílica proveniente da Omega Mineração Ltda, o qual foi britado, moído a úmido e seco em estufa. Executou-se a análise granulométrica deste material e verificou-se que o  $d_{50}$  do quartzito foi de 85 $\mu$ m (sendo o tamanho mais próximo de 75 $\mu$ m ou 200 malhas Tyler).

Executaram-se experimentos, em batelada, de flotação convencional reversa em célula Denver de 3,0 litros, bem como de flotação colunar reversa em uma coluna de 1,70m de altura e volume de 5,40 litros, sendo os experimentos conduzidos em escala laboratorial. Os experimentos foram executados no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Determinaram-se, as recuperações metálicas de ferro, as recuperações de sílica, os teores de ferro no flotado, bem como os teores de sílica no afundado, para cada um dos ensaios de flotação reversa de minério de ferro.

Com estes resultados construíram-se gráficos da recuperação em função das três faixas de granulometria de sílica (abaixo de 75 $\mu$ m, distribuição ampla e acima de 75 $\mu$ m) segundo os itens de variação: a percentagem de sólidos na alimentação (40% e 50% para os ensaios de flotação convencional e 40% para os ensaios de flotação em coluna), a percentagem de coletor (50g/t e 70g/t) e percentagem de sílica (20% e 30%) utilizado como cotaminante.

Analisaram-se os resultados e verificou-se que os valores de recuperação de sílica obtidos nos ensaios de flotação em coluna foram superiores aos obtidos nos ensaios de flotação convencional para os minérios com sílica na faixa de granulometria acima de 75 $\mu$ m. E ainda que os valores de recuperação de sílica obtidos nos ensaios de flotação convencional foram superiores aos obtidos nos ensaios de flotação em coluna para minérios com sílica na faixa de granulometria abaixo de 75 $\mu$ m.

Foram ainda propostas as possíveis modificações de processo para a melhoria das especificações do produto exigidas pelo mercado consumidor.

## ABSTRACT

---

This work had as objective verifies and to evaluate the silica particle size influence in the reverse column flotation of iron ore.

For this an ore which was constituted of an ore concentrate with iron grade of 68,01% was used. This concentrate was originating from SAMARCO Mineração S.A. It was contaminated, to percentages of 20% and 30%, for quartzite with high silica content originating from Omega Mineração Ltda. This quartzite was grind, wet mill and dry in a stove. The size analysis of the quartzite was executed and it was verified that  $d_{50}$  was of 85  $\mu\text{m}$  (with the near size of 75 $\mu\text{m}$  or 200 meshes Tyler).

Experiments, in boat-load, of reverse conventional flotation in cell Denver of 3,0 liters, as well as of reverse column flotation in a column of 1,70m of height and a volume of 5,40 liters were executed, being the experiments led in a laboratorial scale. Such experiments were executed at the Ores Treatment Laboratory of the Mines Engineering Department of the Ouro Preto Federal University.

The metallic iron recoveries, the silica recoveries, the iron grades in the floated, as well as the silica content in the no collected fraction, was determined for each one of the experiments of reverse flotation of iron ore.

With these results, graphs of the recovery were built in function of the three distributions of silica size (below 75  $\mu\text{m}$ , wide distribution and above 75  $\mu\text{m}$ ) according to the variation items: the feeding solids percentage (40% and 50% for the conventional flotation experiments and 40% for the column flotation experiments); the collector percentage (50g/t and 70g/t); and silica percentage (20% and 30%) used as contaminant.

The results were analyzed and it was verified that the values of silica recovery obtained in the column flotation experiments were superior to the obtained in the conventional flotation experiments for the ores with silica particle size above 75  $\mu\text{m}$ . And although the values of silica recovery obtained in the conventional flotation experiments were superior to the obtained in the flotation column experiments for ores with silica size particle below 75  $\mu\text{m}$ .

The possible process modifications for the improvement of the product specifications demanded by the consuming market were still proposed.

## 1 – INTRODUÇÃO

---

O Estado de Minas Gerais é indiscutivelmente o maior produtor brasileiro de minério de ferro, uma vez que retém em seu território as maiores reservas do minério, sendo estas localizadas no Quadrilátero Ferrífero. Este fato faz com que as empresas exploradoras do minério de ferro invistam em pesquisas com o intuito de otimizar a sua produção.

Nos últimos anos a etapa de beneficiamento do minério de ferro que vem sofrendo grandes avanços é a da concentração por flotação em coluna. Uma das empresas pioneiras na utilização deste método no país foi a SAMARCO Mineração S.A. Embora este processo de concentração seja amplamente utilizado por muitas empresas em todo o mundo, ainda existem incertezas a seu respeito.

Tais incertezas levam muitos pesquisadores a dedicarem seus esforços a esse processo de concentração. O melhor conhecimento do que acontece no processo favorece a otimização da operação do equipamento proporcionando assim, a obtenção do produto nas especificações de qualidade requeridas pelo mercado consumidor e uma provável redução dos custos para esta finalidade.

A maioria das pesquisas realizadas no mundo sobre flotação colunar se refere a flotação direta e em muitos casos, de minérios sulfetados. No Brasil, que é onde se concentra o maior volume de colunas para beneficiamento de minério de ferro, poucos trabalhos têm sido feitos para buscar um melhor entendimento dos mecanismos hidrodinâmicos deste processo.

É comum, encontrar nas usinas em funcionamento, operadores reclamando da inadequação dos equipamentos, muitas vezes sem entender as razões deste mau desempenho.

Dentre os parâmetros utilizados para verificar o desempenho destes equipamentos está a capacidade de carregamento, um dos parâmetros de projeto da coluna de flotação mais importantes. Talvez, este parâmetro não tenha recebido a atenção requerida, uma vez que possui um enorme potencial na solução de problemas do cotidiano das empresas brasileiras produtoras de minério de ferro que utilizam a flotação reversa como principal método de concentração.

A granulometria das partículas que se deseja flotar pode interferir no desempenho da coluna, sendo também um parâmetro de verificação de desempenho da mesma, uma vez que está intimamente relacionado à capacidade de carregamento.

Baseando-se neste aspecto e nas considerações anteriormente citadas, o presente trabalho, discute e investiga a interferência da granulometria da sílica na flotação reversa de Minério de Ferro, por intermédio de contaminação de amostras de concentrado de minério de ferro com sílica pura (quartzito), a percentagens conhecidas.

Para tais investigações foram executados experimentos, em batelada, de flotação em coluna e flotação em bancada (convencional), em escala laboratorial, com variações na concentração de coletor, na granulometria das partículas minerais de sílica envolvidas, na percentagem de sólidos em polpa da alimentação e na percentagem de sílica adicionada ao concentrado.

## **2 – OBJETIVO**

---

O presente trabalho objetivou a verificação e avaliação do efeito da granulometria de sílica na flotação colunar reversa de minério de ferro e a sua influência na operação e controle do processo.

### 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

#### 3.1 – Generalidades

A coluna de flotação é um equipamento utilizado para concentração de minérios que leva em consideração as características superficiais das partes constituintes do minério a qual se pretende concentrar. Na maioria das vezes, faz-se necessário a utilização de reagentes para modificar tais características, com a finalidade de facilitar a separação entre a parte de valor útil e a parte sem valor comercial.

A coluna de flotação vem, ao longo dos anos, tomando o espaço no que diz respeito à concentração de minerais por flotação, uma vez que difere das células mecânicas pela ausência do agitador mecânico, pela introdução da água de lavagem e pelo fluxo se dar em característica de contra-corrente. Um estudo detalhado sobre a coluna de flotação foi feito por Yianatos (2001), onde são apresentados os fundamentos da flotação, as características de projeto, o controle e o escalonamento de colunas de flotação.

A ausência de agitador mecânico nas colunas promove um fluxo em regime próximo do laminar o que é necessário para que ocorra a coleta efetiva das partículas em fluxo descendente, pelo fluxo das bolhas de gás (normalmente ar) ascendentes. Porém existem projetos de colunas com agitadores mecânicos que são pouco utilizados industrialmente. É importante lembrar também que a velocidade de ar pode provocar uma agitação do sistema, fazendo com que o mesmo opere em um regime de fluxo diferente do citado acima, dificultando, ou até mesmo impedindo, a coleta das partículas.

A presença da água de lavagem se faz necessária para que o processo de concentração em coluna tenha um *bias* denominado de positivo, ou seja, a diferença entre as vazões volumétricas do afundado e da alimentação seja positiva. Há, porém, casos nos quais o *bias* é negativo e este caso será abordado no decorrer do texto.

#### 3.2 – Características do Minério de Ferro.

O Minério de Ferro é basicamente composto por duas partes distintas sendo uma delas o mineral de óxido de ferro, podendo ser hematita constituinte dos concentrados, e a outra parte, formada basicamente pelo mineral de óxido de silício, ou sílica (como denominado na prática –  $\text{SiO}_2$ ), que constitui os rejeitos.

Além das duas partes acima citadas, existem outros minerais e/ ou elementos que na maioria das vezes constituem, em menor percentagem, o minério de ferro nos

quais seus teores devem ser controlados, para atender as especificações do produto final. Estes minerais e/ ou elementos são basicamente, o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – alumina), o óxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ ) e o elemento fósforo (P).

### **3.3 – Beneficiamento do Minério de Ferro.**

O processo de beneficiamento do minério de ferro compreende inúmeras operações que têm por objetivo, preparar o minério para a etapa de concentração, seja no aspecto granulométrico (cominuição), ou no aspecto físico-químico (concentração). As etapas de cominuição envolvem um elevado consumo de energia para promover a liberação necessária das partículas constituintes do minério para as etapas subseqüentes.

#### **3.3.1 – A Flotação de Minério de Ferro.**

A concentração do minério de ferro pode ser efetuada por vários métodos, sendo a flotação um dos mais utilizados, pois oferece os melhores resultados no que diz respeito à recuperação, embora ainda existam incertezas relacionadas a este método de concentração. Dentre os outros métodos de concentração, podem ser citados os métodos densitários, onde se utilizam equipamentos como o jigue e o helicóide ('espiral') de Humphrey's, que utilizam a diferença de densidade do rejeito (sílica) e do mineral de valor útil (óxido de ferro); os métodos magnéticos e os eletromagnéticos, onde o mineral de valor útil é separado do rejeito, uma vez que o primeiro ao ser imerso em um campo magnético, segue as suas linhas de fluxo sendo então separado do rejeito. Esta separação é possível devido à diferença de susceptibilidade magnética dos minerais envolvidos no processo.

Na flotação normalmente, o material flotado é o concentrado e o afundado é o rejeito (denominada de flotação direta), porém na flotação de minério de ferro, o concentrado é obtido no afundado e o rejeito é obtido no flotado (denominada de flotação reversa). Isso se deve ao fato de que normalmente, as partículas constituintes do rejeito de minério de ferro são compostas por sílica e as do concentrado são óxidos de ferro. Assim, devido à diferença de densidade dos dois minerais, bem como o fato de o minério de ferro apresentar uma menor quantidade de sílica e também ao fato de maior facilidade de obtenção dos reagentes, coletor (amina) e depressor (amido), utiliza-se a flotação denominada de reversa para a concentração do minério de ferro por apresentar melhores resultados no que diz respeito à recuperação e ao teor do mineral de valor econômico.

### 3.4 – A Coluna de Flotação.

A coluna de flotação é um equipamento de concentração de minérios que utiliza o sistema de fluxo contra-corrente de polpa e bolhas de gás (geralmente ar) em um regime de fluxo próximo do laminar (diferentemente das células convencionais que utilizam um fluxo concorrente e um regime turbulento). Devido a este fato as colunas contêm duas zonas distintas, a zona de coleta (ou de recuperação) e a zona de espuma (ou de limpeza), as quais serão abordadas mais adiante.

Nas colunas a alimentação da polpa se faz há uma altura de 2/3 da altura total da mesma (Aquino *et. al.*, 1998), porém esta altura pode sofrer variações de acordo com a concepção do projeto. As colunas podem ser de secção transversal quadrada ou circular, sendo as colunas de secção circular de maior utilização.

As partículas constituintes da polpa são separadas por suas diferentes características físico-químicas superficiais. Estas características superficiais podem ser naturais, ou modificadas com o auxílio de reagentes próprios (coletores e depressores) para que ocorra a concentração do mineral de interesse. Utilizam-se também outros reagentes a fim de que as bolhas permaneçam estáveis o bastante para carregar as partículas até o transbordo, denominados de espumantes, e outros capazes de manter o pH em uma faixa onde o processo se desenvolve mais facilmente, denominados de controladores de pH. No caso específico da flotação reversa de minério de ferro, utilizam-se as aminas como coletores (que também tem características espumante), amido como depressor e a soda cáustica (NaOH) e o ácido clorídrico (HCl), como controladores de pH.

As bolhas de ar coletam as partículas que tem menor afinidade com a água (hidrofóbicas) e são carregadas até a parte superior da coluna (flotado), e as partículas com maior afinidade com a água (hidrofílicas) deixam o equipamento pela parte inferior (afundado).

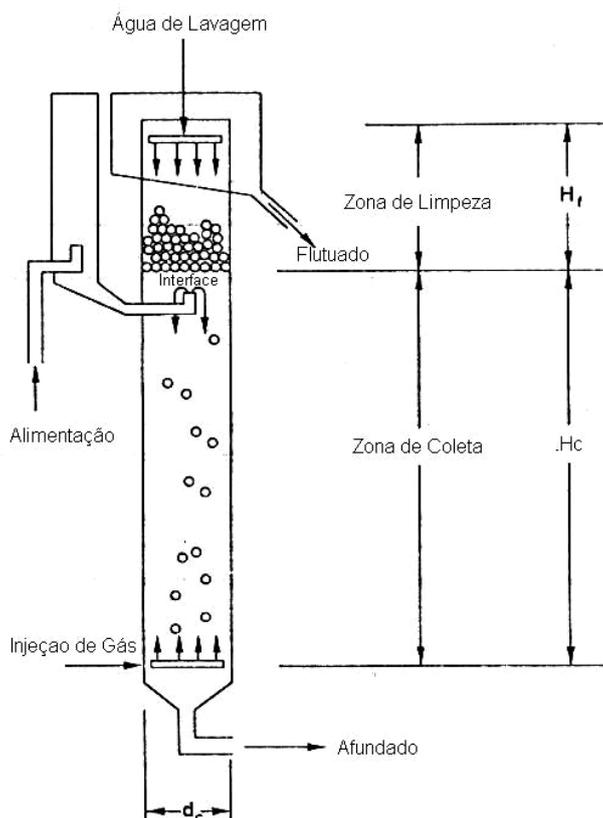
#### 3.4.1 – Parâmetros de Projeto.

Segundo Finch e Dobby (1990), as unidades comerciais da coluna têm tipicamente de 9 a 15 m de altura e de 0,5 a 3,0 m de diâmetro. Como mencionado anteriormente, os autores enfatizam que a secção transversal da coluna pode ser circular ou quadrada, onde o diâmetro ou o lado da coluna designa o seu tamanho. A Figura 1 mostra um desenho esquemático de uma coluna de flotação e suas diferentes zonas. As colunas podem também ter sua secção transversal separada por divisões chamadas de *baffles*, cada uma com um aspersor de gás, os quais promovem um

acréscimo no *hold up* de gás assim como na relação  $H_c/d_c$ , como mostrado por Tavera *et.al.* (2001).

A coluna difere das células convencionais por dois parâmetros de projeto, o mecanismo de geração de bolhas e a presença de água de lavagem. Na coluna não há o sistema de agitação, porém existem projetos de colunas com agitadores mecânicos que são pouco aplicados industrialmente.

As bolhas são geradas por aspersores internos (localizados na base interna da coluna acima da descarga do afundado) que são canos ou borracha perfurados, porém podem existir outros tipos de aspersores de ar que fornecem bolhas de tamanhos menores. A água de lavagem é adicionada na zona de espuma por uma série de canos perfurados localizados acima do coletor de espuma. Há projetos que utilizam a água de lavagem localizada na zona de espuma.



**FIGURA 1** – Representação esquemática da coluna de flotação e suas principais zonas (Finch e Dobby, 1990).

Um outro parâmetro de projeto importante é a relação entre a altura da zona de coleta e o diâmetro da coluna ( $H_c/d_c$ ), pois este fator é o que regula o tipo de fluxo dentro da coluna. O desejável para a operação da coluna é que o regime seja próximo

do laminar, entretanto a relação  $H_c/d_c$  pode fornecer um regime de fluxo diferente que dificulta, ou até mesmo impede, a coleta das partículas. Existem também outros fatores que afetam a performance do equipamento que sofrem mudanças na variação da geometria da coluna como, por exemplo, a velocidade da partícula, o fluxo volumétrico do *bias* e o fluxo de gás (Finch e Dobby, 1990).

### 3.4.2 – Parâmetros Operacionais.

Na operação das colunas de flotação existem parâmetros que interferem na obtenção de produtos com a qualidade desejada. Dentre estes parâmetros podemos citar a velocidade superficial de gás, o *hold up* de gás, altura da camada de espuma, a água de lavagem, o *Bias* e o fluxo de massa. A seguir discute-se cada um desses parâmetros e sua importância na operação da coluna (Aquino *et. al.*, 1998).

**Velocidade Superficial de Gás ( $J_g$ )** – Os autores ressaltam que dentro dos limites de estabilidade da coluna, a recuperação do mineral flotado é normalmente crescente com o aumento da vazão de gás até atingir um máximo. Este crescimento na recuperação é devido ao aumento da área superficial de bolhas introduzidas na coluna. Porém, o acréscimo da vazão de gás pode alterar as condições de fluxo para um regime turbulento prejudicando o processo. Os autores definem a velocidade superficial de gás ( $J_g$ ) como sendo a relação entre a vazão de gás ( $Q_g$ ) e a área da seção transversal da coluna ( $A_c$ ) e recomendam que  $J_g$  seja entre 1,0 e 3,0 cm/s.

**Hold up de Gás** – Define-se *hold up* de gás como sendo uma fração volumétrica de gás contida em uma zona da coluna. Este parâmetro depende da vazão de gás, do tamanho das bolhas, da densidade de polpa (ou percentagem de sólidos na polpa), do carregamento de sólidos nas bolhas (ou a taxa de carregamento) e da velocidade descendente da polpa.

**Altura da Camada de Espuma** – A altura das camadas de espuma varia na faixa de 0,5 a 1,5m. A altura da camada de espuma pode ser variável dependendo do seu objetivo, caso deseja-se eliminar o problema do arraste hidráulico, utiliza-se uma camada de espuma relativamente baixa. Caso deseja-se obter a seletividade entre espécies hidrofóbicas ou se trabalhar com uma elevada taxa de gás, utilizam-se camadas de espuma maiores.

**Água de lavagem** – A água de lavagem tem três funções básicas: i) substituir a água de alimentação na fração não flotada minimizando o arraste hidráulico de partículas hidrofóbicas; ii) aumentar a altura e a estabilidade da camada de espuma; e iii) reduzir a coalescência de bolhas na formação de um leito de bolhas empacotadas.

**Bias** – Os autores definem que o *bias* representa a fração de água de lavagem que flui através da coluna e é responsável pela rejeição de partículas arrastadas pela força hidráulica. Estima-se o *bias* (B) como sendo a diferença entre as vazões volumétricas do afundado ( $Q_t$ ) e da alimentação ( $Q_f$ ). Os autores recomendam que o *bias* esteja na faixa de 0,05 a 0,15. Pode-se também estimar o valor do *bias* (segundo Garibay *et.al.*, 2002) pela diferença entre a vazão de água de lavagem e a vazão de água no flutuado. Embora seja considerado um parâmetro operacional primário pelos autores, o *bias* é dependente de outros parâmetros primários, podendo ser considerado um parâmetro secundário.

**Fluxo de Massa** – O fluxo de massa pode ser variado através de modificações na taxa e na concentração de sólidos na alimentação, na vazão de água de lavagem e na altura da zona de coleta da coluna.

### 3.4.3 – As zonas da Coluna de Flotação.

No processo de separação dos minerais com propriedades superficiais diferentes por flotação em coluna, podem ser visualizadas duas zonas as quais são distintas pelas suas propriedades. Tais zonas são a zona de coleta e a zona de espuma ou de limpeza.

#### 3.4.3.1 – Zona de Coleta.

A zona de coleta (ou de recuperação), é a zona compreendida entre a interface polpa/ espuma e os aspersores de gás. É na zona de coleta que o fluxo de partículas hidrofóbicas encontra um fluxo de bolhas ascendentes e as mesmas se interagem promovendo a coleta das partículas minerais hidrofóbicas.

Finch e Dobby (1990), ressaltam que “a definição da altura da zona de coleta é complicada pelo fato de existirem dois pontos de entrada na zona de coleta: a alimentação de polpa, a uma distância abaixo da interface, e, na interface, *bias* de água e sólidos provenientes da zona de limpeza.” Os autores discutem também a interferência da proximidade da alimentação com a zona de limpeza.

Com o objetivo de melhorar a coleta das partículas hidrofóbicas, pode-se variar a relação  $H_c/d_c$ . O experimento efetuado com sílica por Garibay *et. al.* (2002), mostra que alturas típicas de zonas de coleta podem afetar a performance da flotação, quando são processadas polpas relativamente densas (20% p/p) de minerais flotáveis.

Um outro fator importante a destacar é a interação entre as duas zonas, que é discutido mais profundamente por Finch e Dobby (1990), onde os autores mostram

que a interação entre as zonas de coleta e de espuma afeta a performance do equipamento.

### 3.4.3.2 – Zona de Limpeza.

A zona de espuma (ou de limpeza), é aquela, como o próprio nome sugere, em que apresenta as bolhas de gás carregadas com as partículas minerais hidrofóbicas.

Segundo Aquino *et. al.* (1998) a camada de espuma pode ser dividida em três seções. A primeira, “o leito de bolhas expandidas, acima da interface polpa-espuma, é resultado dos choques das bolhas contra a interface o que provoca a coalescência de bolhas.” A segunda, “o leito de bolhas empacotadas, se estende desde o topo da primeira seção até o ponto de introdução de água de lavagem” (os autores supõem que a água de lavagem está dentro da camada de espuma), apresenta uma coalescência moderada de bolhas. A terceira, “a espuma de drenagem convencional, ocorre imediatamente acima do ponto de introdução de água de lavagem e apresenta bolhas de formato hexagonal”.

Como na zona de coleta, a altura da zona de espuma também pode ser variada com o objetivo de melhorar a recuperação. A zona de espuma é uma área de atenção na flotação colunar, uma vez que a capacidade de carregamento é definida nessa zona, podendo fornecer informações sobre o funcionamento do equipamento.

## 3.5 – A Capacidade de Carregamento

### 3.5.1 – Definição da Capacidade de Carregamento.

A capacidade de carregamento pode ser definida sob duas formas, como mencionado por Espinoza-Gomez *et. al.* (1988).

A primeira, diz que “a capacidade de carregamento é o coeficiente da unidade de massa de sólidos obtida no flotado pela unidade de volume de gás injetado na coluna.” Nesse caso a capacidade de carregamento é representada por  $C_g$ .

$$C_g = K_1 \frac{\pi d_p \rho_p}{d_b} \quad (1)$$

A segunda, diz que “a capacidade de carregamento é o quociente da massa de sólidos obtida no flotado por unidade de tempo pela unidade de área da secção transversal da coluna”, e é representada por  $C_a$ .

$$C_a = 60 C_g J_g = \frac{60 K_1 \pi d_p \rho_p J_g}{d_b} \quad (2)$$

Onde (para as duas equações):

$d_p$  – é o diâmetro médio das partículas, ou mais convenientemente  $d_{80}$  (em cm);

$d_b$  – é o diâmetro médio das bolhas (em cm) no topo da camada de espuma;

$\rho_p$  – é a densidade da partícula (em g/cm<sup>3</sup>).

$J_g$  – é a velocidade superficial de gás (cm/s)

A maioria dos autores afirma que  $C_a$  é mais usual como parâmetro de escalonamento de um projeto de coluna de flotação. Segundo Finch e Dobby (1990), experiências com colunas em escala de laboratório ou em planta piloto, mostraram que  $C_a$  é relativamente independente da taxa de gás (sendo a velocidade superficial de gás,  $J_g$ , maior que 1,5 cm/s). Neste caso, se  $C_g$  é calculado, este diminui com o aumento de  $J_g$ , por este motivo o  $C_a$  é mais utilizado.

Observa-se que a capacidade de carregamento é intimamente dependente do diâmetro da partícula (diretamente proporcional), e para uma mesma condição de flotação (mesmos  $K_1$ ,  $d_b$ ,  $J_g$  e  $\rho_p$ ), tem-se que à medida que o diâmetro das partículas aumenta a capacidade de carregamento também aumenta. Porém, este processo se evolui até alcançar um máximo, pois a partir de um determinado diâmetro médio de partículas, a bolha não será capaz de efetuar o carregamento das mesmas (Dobby e Finch, 1990).

### **3.5.2 – Fatores que Influenciam na Capacidade de Carregamento**

#### **3.5.2.1 – Fluxo de Sólidos na Alimentação**

Um parâmetro de relevância na flotação em coluna, e que afeta o desempenho da mesma, assim como influencia a capacidade de carregamento, é o fluxo de sólidos na alimentação. O fluxo de sólidos na alimentação pode afetar a coleta das partículas hidrofóbicas pelas bolhas de gás ascendentes. Para um mesmo fluxo volumétrico de partículas hidrofóbicas contidas na alimentação, no caso de ocorrer uma certa taxa de alimentação de sólidos, a uma certa velocidade, ocorrerá uma probabilidade de coleta dessas partículas pelas bolhas de gás. Por outro lado, se esta taxa da alimentação de sólidos diminuir, para se manter o mesmo fluxo volumétrico, será necessário que a vazão também aumente, elevando consigo a velocidade das partículas e, no entanto, diminuindo a probabilidade dessas partículas serem coletadas pelas bolhas, reduzindo a capacidade de carregamento.

Uma evidência da dependência da capacidade de carregamento com a taxa de alimentação de sólidos é discutida por Espinoza-Gomes *et. al.* (1998) onde os autores executam ensaios onde correlacionam a taxa de sólidos do concentrado com a taxa de sólidos na alimentação. Nestes ensaios utilizaram-se taxas de alimentação diferentes

para os diferentes fluxos testados, e os autores constataam que nenhum dos métodos de alteração de taxa de alimentação de sólidos (alteração de densidade de polpa ou *bias*) afeta a relação teor/ recuperação. Entretanto, em um dos ensaios a capacidade de carregamento aparentemente decresce com o aumento da taxa de alimentação de sólidos, onde deve ser levada em consideração a dependência da capacidade de carregamento com a percentagem de sólidos da alimentação.

### **3.5.2.2 – Altura da Zona de Coleta**

A capacidade de carregamento pode também ser afetada pela altura da zona de coleta e pela percentagem de sólidos, como é discutido por Garibay *et. al.* (2002), onde os autores afirmam que para percentagens de sólidos relativamente baixas (ou seja, <20%), tanto a recuperação e as capacidades de carregamento como a altura da coluna (a altura da coluna é aqui definida como sendo a altura da zona de coleta) aumenta. Os autores explicam que este comportamento mais provavelmente, reflete a ação da cinética de flotação a qual dita recuperações maiores para tempos de residência maiores. Ainda sobre a percentagem de sólidos os autores dizem que “quando a percentagem de sólidos é alta (ou seja, > 25%), a altura da zona de coleta afeta adversamente a recuperação e a capacidade de carregamento da coluna”.

A dependência da recuperação com a altura da zona de coleta é também relevante, pois se nota em experimentos (Maksimov *et. al.*, 1991) que a recuperação cresce até certo ponto à medida que a altura da zona de coleta aumenta, constata-se que a recuperação decresce depois de um certo ponto. Os autores explicam que, “a razão para resultados metalúrgicos mais baixos, com a profundidade da célula excedendo um certo limite, pode ser o conteúdo de partículas menores e bolhas mais carregadas no afundado”. Este fato também é mencionado por Garibay *et. al.* (2002), onde dizem que para uma dada capacidade da coluna e uma taxa de fluxo de alimentação constante, a recuperação aumenta e o teor diminui quando a relação  $H_c/d_c$  aumenta. É sugerida também, a necessidade de se ter uma separação entre o aspersor e a descarga do afundado da ordem de 0,5m para prevenir a perda de bolhas mineralizadas no fluxo do afundado. Os autores mencionam ainda que a presença de bolhas de gás no fluxo do afundado é devido à elevada viscosidade da polpa e à proximidade dos aspersores à descarga do mesmo.

### **3.5.2.3 – Drop-Back Preferencial de Partículas Grossas.**

Um fator importante que afeta a capacidade de carregamento na flotação colunar é o desligamento preferencial de partículas mais grossas das bolhas de gás na zona de espuma, mais conhecido como *drop back* de espuma. Este fator pode reduzir a recuperação assim como a capacidade de carregamento do equipamento. O *drop back* é um fator dependente do tamanho da partícula, ou seja, um aumento no tamanho das partículas, resulta em um correspondente acréscimo na quantidade de partículas retornando para a zona de coleta (Patwardhan e Honaker, 2000).

Outros autores discutem o *drop back* como Finch e Dobby (1990), onde afirmam que geralmente o mesmo pode ser de 50% em colunas de escalas laboratoriais e piloto, podendo ser maior em colunas de escala industrial. O crescimento do *drop back* em colunas maiores pode ser relacionado ao aumento do coeficiente de mistura na espuma. Efeitos de parede nas colunas em escala laboratorial pode estabilizar a espuma e reduzir este efeito.

Finch e Dobby (1990) ainda mencionam que o *drop back* é provavelmente dependente do carregamento da espuma. E ainda que as espumas podem ficar carregadas o bastante para atingir a máxima taxa de concentração de sólidos (fração de cobertura); fazendo com que, preferencialmente, as partículas mais grossas (devido a sua energia fracional) se desliguem das bolhas de gás, reduzindo a capacidade de carregamento.

## **3.6 – A Influência do Tamanho das Partículas Minerais na Flotação**

Dentre os fatores de importância na flotação, destaca-se o tamanho das partículas minerais, uma vez que no processamento de minerais pode-se encontrar uma determinada distribuição de tamanho de grãos devido, principalmente aos processos de cominuição.

Tendo em vista este aspecto, faz-se necessário a separação destas partículas em faixas de granulometria nas quais sejam compatíveis com o processo de flotação, uma vez que o mesmo é aplicável a partículas que não sejam consideradas grosseiras nem mesmo muito finas, sendo, portanto aplicável a partículas de granulometria intermediária.

É claro que a denominação de partícula fina ou grosseira é dependente do bem mineral que esteja sendo tratado, podendo a granulometria de um certo mineral ser denominada grosseira, porém a mesma granulometria ser denominada fina para outro mineral.

A granulometria das partículas pode interferir no processo de flotação porque as consideradas muito finas podem recobrir as demais (*slime coating*) fazendo com que o processo não apresente os resultados esperados. A fim de minimizar este efeito, as partículas finas devem ser eliminadas do processo. Para isso, é realizado um procedimento denominado de deslamagem, ou seja, a eliminação das partículas muito finas (chamadas de lama, daí então o nome deslamagem) da polpa tratada. Este processo é utilizado na usina de beneficiamento da SAMARCO Mineração S.A., como mencionado por Carvalho (2000). É possível que nas lamas possa conter teores de minério consideráveis e que seja técnica e economicamente viável a sua recuperação, por outros métodos de concentração.

Observa-se que a eficiência de coleta é dependente do tamanho (diâmetro) das partículas. Como mencionado por Finch e Dobby (1990), a eficiência de coleta varia com o tamanho das partículas até atingir um máximo, sendo este fato observado em experimentos com a variação do tempo de indução ( $t_i$ ), bem como o diâmetro da bolha, a densidade das partículas, a viscosidade do líquido e a retenção de gás (*hold up*) para o modelo de coleta proposto por estes autores, onde a eficiência de coleta é dependente da eficiência de colisão e da eficiência de aderência das partículas minerais sobre as bolhas de ar ascendentes.

Com isto, torna-se claro o fato de que se existe uma granulometria de partículas onde há uma maior eficiência, portanto há a possibilidade de ocorrer um valor de recuperação maior para esta faixa de granulometria, comparando-se com as demais. Isto demonstra a possibilidade de divisão do processo de flotação por etapas segundo a granulometria das partículas envolvidas, o que provavelmente facilitaria o controle das plantas de flotação, uma vez que diminuiria a intervenção em alguns parâmetros de processo.

### **3.6.1 – O Processo de Interação Partícula-Bolha na Flotação Colunar**

Na flotação colunar, um fluxo de partículas hidrofóbicas descendentes encontra um fluxo de bolhas ascendentes, nos quais as partículas se colidem com as bolhas e então se aderem à superfície das mesmas e formando um agregado partícula-bolha que é então carregado para a camada de espuma.

O processo de interação partícula-bolha é composto por uma série de micro-processos que podem ser dependentes de fenômenos hidrodinâmicos e físico-químicos referentes às superfícies das bolhas e das partículas. Inúmeros trabalhos são realizados a fim de entender estes processos, o que auxilia na estimativa da constante de velocidade e da cinética da flotação. Dentre esses trabalhos, destacam-

se os executados por Dobby e Finch (1987), Finch e Dobby (1990), Dai *et. al.* (1998, 1999, 2000), Leppinen (1999), Nguyen *et. al.* (1998, 2002), Phan *et. al.* (2003), Ralston *et. al.* (1999, 2002), onde são apresentados diversos modelos de eficiência de coleta, e a interferência da granulometria das partículas hidrofóbicas a serem coletadas, bem como mostra a atuação das forças inerciais na interação partícula-bolha.

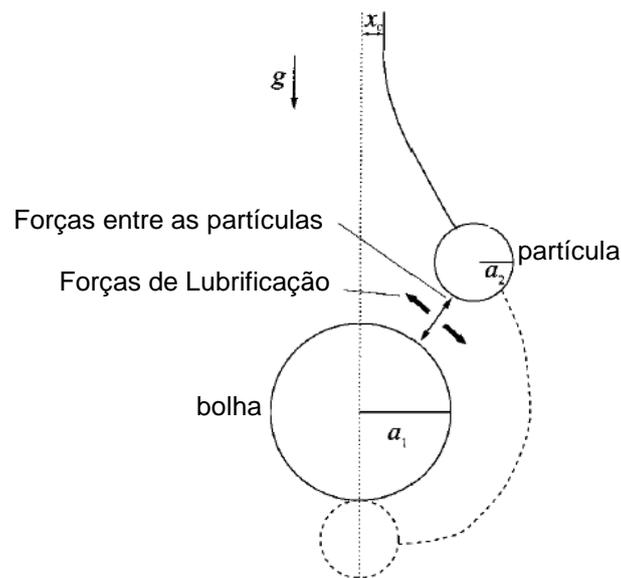
Um dos processos mais importantes do estudo da interação partícula-bolha é a eficiência de coleta (captura, ou ainda, remoção),  $E_{col}$ , que é definida pela maioria dos autores como sendo o produto de três sub-processos envolvidos no processo de interação partícula-bolha – a eficiência de colisão,  $E_c$ , a eficiência de adesão,  $E_a$ , e a eficiência de estabilidade,  $E_s$ , (que leva em consideração a probabilidade de desligamento de partículas hidrofóbicas das bolhas,  $E_d$ ) – onde  $E_{col}$  é dada por:

$$E_{col} = E_c \cdot E_a \cdot E_s \quad (3)$$

Alguns autores admitem que  $E_s$  é igual a 1, uma vez que para ocorrer a coleta é necessário que o agregado partícula-bolha seja estável. Outros, porém, admitem que há a probabilidade de ocorrer o desligamento das partículas das bolhas e então a equação acima se torna  $E_{col} = E_c \cdot E_a \cdot (1 - E_d)$ . Entretanto, os sub-processos que recebem maior atenção são os de colisão e adesão que serão discutidos nos tópicos subsequentes.

### **3.6.1.1 – A Eficiência de Colisão**

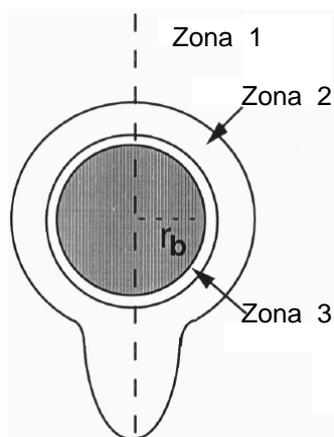
Uma maneira simples de entender a colisão é explicada por Leppinen (1999), onde o autor diz que para grandes distâncias de separação, as partículas e bolhas têm trajetórias verticais devido à força gravitacional, mas com a aproximação delas as forças hidrodinâmicas fazem com que as bolhas e partículas se divirjam horizontalmente. Estas forças hidrodinâmicas resultantes da aproximação do fluido formam um espaço entre a bolha e a partícula. À medida que este espaço entre a bolha e partícula se torna menor, as forças de lubrificação resultantes tornam-se maiores e a ausência de outra força entre as partículas, ou o movimento Browniano dessas partículas, promovem o contato entre a bolha e a partícula. Este processo é mostrado na Figura 2, a seguir.



**FIGURA 2** – Aproximação de uma bolha ascendente e uma partícula descendente sob a influência da força gravitacional destacando a influência das forças de lubrificação e forças entre as partículas. A linha pontilhada é a continuação da trajetória da partícula indicando a colisão partícula-bolha (Leppinen, 1999).

Outros autores, também apresentam seus modelos sobre a eficiência de colisão, baseados na teoria de flotação de Derjaguin-Dukin, como apresentado por Dai *et.al.* (2000), sendo o proposto por Sutherland o mais amplamente aceito.

A teoria de flotação de Derjaguin-Dukin, segundo Dai *et. al.* (2000), diz que para a flotação, partículas de tamanho pequeno ou médio o processo de interação partícula-bolha é dado pela introdução de um modelo de três zonas, como o mostrado na Figura 3, onde para cada uma das zonas as forças atuantes na bolha e na partícula são diferentes, devido à distância entre as partículas e a bolha. A seguir são discutidas as forças atuantes para cada uma das seguintes zonas, conforme apresentado pela teoria de flotação de Derjaguin-Dukin.



**FIGURA 3** – Três zonas do modelo de interação partícula-bolha (Derjaguin-Dukin) no entorno da superfície de uma bolha de raio  $r_b$ . (Dai *et.al.*, 2000)

**Zona 1** – É a região distante da superfície da bolha. Nesta zona forças hidrodinâmicas são dominantes. As forças hidrodinâmicas de arraste atuam empurrando as partículas para os arredores da bolha, forças de viscosidade tendem a retardar este movimento relativo entre a partícula e a bolha, ao mesmo tempo em que forças inerciais e a gravidade direcionam as partículas em direção à superfície da bolha. A interação entre a partícula e a bolha nesta zona é um sub-processo de colisão propriamente dito.

**Zona 2** – Nesta zona, o fluxo de líquido ao redor das bolhas ascendentes cria um curso que arrastam íons ou partes de tensoativos a partir da calota superior da bolha em direção à parte inferior da mesma. Devido a suas diferentes mobilidades, os íons são concentrados de forma não uniforme próximo à parte inferior da bolha, o que resulta em um forte campo elétrico entre a superfície superior e as partículas que colidem com a bolha. Esta zona pode ser também denominada de zona difusioforética, uma vez que forças de difusão e eletroforéticas controlam o movimento das partículas. Nesta zona, a interação partícula-bolha também corresponde a um sub-processo de colisão.

**Zona 3** – Nesta zona, as forças de superfície tornam-se mais importantes. Dependendo do sinal da força total, a velocidade de adelgaçamento do filme líquido entre a partícula e a bolha pode ser acelerada ou retardada e, portanto, a adesão de

partículas na superfície da bolha pode ser promovida ou não. Conseqüentemente, a interação partícula-bolha na zona 3 pode ser considerada como um sub-processo de adesão.

Com base nestas considerações e na equação 3, foram elaborados inúmeros modelos baseados no modelo de colisão de Sutherland, que é discutido a seguir conforme apresentado por Dai *et. al.*(2000).

### **O Modelo de Eficiência de Colisão de Sutherland, 1948 (Dai *et. al.*, 2000)**

Este modelo foi o primeiro a ser desenvolvido para um sistema de bolha-partícula, com a obtenção de expressão de eficiência de colisão,  $E_c$ , a partir das funções de fluxo de fluido. Sutherland desenvolveu o seu modelo baseado em três considerações:

1. A inércia das partículas pode ser desprezível e assim as partículas seguem uma trajetória coincidente com as linhas de fluxo do fluido, e então a eficiência de colisão pode ser determinada pelas linhas de fluxo do fluido;
2. A superfície da bolha é completamente livre, ou seja, móvel; e
3. O regime de fluxo do líquido na superfície da bolha é do tipo potencial, ou seja, o número de Reynolds da bolha,  $R_{eb}$ , é muito alto ( $R_{eb} \gg 1$ ). Lembrando que o número de Reynolds é definido como:

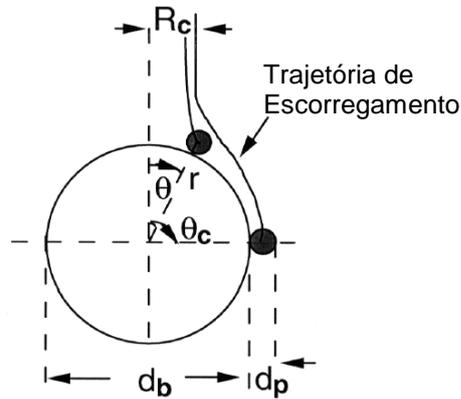
$$R_{eb} = \frac{v_b d_b \rho_f}{\eta} \quad (4)$$

Sendo  $\rho_f$  a densidade do fluido,  $v_b$  a velocidade da bolha,  $d_b$  o diâmetro da bolha e  $\eta$  a viscosidade do fluido.

Sutherland encontrou uma equação para uma distância de uma linha de fluxo crítica ( $R_c$ ) a partir da linha de movimento da bolha, como mostrado na Figura 4. Esta linha de fluxo crítica é definida como sendo a linha de fluxo do fluido, onde uma partícula movendo ao longo desta linha, imediatamente toca a superfície da bolha. A trajetória da partícula, que coincide com a linha de fluxo crítica, é também chamada de trajetória de escorregamento, ou trajetória limite e  $R_c$  é também referido como o raio de colisão e pode ser expresso como:

$$R_c = \left( \frac{3d_p d_b}{4} \right)^{1/2} \quad (5)$$

em que  $d_p$  e  $d_b$ , são os diâmetros da partícula e da bolha, respectivamente.



**FIGURA 4** – Representação esquemática da trajetória de escorregamento da partícula em torno da bolha (raio de colisão,  $R_c$ ; distancia radial,  $r$ ; ângulo de colisão,  $\theta$ ; ângulo máximo de colisão,  $\theta_c$ ). (Dai *et. al.*, 2000).

De acordo com Sutherland, todas as partículas que estão contidas no raio de colisão irão colidir com a bolha e então, a eficiência de colisão,  $E_c$ , é determinada pela razão da área da secção transversal do tubo de fluxo ( $\pi R_c^2 = 3\pi d_p d_b / 4$ ) e área projetada da bolha ( $\pi d_b^2 / 4$ ), sendo representada por:

$$E_c = \frac{3d_p}{d_b} \quad (6)$$

Devido às considerações tomadas inicialmente, Dai *et. al.* (2000), dizem que o modelo implica que a colisão pode ocorrer uniformemente em toda a metade superior da superfície da bolha, o que outros modelos constatarem que este fato não é verdadeiro, fazendo com que o modelo proposto por Sutherland forneça valores superestimados da eficiência de colisão.

Após Sutherland, outros pesquisadores encontraram uma expressão para a eficiência de colisão, porém incluem um grande número de fatores a serem medidos e amplos cálculos matemáticos envolvendo estes fatores. Os modelos posteriores têm uma precisão maior da eficiência de colisão (Modelo de colisão de Dukhin, ou modelo

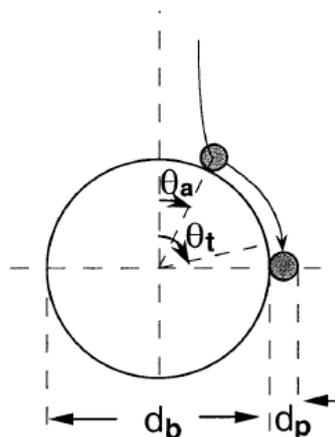
GSE, *Generalized Sutherland Equation*) do que o de Sutherland, uma vez que neste são feitas considerações que simplificam os cálculos.

### 3.6.1.2 – A Eficiência de Adesão

Dai *et. al.* (1999), afirmam que a adesão de uma partícula hidrofóbica em uma bolha de gás (ou ar), é uma das mais importantes sub-etapas da interação partícula-bolha na flotação de minerais. E ainda, que para ocorrer a adesão, o filme líquido entre a partícula e a bolha de gás na qual foi colidida, deve adelgaçar e romper, seguido pela expansão da linha de três fases de contato a partir de um perímetro de umidade.

Alguns modelos foram feitos a fim de se determinar a eficiência de adesão tais como os executados por Dobby e Finch (1987), Finch e Dobby (1990), Ross (1997), Dai *et. al.* (1999), sendo que nestes modelos são dependentes de uma variável de difícil mensuração, que é o tempo de indução, sendo definido por Dai *et. al.* (1999), como sendo o tempo para o filme líquido entre a partícula e a bolha se adelgaçar e romper e para a linha de contato das três fases se expandir até que um valor de equilíbrio seja obtido.

A maioria dos modelos acima assume que a colisão entre a partícula e a bolha ocorre igualmente sobre a secção da superfície da bolha entre os ângulos  $\theta = 0$  e  $\theta = \theta_t$ , onde o ângulo  $\theta$  é medido a partir do ponto de estagnação da bolha, e  $\theta_t$  é o ângulo máximo de colisão possível, como mostrado na Figura 5, (Dai *et. al.*, 1999).



**FIGURA 5** – Representação esquemática de uma partícula de tamanho  $d_p$ , deslizando em torno de uma bolha de tamanho  $d_b$  a partir de um ângulo de colisão ou ângulo de adesão,  $\theta_a$ , para um ângulo máximo de deslizamento de  $\pi/2$ .  $\theta_t$  é o ângulo máximo de colisão. (Dai *et. al.*, 1999).

O modelo de adesão proposto por Dobby e Finch (1987) e utilizado por Dai *et. al.* (1999), define a eficiência de adesão ( $E_a$ ) como sendo a taxa de área correspondente a um ângulo ( $\theta_a$ ), pela área correspondente a outro ângulo ( $\theta_t$ ). Sendo a equação expressa por

$$E_a = \frac{\sin^2 \theta_a}{\sin^2 \theta_t} \quad (7)$$

Onde  $\theta_a$ , é o ângulo de adesão, e  $\theta_t$ , pode ser obtido através da expressão:

$$\sin^2 \theta_t = 2\beta \left[ (1 + \beta^2)^{1/2} - \beta \right] \quad (8)$$

Em que  $\beta$  é um número adimensional e pode ser obtido de duas formas, utilizando o número de Stokes ( $K$ ), ou o número de Reynolds da bolha ( $R_{eb}$ ), como se segue:

$$\beta = \frac{4d_p \rho_p}{3K d_b (\rho_p - \rho_f)} \quad (9a)$$

ou ainda

$$\beta = \frac{12d_b \rho_f}{d_p (\rho_p - \rho_f) R_{eb}} \quad (9b)$$

Sendo, para as duas equações,  $d_p$  e  $d_b$ , os diâmetros da partícula e da bolha, e  $\rho_f$  e  $\rho_p$ , as densidades do fluido e da partícula, respectivamente;  $K$ , o número de Stokes, sendo  $K = \rho_p v_b d_p^2 / 9\eta d_b$ ; e ainda  $R_{eb}$ , o número de Reynolds da bolha, sendo que  $R_{eb} = v_b d_b \rho_f / \eta$  (sendo  $v_b$ , a velocidade de ascensão da bolha e  $\eta$  a viscosidade dinâmica do fluido).

Uma expressão para a estimativa de  $\theta_a$ , pode ser obtida, utilizando a expressão do tempo de deslizamento, onde o ângulo de adesão é o ângulo de colisão e o tempo de deslizamento é igual ao tempo de indução. Sendo essa expressão como se segue:

$$\theta_a = 2 \arctan \exp \left[ -t_{ind} \frac{2(v_p - v_b) + v_b \left( \frac{d_b}{d_p + d_b} \right)^3}{d_p + d_b} \right] \quad (10)$$

Em que  $d_p$  e  $d_b$  são os diâmetros da partícula e da bolha e  $v_p$  e  $v_b$ , são as velocidades da partícula e da bolha, respectivamente; e  $t_{ind}$  pode ser obtido da expressão empírica:

$$t_{ind} = A d_p^B \quad (11)$$

Onde os valores  $A$  variam entre 0,06 e 0,22; e  $B$  tem um valor de 0,6; sendo que estes valores são válidos para um regime de fluxo laminar e para partículas menores que 100 $\mu$ m.

Dai *et. al.* (1999), verificaram que há uma interdependência do parâmetro  $A$  com o ângulo de contato das partículas; ou, aumentando-se o ângulo de contato das partículas o parâmetro  $A$  diminui. Este fato revela que o tempo de indução é dependente da hidrofobicidade da superfície da partícula.

### 3.6.2 – Probabilidade de Coleta (Yoon, 1991, 1993)

Um outro parâmetro hidrodinâmico importante a ser observado no processo de interação partícula-bolha é a probabilidade de flotação, a qual é definida por Yoon (1991,1993), como sendo a probabilidade ( $P$ ) de uma partícula inicialmente coletada por uma bolha de ar na fase de polpa da célula de flotação pode ser dada por:

$$P = P_c \cdot P_a (1 - P_d) \quad (12)$$

Onde  $P_c$  é a probabilidade de colisão partícula-bolha,  $P_a$  é probabilidade de adesão, e  $P_d$  é a probabilidade de desligamento. Para partículas finas,  $P_d$  pode ser infinitamente pequeno devido ao baixo coeficiente de inércia. Então a equação acima fica:

$$P = P_c \cdot P_a \quad (13)$$

O autor afirma que a probabilidade de colisão ( $P_c$ ) é determinada pela hidrodinâmica do sistema, que é fortemente afetada pelo tamanho da partícula, tamanho da bolha e a turbulência do sistema. E a probabilidade de adesão ( $P_a$ ), é

também afetada pela hidrodinâmica, porém é principalmente uma função da química da superfície envolvida.

### 3.6.2.1 – Probabilidade de Colisão

A probabilidade de colisão, como afirmado anteriormente, é dependente da hidrodinâmica do sistema. Assim sendo, Yoon (1991,1993) apresentam as equações de probabilidade de colisão segundo as seguintes condições de fluxos: fluxo potencial (usada para bolhas muito maiores do que aquelas utilizadas na flotação); fluxo de Stokes (aplicado apenas a bolhas muito pequenas); fluxo intermediário (para baixos números de Reynolds); e fluxo intermediário (para números de Reynolds intermediários). Essas equações foram reunidas na seguinte equação geral:

$$P_c = A \left( \frac{D_p}{D_b} \right)^n \quad (14)$$

Em que  $D_p$  é o diâmetro da partícula e  $D_b$  é o diâmetro da bolha, e para cada condição de fluxo os parâmetros  $A$  e  $n$  estão dispostos segundo a Tabela 1, como se segue:

**TABELA 1**

Valores dos parâmetros  $A$  e  $n$  para a equação geral para a probabilidade de colisão.

Condições de Fluxo	Parâmetro	
	$A$	$n$
Stokes	$\frac{2}{3}$	2
Intermediário (Re intermediários)	$\frac{3}{2} + \frac{4Re^{0,72}}{15}$	2
Intermediário (Re baixos)	$\frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{(3/16)Re}{1 + 0,24Re^{0,56}} \right]$	2
Potencial	3	1

Fonte: Yoon (1991, 1993).

Yoon (1991,1993), ainda afirma que todas as expressões apresentadas na tabela acima são baseadas no modelo de colisão interseccional, que podem ser utilizadas para flotação em condições relativamente inertes (altas relações altura/diâmetro, presença de *baffles* ou divisões).

O autor ainda apresenta a função de fluxo que é aplicável ao tamanho das bolhas na flotação como se segue:

$$\psi = u_b^2 R_b \sin^2 \theta \left[ \frac{1}{2} x^2 - \frac{3}{4} x + \frac{1}{4x} + \frac{\text{Re}^{0,72}}{15} \left( \left( \frac{1}{x} \right)^2 - \frac{1}{x} + x - 1 \right) \right] \quad (15)$$

Em que  $\psi$  é a função de fluxo adimensional,  $\theta$  e  $x$  são as coordenadas angular e radial adimensional, respectivamente;  $R_b$  é raio da bolha e  $u_b$  é a velocidade ascendente da bolha. Esta equação foi utilizada para encontrar a expressão de  $P_c$  para as condições de fluxo intermediário com números de Reynolds intermediários.

### 3.6.2.2 – Probabilidade de Adesão

Com acessibilidade às funções de fluxo pode também ser possível a previsão de  $P_a$ , segundo Yoon (1991,1993). Usando a função de fluxo dada pela equação (15) é possível determinar o tempo de deslizamento das partículas nas superfícies das bolhas. A adesão de bolha-partícula irá ocorrer quando o tempo de deslizamento é maior do que o tempo de indução, que é definido como sendo o tempo mínimo para adelgaçar e romper o filme entre a partícula e a bolha. Usando este critério, o autor encontrou uma expressão para a probabilidade de adesão como se segue:

$$P_a = \sin^2 \left[ 2 \cdot \arctan \exp \left( \frac{-(45 + 8 \text{Re}^{0,72} u_b t_i)}{15 D_b (D_b / D_p + 1)} \right) \right] \quad (16)$$

em que  $t_i$  é o tempo de indução e  $u_b$  é a velocidade de subida da bolha. O autor afirma que esta expressão é aplicável para números de Reynolds intermediários. O tempo de indução é fortemente uma função da hidrofobicidade da partícula e pode ser facilmente medido por um equipamento relativamente simples. Uma vez que os tempos de indução podem ser medidos com amostras pulverizadas, torna-se possível e mais conveniente avaliar-se a hidrofobicidade por este método do que os ângulos de contato nos estudos de flotação.

Como se pode perceber a  $P_a$  é função dos tamanhos de bolha e partícula. Então, o autor afirma que pode ser mostrado que a probabilidade de adesão aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, e também com a diminuição do tamanho das bolhas até que as bolhas se tornam muito pequenas.

### 3.6.2.3 – Velocidade (Taxa) de Flotação

Uma vez conhecida a probabilidade de flotação,  $P$ , para o microprocesso Yoon (1991,1993), propõe que uma constante de velocidade de primeira ordem,  $k$ , pode ser obtida utilizando-se a seguinte relação:

$$k = \left( \frac{3P}{2D_b} \right) J_g \quad (17)$$

Onde  $J_g$  é a velocidade superficial de gás, que é a velocidade de fluxo volumétrica de gás dividida pela área da seção transversal da célula. O autor afirma que como a probabilidade de coleta ( $P_c$ ) varia com o quadrado do diâmetro da partícula ( $D_p^2$ ) para os tamanhos de bolhas comumente utilizados na flotação,  $k$  também irá variar com  $D_p^2$  a dados  $P_a$  e  $V_g$ , o que explica a dificuldade de recuperação de partículas finas. E ainda que, este problema pode ser corrigido com aumento na velocidade superficial de gás, e que, portanto, a velocidade de flotação pode ser otimizada a partir da relação linear com a velocidade superficial de gás.

O autor ainda propõe a utilização de bolhas da ordem de 100 $\mu$ m ou menores, a fim de solucionar o problema de recuperação de partículas finas, uma vez que para bolhas deste diâmetro, a probabilidade de colisão varia com o inverso do quadrado do diâmetro das partículas, fazendo com que a velocidade de flotação varie com o inverso do cubo do diâmetro da bolha favorecendo a utilização de bolhas menores. Porém, com o aumento do diâmetro de bolha, a probabilidade de colisão torna-se menos dependente deste parâmetro.

### 3.6.3 – Flotação Colunar com *Bias* Negativo

A versatilidade das colunas quando comparada com as células mecânicas é indiscutível. Na maioria das vezes a flotação em coluna é utilizada para etapas de limpeza (*cleaner*), porém alguns autores discutem a possibilidade da utilização deste método para as etapas de concentração de partículas mais grosseiras (de 1 a 4 mm), tais como a de desbaste (*rougher*) e a de recuperação (*scavenger*), podendo substituir as células mecânicas por apresentarem melhores resultados como é mostrado por Soto (1989). Em alguns casos, dependendo da distribuição de tamanho das partículas na alimentação, o teor do concentrado final pode ser produzido sem a necessidade de uma etapa de limpeza (Soto, 1989).

Como discutido anteriormente é possível a utilização das colunas para flotação de partículas minerais consideradas grosseiras, onde a flotação é efetuada com um

bias negativo o que favorece o arraste hidráulico de partículas grosseiras. Alguns trabalhos foram publicados a este respeito, como Soto (1989); Soto & Barbery (1991) e Öteyaka & Soto (1995). Entretanto, algumas considerações devem ser efetuadas no que diz respeito à interação partícula-bolha.

Assim como para a flotação colunar com *bias* positivo, a este método também é possível obter a estimativa da probabilidade de flotação ( $P_F$ ) que segundo o modelo desenvolvido por Öteyaka & Soto (1995), pode ser descrita como sendo:

$$P_F = P_i \cdot P_c \cdot P_s \cdot P_{tb} \quad (18)$$

Em que  $P_i$  é a probabilidade de intercessão,  $P_c$  é a probabilidade de colisão,  $P_s$  é a probabilidade de estabilidade do agregado partícula-bolha e  $P_{tb}$  é a probabilidade da bolha não estar recoberta por partículas, ou a probabilidade de superfície livre de bolha. Os autores definem equações para a estimativa de cada uma dessas probabilidades, sendo que  $P_i$  é dependente do *hold up* de gás;  $P_c$  é dependente dos diâmetros da bolha e da partícula;  $P_s$  é dependente do diâmetro da bolha e do diâmetro máximo de partícula que permite um agregado partícula-bolha e que pode ser calculado por interação utilizando as equações de força atrativa e repulsiva;  $P_{tb}$  é adotada como sendo igual a 1,0, uma vez que, na maioria dos casos, não mais que 50% da sua superfície é coberta por partículas.

De posse do valor de  $P_F$ , segundo os autores, é possível fazer estimativas para a recuperação total da coluna, para esse caso, que pode ser descrita como sendo:

$$Recuperação = 1 - (1 - P_F)^n \quad (19)$$

Em que  $n$  é o número de elementos  $\Delta H$  que pode ser dividida a zona de coleta sendo  $n = L / \Delta H$  (onde  $L$  é o comprimento total da zona de coleta) e  $\Delta H$  definido como sendo dependente do diâmetro de bolha e do *hold up* de gás. Para maiores informações sobre as equações acima citadas veja-se em Öteyaka & Soto (1995) (uma vez que o objetivo deste trabalho não é a flotação colunar com *bias* negativo, e este assunto só foi incorporado a título de citação da ampla aplicabilidade das colunas de flotação).

A aplicabilidade deste tipo de flotação colunar é dada minerais nos quais a liberação das partículas não necessita de várias etapas de moagem, como é o caso dos minerais não-metálicos, carvão, certos minérios de ferro e de sulfetos metálicos.

### 3.7 – Considerações Importantes

Fica claro que a velocidade de sedimentação das partículas minerais é dependente do tamanho das mesmas, pois quanto maior o diâmetro das partículas maior a sua velocidade de sedimentação, e então o seu fluxo de massa será menor. Com isso, as partículas de maior diâmetro ficarão um tempo menor em contato com as bolhas de gás, o que se espera uma redução na probabilidade de adesão de tais partículas.

Uma situação virtual seria executar a flotação com todas as partículas com o mesmo diâmetro, o que na verdade é impossível, uma vez que as etapas preparatórias para a flotação fornecem partículas compreendidas em faixas granulométricas variadas. Porém, este efeito pode ser minimizado com a separação do processo por etapas em função da granulometria, se este procedimento se mostrar técnica e economicamente viável.

Vale lembrar que nos modelos de interação partícula-bolha, foi considerado que as partículas sejam esféricas, o que na verdade não é naturalmente possível. Esta consideração foi feita com o intuito de facilitar os cálculos. Ao se trabalhar com partículas de forma diferente da esférica, adota-se o diâmetro de uma esfera relativo ao tamanho da partícula em questão. Como são manuseadas partículas com uma distribuição de tamanho, adota-se como o diâmetro médio o  $d_{80}$ , ou seja, o diâmetro em que 80% do material está abaixo desse diâmetro, como o diâmetro da partícula.

Nos trabalhos de Dobby e Finch (1987) e Finch e Dobby (1990), são apresentados a dependência da eficiência de coleta em função do diâmetro de partícula, para vários tempos de indução, bem como diâmetros de bolha, densidades de partículas, viscosidade do líquido e *hold up* de gás, e os autores constataram que para todos os parâmetros a eficiência de coleta aumenta até atingir um valor máximo e então volta a diminuir. Este fato mostra que existe uma faixa de granulometria onde a coleta das partículas hidrofóbicas será mais pronunciada e que, então, há uma faixa de granulometria onde há uma maior recuperação. Porém, esta faixa de granulometria torna-se diferente à medida que há uma variação nos valores de cada um dos parâmetros acima citados.

Muitos trabalhos foram executados mostrando a interferência do diâmetro das partículas na flotação e sua interação com outros fatores. Dentre os trabalhos acima citados destacam-se os efetuados por Dobby e Finch (1985), onde os autores destacam que a dispersão de sólidos e de líquido é fundamental para se conhecer o fluxo de massa de tais elementos no processo de flotação. Outros trabalhos que

merecem atenção são os executados por Ata *et. al.* (2002); Feng and Adrich (1999); Ityokumbul (1992, 1993, 1995); Li *et. al.* (1993); Martins (1998); Martins *et. al.* (2002); Nguyen e Evans (2002); Phan *et. al.* (2003); Tao *et. al.* (2000); e Tuteja *et. al.* (1995), onde são feitas considerações sobre o tamanho das partículas minerais envolvidas na flotação, bem como o processo de coleta das partículas hidrofóbicas presentes no processo.

A coluna de flotação vem sofrendo grandes avanços no que diz respeito ao conhecimento dos processos físico-químicos que ocorrem na interação entre as partículas e as bolhas, o que propicia um melhor conhecimento de tais processos e da obtenção de um produto com uma qualidade que atenda as necessidades do mercado consumidor.

## 4 – MATERIAL E MÉTODOS

---

### 4.1 – Generalidades

No presente trabalho foram executados ensaios de flotação (em batelada), em coluna e convencional, em escala laboratorial de um minério de ferro com percentagens de sílica definidas e verificou-se o efeito da granulometria das partículas de sílica na flotação reversa de minério de ferro, no que diz respeito à recuperação de ferro e à recuperação de sílica. Para isso utilizou-se um concentrado com teor de 68,01% de ferro contendo 0,94% de sílica que foi contaminado com sílica com dois níveis de percentagem 20 e 30%, resultando em dois minérios com diferentes percentagens de sílica.

Nos experimentos de flotação apresentados, utilizou-se um minério composto pelo concentrado fornecido pela SAMARCO Mineração S.A. e como material contaminante das amostras, utilizou-se de quartzito (sílica) fornecido pela Omega Mineração S.A.

### 4.2 – Preparação das Amostras

#### 4.2.1 – Preparação das Amostras de Sílica

O quartzito fornecido pela Omega Mineração S.A., aproximadamente 300kg de amostra, por apresentar uma granulometria inconveniente para os ensaios de flotação, foi todo britado em um britador de rolos, do laboratório do DEMIN, em seguida foi todo moído a úmido em dois estágios em moinhos da planta piloto do Centro de Treinamento e Transferência de Tecnologia da Fundação Gorceix (sendo o primeiro um moinho de barras e o segundo em um moinho de bolas), e então secado em estufa.

Após a secagem o material foi todo homogeneizado em uma pilha longitudinal e então quarteado até a obtenção de uma amostra (representativa do total) compatível com a capacidade das peneiras utilizadas em laboratório (cerca de 100 g), e foi efetuada uma análise granulométrica deste material. Construiu-se a curva de distribuição granulométrica deste material (Figura 25 – Anexo I) e verificou-se então, que o  $d_{50}$  foi em torno de  $85\mu\text{m}$ , adotou-se então a peneira de  $75\mu\text{m}$  (200 malhas Tyler), uma vez que o laboratório não possui peneiras com a abertura encontrada. Todo o material passou ainda por um processo de deslamagem, efetuada por sifonação em uma polpa com 5% de sólidos, sendo eliminadas as partículas menores

do que  $5\mu\text{m}$  ( $d_p$ ), que provavelmente prejudicariam os ensaios de flotação, seguindo a lei de Stokes para a velocidade terminal da partícula ( $v$ ):  $v = \frac{d_p^2 \cdot g(\rho_s - \rho_f)}{18\eta}$ .

O quartzito foi dividido em três partes com massas iguais e armazenado em sacos apropriados. Na primeira, o material apresenta-se todo abaixo da granulometria de  $75\mu\text{m}$ . Na segunda, o material encontra-se em uma distribuição granulométrica global, ou seja, apresenta as duas faixas de granulometria. E, na terceira, o material encontra-se todo acima da granulometria de  $75\mu\text{m}$ . Estes níveis de granulometria foram utilizados na preparação dos minérios utilizados nos ensaios de flotação.

#### **4.2.2 – Preparação das Amostras de Concentrado**

O concentrado originário da SAMARCO Mineração S.A., foi todo homogeneizado em pilha longitudinal. A partir deste ponto, foi preparada uma polpa com pH em torno de 10, com o material e então retirada toda a água. Em seguida repetiu-se o mesmo procedimento, porém com pH em torno de quatro. Este processo foi repetido duas vezes para cada um dos níveis de pH de modo intercalado, a fim de se retirar os vestígios de reagentes que provavelmente se encontrariam no material, uma vez que o mesmo passou por um processo de flotação.

#### **4.2.3 – Preparação das Amostras de Minério**

De posse das amostras de quartzito e de concentrado preparadas, iniciou-se a obtenção das amostras de minério a serem utilizados nos ensaios de flotação.

Para os ensaios de flotação em bancada utilizaram-se as massas de minério a seguir:

a) Para os ensaios com 40% de sólidos em polpa, utilizou-se 1558g do minério, sendo que: dessa massa, 312g correspondem ao quartzito adicionado e o restante corresponde ao concentrado formando um minério com 20% de sílica; e 467g correspondem ao quartzito e o restante corresponde ao concentrado formando adicionado um outro minério com 30% de sílica, para os ensaios com 40% de sólidos em polpa.

b) Para os ensaios com 50% de sólidos em polpa, utilizou-se 2160g do minério, sendo que: dessa massa, 432g correspondem ao quartzito adicionado e o restante corresponde ao concentrado formando um minério com 20% de sílica; e 648g correspondem ao quartzito adicionado e o restante corresponde ao concentrado formando um outro minério com 30% de sílica.

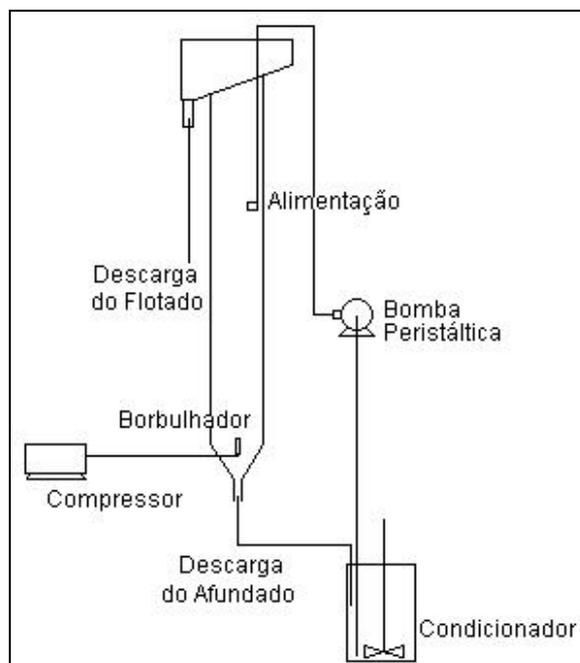
Já para os ensaios de flotação em coluna (para as polpas correspondentes a 40% de sólidos) as massas de minério utilizadas foram: a) 3117g sendo que 623,40g correspondem ao quartzito adicionado formando um minério com 20% de sílica; e b) 3086g sendo que 925,80g correspondem ao quartzito adicionado formando um minério com 30% de sílica.

As amostras resultantes foram homogeneizadas em pilha cônica, acondicionadas em sacos plásticos e etiquetadas referentes a cada um dos ensaios. Este procedimento foi repetido para cada uma das distribuições granulométricas da sílica que foi utilizada como contaminante nos ensaios.

#### 4.3 – Equipamentos e Reagentes Utilizados

Foi utilizada nos experimentos de flotação convencional em batelada, uma célula do tipo Denver do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN, que tem um volume total de 4,0 litros e volume real de 2,7 litros.

Foi utilizada nos experimentos de flotação em coluna em batelada, uma célula confeccionada no Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN, com um volume de 5,40 litros, altura de aproximadamente 1,70 m, diâmetro interno de 50 mm, o borbulhador estava situado a aproximadamente 40,0 cm da base e que não possuía água de lavagem (Figura 6).



**FIGURA 6** – Representação esquemática da coluna do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN utilizada nos experimentos de flotação.

Utilizou-se como depressor do mineral de ferro, o amido gelatinizado com soda cáustica, em uma solução a 1% p/v. Como coletor da sílica utilizou-se uma mistura de monoamina com diamina contendo 16,59% de diamina e 83,41% de monoamina em solução diluída a 1% v/v. Como controladores de pH, utilizou-se uma solução de soda cáustica (NaOH), bem como uma solução de ácido clorídrico (HCl), diluídas a 5% v/v.

#### **4.4 – Ensaios de Flotação**

Efetuaram-se ensaios de flotação em batelada (seguindo um planejamento fatorial), sendo que 24 ensaios foram de flotação convencional e 12 ensaios de flotação em coluna totalizando 36 ensaios. Os parâmetros que sofreram variação em cada um dos ensaios foram a granulometria da sílica (três faixas granulométricas, menor do que 75  $\mu\text{m}$ , global ou distribuição ampla e, maior do que 75 $\mu\text{m}$ ); a percentagem de sólidos na alimentação (40 e 50% para os ensaios de flotação em bancada e 40% para os ensaios de flotação em coluna); a dosagem de coletor (50 e 70 g/t) e percentagem de sílica (20% e 30%).

Utilizaram-se nos ensaios os seguintes reagentes, a amina como coletor de sílica e espumante, o amido como depressor do mineral de ferro e, a soda cáustica e o ácido clorídrico como controladores de pH, como descrito anteriormente.

As análises das amostras dos produtos dos referidos ensaios de flotação foram executadas pelo Laboratório de Controle de Processo da SAMARCO Mineração S.A.

##### **4.4.1 – Ensaios de Flotação Convencional**

Os ensaios de flotação convencional foram efetuados em uma célula com um volume de 2,7 litros e com um rotor a uma velocidade constante de 1500 rpm. Foram executados 24 ensaios de flotação em bancada, mantendo-se um dos parâmetros de variação em um dos níveis e variando os outros três parâmetros, o que resultou no montante de ensaios descrito anteriormente.

Com as amostras de minério devidamente preparadas para cada um dos ensaios, foi calculado o volume de água a ser adicionado na célula, a fim de se obter uma polpa com a percentagem de sólidos pretendida para os ensaios referidos.

Os ensaios de flotação convencional foram conduzidos seguindo a seguinte ordem esquemática:

- Mediu-se o volume de água, a um pH no nível 10, em uma proveta de 1000ml, a ser adicionado na célula para o referido teste;
- Mediram-se as quantidades de amina e de amido (gelatinizado com NaOH) previamente preparados, a serem adicionadas na polpa;

Mantendo-se fechada a injeção de ar na célula.

- Colocou-se a amostra de minério referente ao teste na célula e adicionou-se a água previamente medida e deixou-se acondicionar por um minuto;

- Adicionou-se a quantidade referente da solução de amido e deixou-se em condicionamento por volta de cinco minutos e mediu-se o pH. Caso este não estivesse no nível 10, adicionou-se HCl ou NaOH para controlar o pH ao nível proposto.

- Adicionou-se a quantidade referente da solução de amina e deixou-se condicionar por volta de três minutos.

Concluído o tempo de condicionamento da amina, abriu-se a injeção de ar na célula, iniciou-se o processo de flotação recolhendo-se o flotado em um tabuleiro devidamente etiquetado.

Os valores dos parâmetros de variação referentes a cada um dos ensaios estão dispostos conforme a Tabela 2 a seguir.

**TABELA 2**

Itens de variação para os ensaios de flotação em bancada.

Teste	Gran. Qtzo	% Sol. Alim.	Coletor (g/t)	%Qtzo. Alim.	Hemat. (g)	Qtzo(g)	M.min (g)	V.água (ml)
1	<200#	40	50	20	1246	312	1558	2340
2	<200#	40	50	30	1091	467	1558	2340
3	<200#	40	70	20	1246	312	1558	2340
4	<200#	40	70	30	1091	467	1558	2340
5	<200#	50	50	20	1728	432	2160	2160
6	<200#	50	50	30	1512	648	2160	2160
7	<200#	50	70	20	1728	432	2160	2160
8	<200#	50	70	30	1512	648	2160	2160
9	Global	40	50	20	1246	312	1558	2340
10	Global	40	50	30	1091	467	1558	2340
11	Global	40	70	20	1246	312	1558	2340
12	Global	40	70	30	1091	467	1558	2340
13	Global	50	50	20	1728	432	2160	2160
14	Global	50	50	30	1512	648	2160	2160
15	Global	50	70	20	1728	432	2160	2160
16	Global	50	70	30	1512	648	2160	2160
17	>200#	40	50	20	1246	312	1558	2340
18	>200#	40	50	30	1091	467	1558	2340
19	>200#	40	70	20	1246	312	1558	2340
20	>200#	40	70	30	1091	467	1558	2340
21	>200#	50	50	20	1728	432	2160	2160
22	>200#	50	50	30	1512	648	2160	2160
23	>200#	50	70	20	1728	432	2160	2160
24	>200#	50	70	30	1512	648	2160	2160

Na Tabela 2, as colunas representam respectivamente, o número do teste, a granulometria da sílica (sendo as malhas da serie Tyler e a faixa correspondente a 200 malhas Tyler igual a 75 $\mu$ m), a percentagem de sólidos na alimentação, a dosagem de coletor, a percentagem de sílica, a massa de hematita, a massa de sílica, a massa de minério e o volume de água referente a cada um dos ensaios executados.

Terminados os ensaios de flotação os produtos, afundado e flotado, foram filtrados em filtro a vácuo, secados em estufa, medidas as suas massas, devidamente ensacados e arquivados.

As amostras-cabeça dos produtos dos ensaios de flotação foram quarteadas, homogeneizadas e divididas em amostras menores, sendo que estas amostras foram separadas e enviadas para análise química. As amostras-cabeça foram novamente ensacadas e então arquivadas.

#### **4.4.2 – Ensaios de Flotação em Coluna**

Os ensaios de flotação em coluna foram executados na coluna confeccionada no Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN, com um volume de 5,40 litros, altura de aproximadamente 1,70 m, diâmetro interno de 50,0 mm, o borbulhador estava situado a aproximadamente 40 cm da base e não possuía água de lavagem.

Foram mantidos constantes os seguintes parâmetros: a altura da camada de espuma (20 cm a partir do topo) e a altura de injeção de alimentação (30 cm a partir do topo).

Os ensaios de flotação em coluna foram conduzidos na seguinte ordem esquemática:

- Mediu-se o volume de água, a um pH no nível 10, em uma proveta de 2000ml, a ser adicionado na célula para o referido teste;

- Mediram-se as quantidades de amina e de amido (gelatinizado com NaOH) previamente preparados, a serem adicionadas na polpa;

Mantendo-se fechada a injeção de ar na célula.

- Colocou-se a amostra de minério referente ao teste no condicionador e adicionou-se a água previamente medida e deixou-se condicionar por um minuto;

- Adicionou-se a quantidade referente da solução de amido e deixou-se em condicionamento por volta de cinco minutos e mediu-se o pH. Caso este não estivesse no nível 10, adicionou-se HCl ou NaOH para controlar o pH ao nível proposto.

- Adicionou-se a quantidade referente da solução de amina e deixou-se condicionar por volta de três minutos.

Terminado o tempo de condicionamento da amina alimentou-se a coluna até o nível referente da altura da camada de espuma e controlou-se a vazão do afundado e da alimentação até que o nível de polpa se mantivesse constante no equipamento;

Abriu-se a injeção e ar de modo cuidadoso até que se iniciou o processo de flotação e coletou-se o flotado e o afundado em baldes, devidamente etiquetados ao referente ensaio.

Os valores dos parâmetros de variação referentes a cada um dos ensaios estão dispostos conforme a tabela 3 a seguir.

**TABELA 3**

Itens de variação para os ensaios de flotação em coluna.

<b>Teste</b>	<b>Gran. Qtzo</b>	<b>% Sol. Alim.</b>	<b>Coletor (g/t)</b>	<b>% Qtzo. Alim.</b>	<b>Hemat. (g)</b>	<b>Qtzo (g)</b>	<b>M.min (g)</b>	<b>V.água (ml)</b>
1	<200#	40	50	20	2493,60	623,40	3117	4676
2	<200#	40	50	30	2160,20	925,80	3086	4629
3	<200#	40	70	20	2493,60	623,40	3117	4676
4	<200#	40	70	30	2160,20	925,80	3086	4629
5	Global	40	50	20	2493,60	623,40	3117	4676
6	Global	40	50	30	2160,20	925,80	3086	4629
7	Global	40	70	20	2493,60	623,40	3117	4676
8	Global	40	70	30	2160,20	925,80	3086	4629
9	>200#	40	50	20	2493,60	623,40	3117	4676
10	>200#	40	50	30	2160,20	925,80	3086	4629
11	>200#	40	70	20	2493,60	623,40	3117	4676
12	>200#	40	70	30	2160,20	925,80	3086	4629

Na tabela 3, as colunas representam os mesmos parâmetros como na tabela 2.

Concluídos os ensaios de flotação os produtos, afundado e flotado, foram filtrados em filtro a vácuo, secados em estufa, medidas as suas massas, devidamente ensacados e arquivados.

As amostras-cabeça dos produtos dos ensaios de flotação foram quarteadas, homogeneizadas e divididas em amostras menores, sendo que estas amostras foram separadas e enviadas para análise química de ferro (por titulação em solução fundida) e sílica (por plasma). As amostras-cabeça foram novamente ensacadas e então arquivadas.

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 5.1 – Generalidades

A partir dos resultados obtidos nas análises das amostras dos produtos da flotação, foram calculados, por balanço metalúrgico utilizando a expressão descrita pela equação 20, os teores de ferro e de sílica presentes nos minérios da alimentação para cada um dos ensaios.

$$Aa = Cc + Tt \quad (20)$$

Onde:

A = A massa da alimentação;

a = O teor do mineral, na alimentação;

C = A massa do flotado (para os teores de sílica) ou a massa do afundado (para os teores de ferro);

c = O teor no flotado (para a sílica), ou o teor no afundado (para o ferro);

T = A massa do flotado (para os teores de ferro) ou a massa do afundado (para os teores de sílica);

t = O teor no flotado (para o ferro), ou o teor no afundado (para a sílica).

Fazendo uso da equação 21, foram calculadas as recuperações de ferro bem como as recuperações de sílica.

$$R = \frac{(c(a-t))}{(a(c-t))} \times 100 \quad (21)$$

Onde os parâmetros  $a$ ,  $c$  e  $t$ , são como definidos anteriormente.

Utilizando os dados das análises e os calculados, foram confeccionados gráficos nos quais as abscissas contêm as diferentes faixas granulométricas e as ordenadas contêm os valores das recuperações de sílica ou de ferro, dependendo do caso em questão.

## 5.2 – Gráficos de Recuperação x Granulometria

Neste item são apresentados os gráficos de recuperação metálica de ferro x granulometria e de recuperação de sílica x granulometria confeccionados a partir dos dados das condições gerais obtidos no item anterior, considerando-se cada um dos parâmetros que foram variados durante os ensaios, ou seja, segundo a granulometria da sílica contaminante (abaixo de 75 $\mu$ m, Global, e acima de 75 $\mu$ m), segundo a percentagem de sólidos na alimentação (40 e 50% para os ensaios de flotação convencional e 40% para os ensaios de flotação em coluna), segundo a dosagem de coletor (amina) utilizada (50 e 70g/t), e segundo a percentagem de sílica adicionada como contaminante do minério (20 e 30%).

Discutem-se as variações dos parâmetros estudados e o efeito de cada um deles nos diversos ensaios de flotação reversa de minério de ferro.

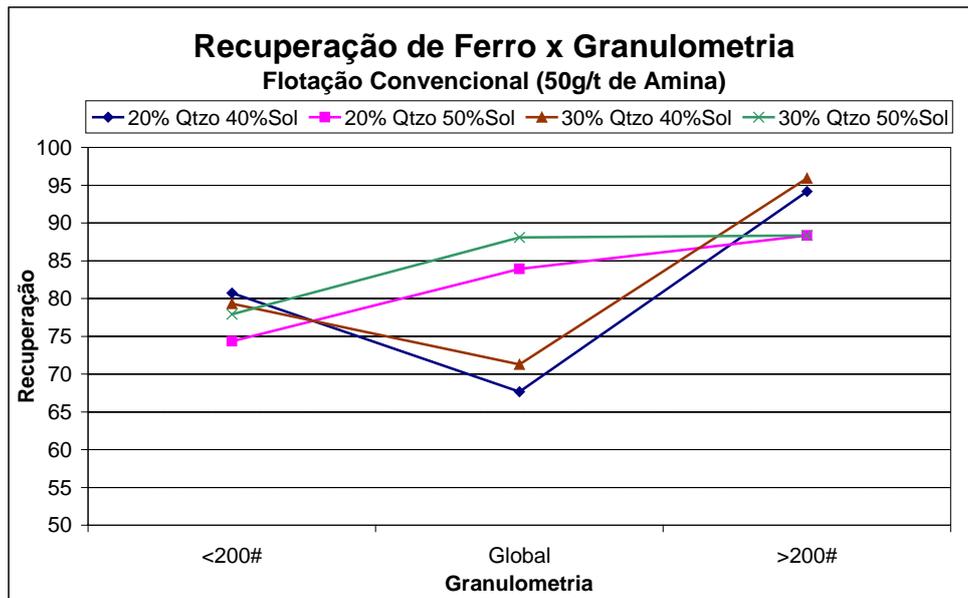
Nomeiam-se as faixas de granulometria de sílica contaminante utilizadas nos experimentos como sendo fina, grosseira e global as quais são referidas, respectivamente, aos tamanhos abaixo de 75 $\mu$ m; acima de 75 $\mu$ m e uma distribuição ampla contendo tanto partículas abaixo, como acima de 75 $\mu$ m.

Vale lembrar que os ensaios de flotação se tratam de uma etapa de desbaste (*rougher*), o que implica na obtenção de um mínimo de teor de sílica no afundado, ou seja, uma alta recuperação de sílica. Porém, devem-se também analisar as recuperações de ferro.

### 5.2.1 – Flotação Convencional.

Neste item são apresentados os gráficos de recuperação de ferro x granulometria, assim como os gráficos de recuperação de sílica x granulometria, para os ensaios executados na célula convencional. É importante observar que se trata da granulometria da sílica adicionado para a obtenção do minério e não da granulometria do minério.

A Figura 7 representa a recuperação de ferro x granulometria dos ensaios de flotação convencional onde se utilizou uma dosagem de amina de 50g/t, para as diferentes percentagens de sólidos em polpa e percentagens de sílica adicionado. E a Figura 8 representa as mesmas condições para uma dosagem de amina de 70g/t.

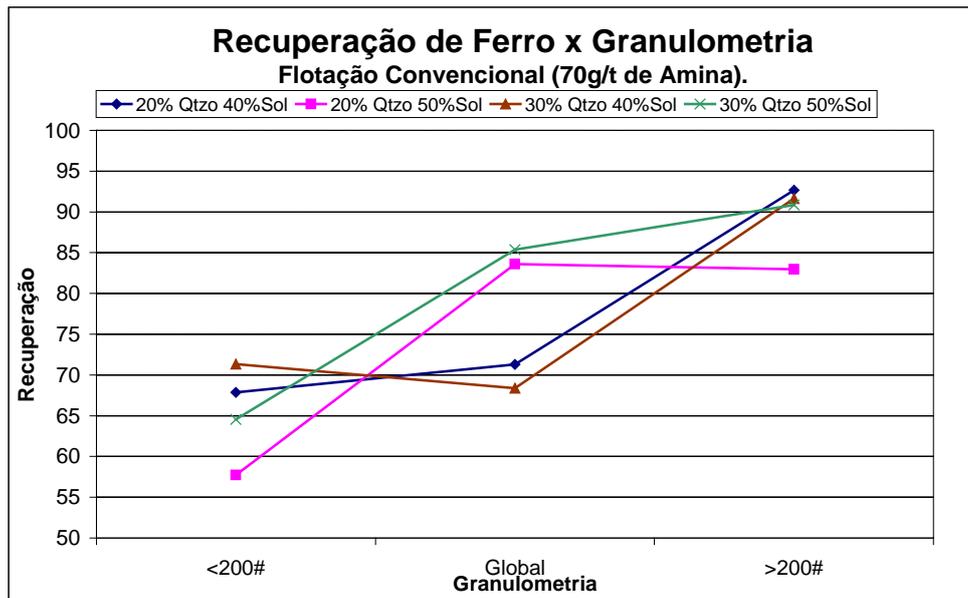


**FIGURA 7** – Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação convencional com 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa.

No gráfico representado pela Figura 7 pode-se salientar que as recuperações de ferro apresentaram os maiores valores para os ensaios executados com a granulometria grosseira, sendo que:

- Nos ensaios onde se utilizou uma percentagem de sólidos em polpa de 50%, com um teor de sílica contaminante de 20 e 30%, houve uma tendência de aumento nas recuperações de ferro para a faixa de granulometria grosseira.
- Nos ensaios onde se utilizou uma percentagem de sólidos em polpa de 40%, com um teor de sílica contaminante de 20 e 30%, as recuperações mínimas foram constatadas para a granulometria global.

Provavelmente as curvas dos ensaios com as mesmas percentagens de sólidos apresentam comportamento semelhante, devido a reologia e à viscosidade da polpa, as quais são dependentes da percentagem de sólidos.



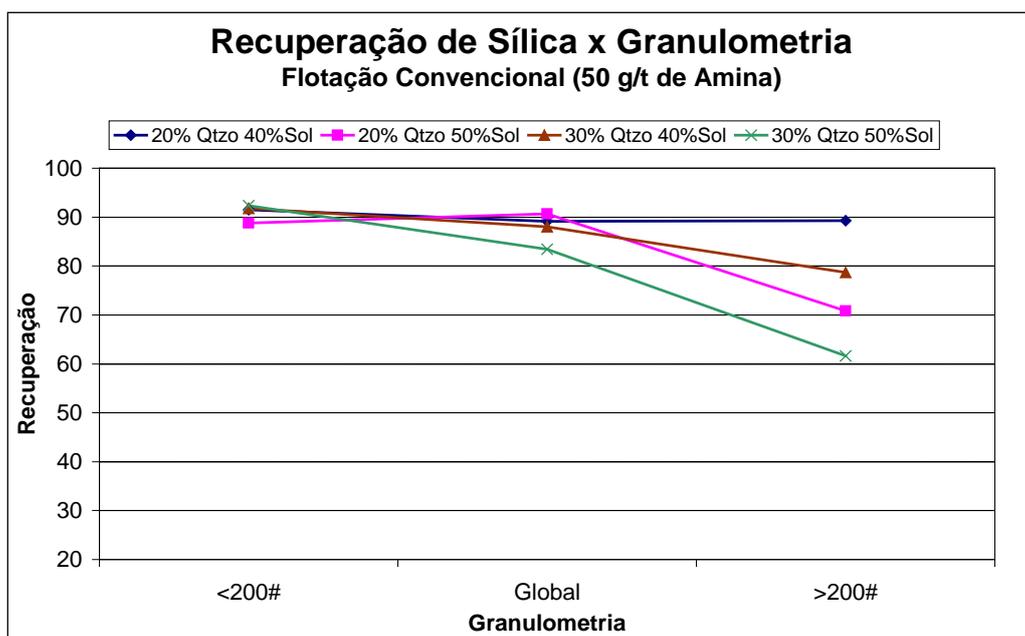
**FIGURA 8** - Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação convencional com 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa.

No gráfico representado pela Figura 8, observa-se que as recuperações de ferro apresentaram os maiores valores para os ensaios executados com a faixa de granulometria grosseira, exceto no caso onde se utilizou 20% de sílica e 50% de sólidos em polpa, onde a recuperação da grosseira teve uma leve queda em relação à global.

Pode-se dizer que:

- Nos ensaios onde se utilizou uma percentagem de sólidos de 50%, com um teor de sílica contaminante de 20 e 30%, houve uma tendência de aumento nas recuperações de ferro para a faixa de granulometria grosseira.
- Nos ensaios onde se utilizou uma percentagem de sólidos de 40%, com um teor de sílica contaminante de 20 e 30%, as recuperações mínimas foram constatadas para a granulometria global.

A Figura 9 representa a recuperação de sílica x granulometria dos ensaios de flotação convencional onde se utilizou uma dosagem de amina de 50g/t, para as diferentes percentagens de sólidos em polpa e percentagens de sílica adicionada. E a Figura 10 representa as mesmas condições para uma dosagem de amina de 70g/t.



**FIGURA 9** - Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação convencional com 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa.

O gráfico representado pela Figura 9 mostra que o valor das recuperações nos ensaios onde se utilizou a faixa de granulometria fina de sílica contaminante, a variação na recuperação de sílica é menos pronunciada (sendo o menor valor, 88,79% e o maior 92,33%) independentemente da variação dos parâmetros estudados. Já para o caso da faixa de granulometria grossa, a variação das recuperações de sílica é mais pronunciada (menor: 61,64% e maior: 89,25%). E para o caso da faixa de granulometria global, constata-se que a variação não é tão pronunciada como no segundo caso e nem mesmo pequena como no primeiro, o que é compreensível, uma vez que a faixa de granulometria global é composta por partículas pertencentes aos dois outros casos.

Há uma tendência de queda na recuperação de sílica para os ensaios onde se utilizou uma fração grossa de sílica contaminante para todos os casos, sendo esta tendência mais acentuada para os casos onde se utilizou uma polpa com 50% de sólidos. Pode-se dizer que, para partículas grosseiras, ao se utilizarem polpas com 50% de sólidos obtém-se uma menor recuperação de sílica, quando comparadas com as polpas com 40% de sólidos. Provavelmente esta diminuição se deve ao descolamento (ou desligamento) das partículas hidrofóbicas das bolhas de ar provocado por uma turbulência do sistema ocasionada pela agitação mecânica, como discutido por Öteyaka e Soto (1994). Pode-se afirmar também que as partículas

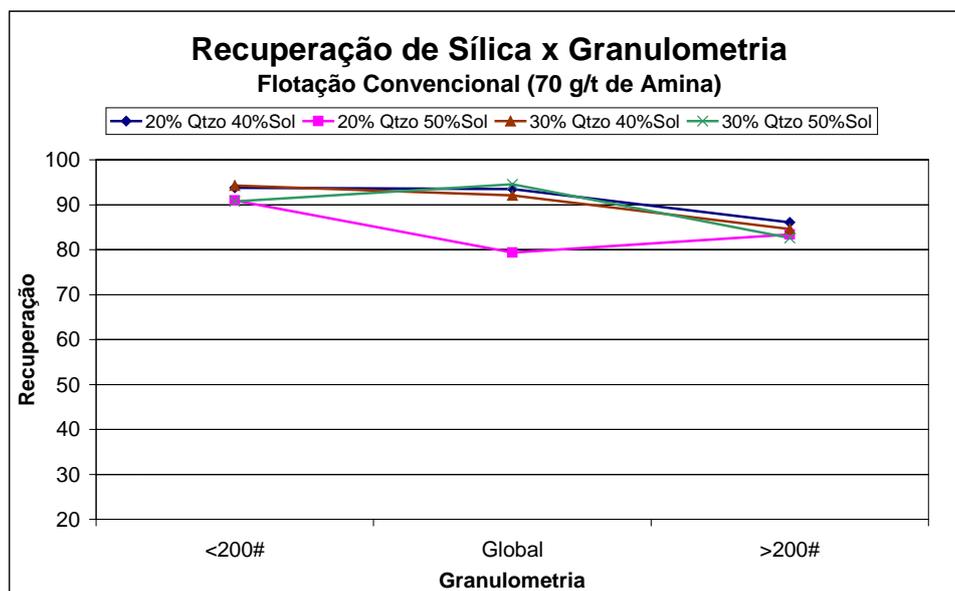
grosseiras apresentam uma maior probabilidade de se desligarem das bolhas de ar, uma vez que a força centrífuga que age sobre elas é maior, pois elas têm maior massa do que as partículas finas. Assim sendo, essa força centrífuga se sobrepõe às forças de atração do coletor entre essas partículas e as bolhas de ar fazendo com que o agregado partícula/ bolha perca a estabilidade, reduzindo então a recuperação. Este comportamento é evidenciado por Nguyen (2003), onde o autor afirma que o diâmetro máximo de partículas flotáveis é dependente da aceleração centrífuga de fluxos turbulentos.

Trabalhos recentes também discutem a dependência do tamanho das partículas na flotação, como em Soto e Barbery (1991), que afirmam que “a probabilidade de adesão das partículas é determinada pela hidrofobicidade da superfície e pelo tempo de indução. A hidrofobicidade não deve ser afetada apenas pelo tamanho da partícula, mas também pela densidade de adsorção do coletor”. É importante considerar a área superficial que é menor para as partículas de maiores diâmetros do que para as de menor tamanho.

Um outro fator que pode ser notado também é que na granulometria grosseira, para percentagens de sólidos em polpa diferentes e percentagens de sílica iguais, os ensaios onde se utilizaram as menores percentagens de sólidos apresentaram resultados de recuperação de sílica maiores em comparação aos ensaios onde se utilizaram as maiores percentagens de sólidos. Provavelmente esse fato pode estar relacionado à concorrência das partículas minerais de ferro com as partículas de sílica de serem aderidas (ou arrastadas) pelas bolhas de ar. Isto pode ser comprovado no gráfico representado pela Figura 17, onde os teores de ferro no flotado, para os casos com maiores percentagens de sólidos em polpa, são superiores aos teores de ferro no flotado para as menores percentagens de sólidos em polpa. Isto faz com que a área da bolha disponível para a coleta das partículas hidrofóbicas (sílica) seja reduzida, diminuindo a probabilidade de coleta dessas partículas. Alguns autores destacam que a taxa de flotação, para a flotação convencional, aumenta à medida que o diâmetro da partícula aumenta, assim como Ahmed e Jameson (1985), para partículas menores que  $50\mu\text{m}$  e Hernáinz e Calero (2001), para partículas entre  $74$  e  $137\mu\text{m}$ , constataram em seus trabalhos. Porém, constataram-se nos ensaios executados para a flotação convencional que as partículas pertencentes à fração grosseira não foram todas coletadas, indicando que a afirmação citada pelos autores só é válida até um certo diâmetro de partículas que são possíveis de serem coletadas pelas bolhas.

Pode ser percebido ainda que na granulometria grosseira, para percentagens de sólidos em polpa iguais e percentagens de sílica diferentes, os ensaios onde se utilizaram as menores percentagens de sílica apresentaram resultados de recuperação de sílica maiores em comparação aos ensaios onde se utilizaram as maiores percentagens de sílica. Provavelmente este comportamento deve estar relacionado à menor densidade de adsorção de coletor para os casos dos minérios com as maiores percentagens de sólidos em polpa, ou seja, a dosagem de coletor utilizada não foi a suficiente para coletar todas as partículas hidrofóbicas.

Como se trata de uma etapa de desbaste (*rougher*) do minério, é mais importante considerar, para efeito de avaliação, a recuperação de sílica em lugar da recuperação de ferro. Pode-se observar o que ocorre quando se utiliza a sílica em granulometria fina independente dos parâmetros estudados. As partículas mais finas têm menor probabilidade de desligarem-se das bolhas, quando comparadas às partículas grosseiras, pois neste caso, as forças de atração se sobrepõem às forças de desligamento (descolamento), proporcionando uma maior recuperação de sílica.



**FIGURA 10** - Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação convencional com 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa.

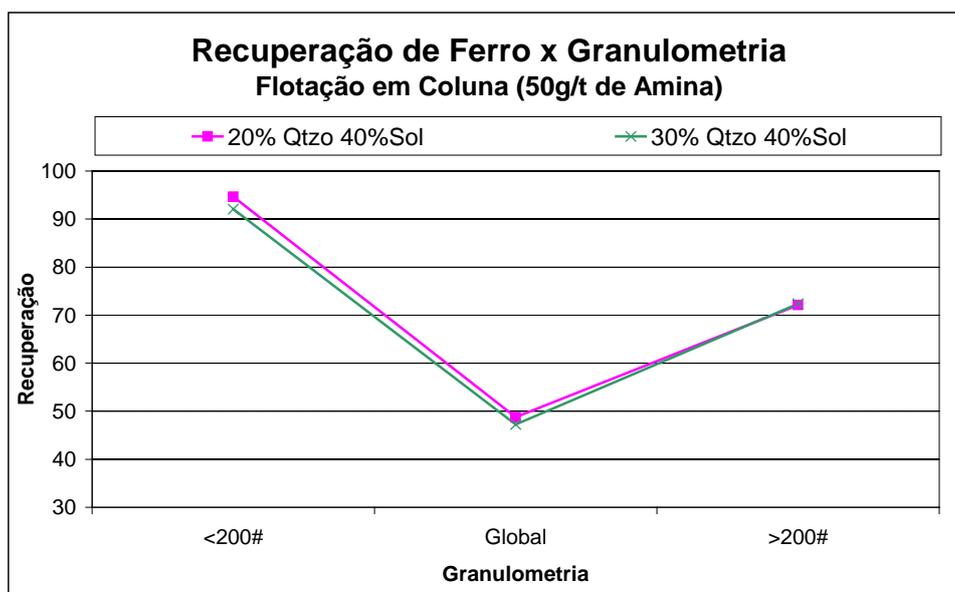
No gráfico representado pela Figura 10, observa-se que há uma tendência de queda na recuperação de sílica para os ensaios onde se utilizou a fração grosseira de sílica contaminante para todos os casos, exceto nos ensaios onde se utilizou uma

alíquota de 20% de sílica e 50% de sólidos em polpa. Neste último caso se obteve um suave acréscimo na recuperação sílica para a faixa de granulometria grosseira em relação à distribuição global, o que contraria os outros casos encontrados.

### 5.2.2 – Flotação em Coluna.

Como no item anterior, são apresentados neste item, os gráficos de recuperação de ferro x granulometria, assim como os gráficos de recuperação de sílica x granulometria para a célula de flotação em coluna.

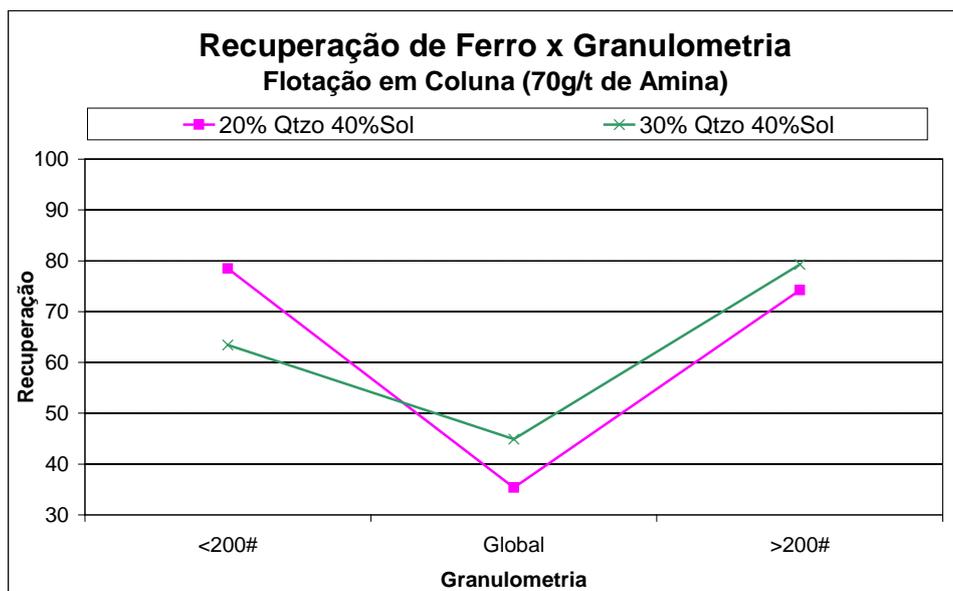
A Figura 11 representa a recuperação de ferro x granulometria dos ensaios de flotação em coluna onde se utilizou uma dosagem de amina de 50g/t, para as diferentes percentagens de sólidos em polpa e percentagens de sílica adicionada. E a Figura 12 representa as mesmas condições para uma dosagem de amina de 70g/t.



**FIGURA 11** – Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação em coluna com 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40% de sólidos em polpa.

Analisando-se o gráfico apresentado pela Figura 11, pode-se afirmar que os minérios com sílica na fração global apresentaram os menores valores de recuperação de ferro, quando comparados com as demais faixas. A distribuição granulométrica fina apresentou os maiores valores de recuperação de ferro, e na grosseira os valores apresentados foram intermediários.

Pode-se verificar também que, em se tratando da percentagem de sílica contaminante, os valores de recuperação de ferro são bem próximos, ou seja, para todos os ensaios, representados pela Figura 11, independente da granulometria, os valores de recuperação de ferro apresentam uma variação muito pequena. Os valores de recuperação de ferro são um indicativo para os valores de recuperação de sílica, uma vez que são “inversamente proporcionais”.



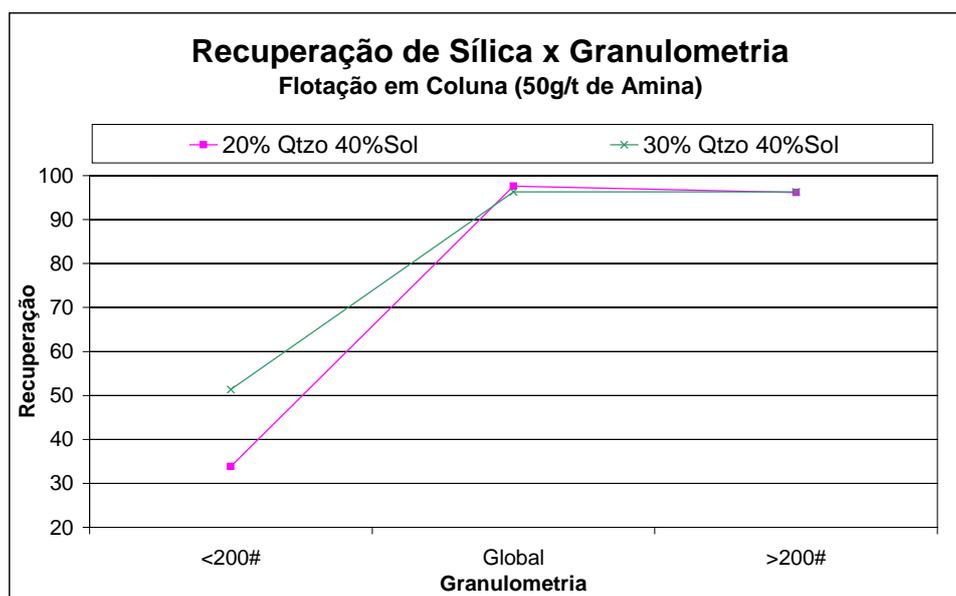
**FIGURA 12** - Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação em coluna com 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40% de sólidos em polpa.

O gráfico apresentado pela Figura 12 destaca que os minérios com sílica na faixa de granulometria global apresentaram os menores valores de recuperação de ferro, quando comparados com as demais faixas. A faixa de granulometria fina foi a que apresentou os maiores valores de recuperação de ferro, e a distribuição de granulometria grosseira os valores apresentados foram intermediários como no gráfico da Figura 11.

Para os ensaios representados na Figura 12, onde se utilizou uma maior dosagem de coletor considerando os minérios com níveis de percentagem de sílica contaminante diferentes, observa-se que os valores de recuperação de ferro não são tão próximos quanto no gráfico anterior. Houve ainda uma diminuição nos valores de recuperação de ferro para a faixa de granulometria fina. O inverso foi observado para as outras duas granulometrias. Este fato pode ser facilmente entendido, pois neste

caso utilizou-se uma maior dosagem de coletor fazendo com que as partículas do mineral de ferro fossem carregadas para espuma devido a uma possível dosagem excessiva, reduzindo a recuperação do metal.

A Figura 13 representa a recuperação de sílica x granulometria dos ensaios de flotação em coluna onde se utilizou uma dosagem de amina de 50g/t, para as diferentes percentagens de sólidos em polpa e percentagens de sílica adicionada. E a Figura 14 representa as mesmas condições para uma dosagem de amina de 70g/t.



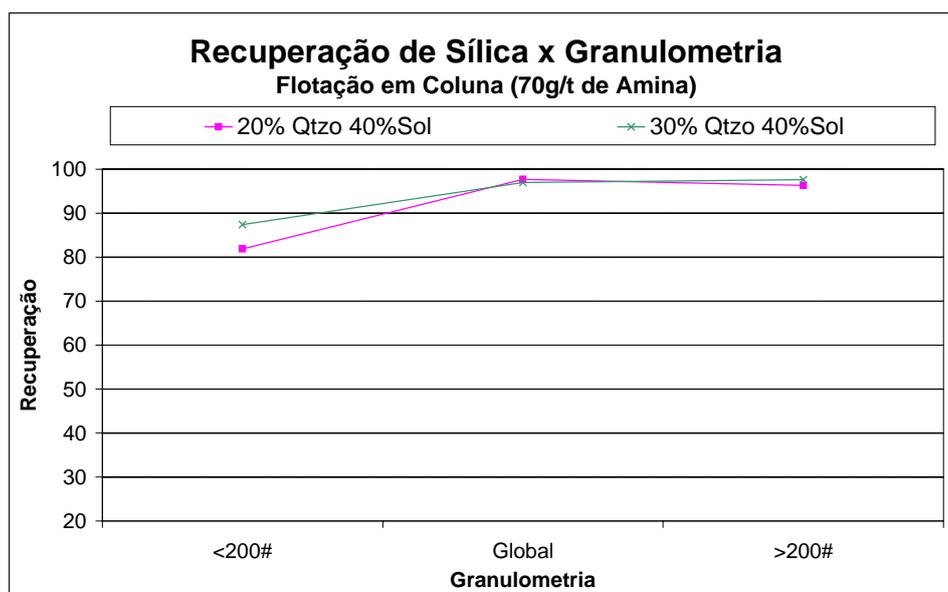
**FIGURA 13** - Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação em coluna com 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40% de sólidos em polpa.

O gráfico apresentado pela Figura 13 mostra que nos ensaios efetuados utilizando os minérios com sílica contaminante compreendida na fração fina, que os valores de recuperação de sílica são menores quando comparados com os demais valores. Pode-se perceber também que os valores de recuperação de sílica para os ensaios com sílica contaminante compreendida nas frações global e grosseira, não apresentaram uma diferença significativa como para a faixa de granulometria fina.

Provavelmente os baixos valores de recuperação de sílica apresentados no caso acima esteja relacionado a uma possível força de atração muito baixa entre as partículas e a bolha devido ao distanciamento da partícula da bolha, ou seja, as forças hidrodinâmicas seriam superiores às forças de atração, dificultando a coleta das partículas.

No estudo executado por Leppinen (1999) constatou-se que no processo de colisão é possível realizar a análise da trajetória da partícula a ser colida com a bolha de ar e que as forças envolvidas nesse processo são dependentes da distância em que a partícula se encontra afastada da bolha bem como o raio de colisão (definido como a soma do raio da bolha e o raio da partícula), os pontos críticos (nos ângulos de coordenada polar igual a zero e igual a  $\pi$ ) e a trajetória limite, determinando-se regiões ao redor da bolha definidas como sendo a região de atração e a região de repulsão.

Então, para partículas menores e também devido ao fato das regiões de atração se situarem mais próximas à bolha, para ocorrer a colisão é necessário que as partículas estejam mais próximas às bolhas para que possam ser coletadas. Caso isto não aconteça tais partículas possivelmente serão arrastadas pelo fluxo do líquido não sendo coletadas pelas bolhas, reduzindo a recuperação.



**FIGURA 14** - Gráfico da recuperação de ferro x granulometria para os ensaios de flotação em coluna com 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40% de sólidos em polpa.

No gráfico apresentado pela Figura 14, pode-se constatar o mesmo comportamento apresentado na figura anterior para os minérios com sílica compreendida na faixa de granulometria fina, porém os valores de recuperação de sílica não são tão baixos, mesmo ainda sendo menores do que os obtidos nas outras faixas.

Com base neste comportamento fica evidente que, para as condições nas quais os ensaios foram executados, os minérios com sílica contaminante na faixa de granulometria fina apresentam baixos valores de recuperação de sílica, fornecendo um afundado com alto teor do mineral, como é mostrado pela Figura 19, (sendo o maior valor igual a 18,10%), o que não é de se esperar para a produção de um concentrado com uma qualidade aceitável.

Para os gráficos representados pelas Figuras 13 e 14, pode-se perceber que nos minérios que apresentam sílica compreendida na faixa de granulometria fina, os valores das recuperações do mineral foram superiores, quando comparados com os minérios com sílica contaminante nas outras faixas, independentemente da dosagem de coletor que foi utilizada. Provavelmente nos minérios com sílica compreendida na faixa de granulometria fina e devido à alta superfície específica, a quantidade de coletor utilizada (50g/t) não foi o suficiente para que fossem coletadas todas as partículas hidrofóbicas, ou seja, foram coletadas apenas as frações mais grosseiras das partículas pertencentes à faixa de granulometria fina.

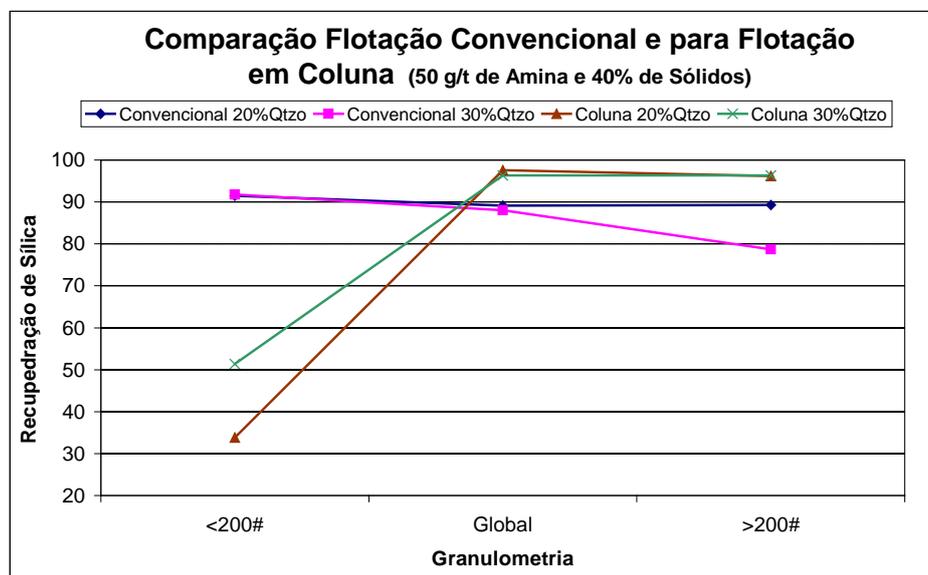
Já para os minérios com sílica compreendida nas outras faixas de granulometria (global e grossa), praticamente não há diferença entre os valores de recuperação de sílica para os diferentes valores de percentagem de sílica contaminante constituintes do minério. Nesses minérios a superfície específica a ser coberta pelo coletor é menor do que no caso anterior, sendo que para uma dosagem de 50g/t, os resultados de recuperação de sílica são próximos aos obtidos nos ensaios com uma dosagem de coletor de 70g/t. Possivelmente a utilização de uma menor dosagem de coletor produziria recuperações nos mesmos níveis das do caso citado, uma vez que ao se aumentar a dosagem de coletor de 50g/t para 70g/t, praticamente não houve variação nos valores de recuperação de sílica.

### **5.3 – Gráficos de Comparação**

As Figuras 15 e 16 representam uma comparação entre os valores de recuperação de sílica obtidos nos ensaios de flotação convencional e nos ensaios de flotação em coluna para os quais se utilizou uma polpa com 40% de sólidos e 50g/t e 70g/t de dosagem de amina, respectivamente.

Nesta secção é efetuada uma comparação dos resultados dos gráficos de recuperação x granulometria entre os ensaios de flotação convencional e em coluna onde se utilizou uma polpa com 40% de sólidos (gráficos representados pelas Figuras 15 e 16).

Para a maioria dos ensaios realizados com 40% de sólidos em polpa, os ensaios de flotação convencional com a granulometria de sílica fina apresentaram recuperação de sílica maior quando comparados com os resultados dos ensaios de flotação em coluna, independentemente da dosagem de coletor utilizada. Possivelmente este comportamento esteja relacionado às diferenças de condições de fluxo nos dois equipamentos. Sendo que na flotação convencional as partículas finas são mais susceptíveis a ficarem em suspensão possibilitando uma maior probabilidade de colisão. E na flotação em coluna, as partículas finas são facilmente arrastadas pelas linhas de fluxo da polpa, caso não as partículas se localizarem tão próximo à bolha para possibilitar a colisão e conseqüentemente a coleta.

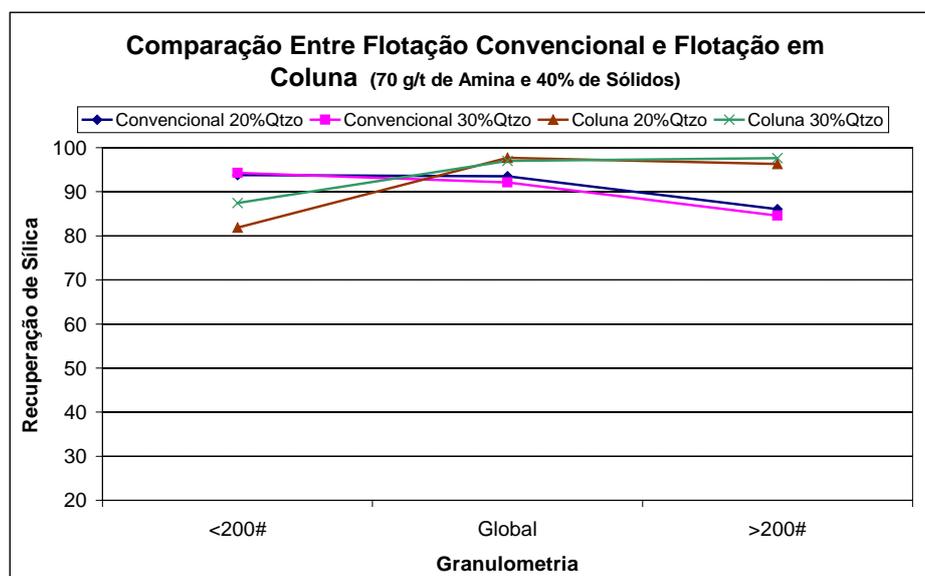


**FIGURA 15** – Gráfico de comparação entre as recuperações de sílica para a flotação em convencional e para flotação em coluna, onde se utilizou uma dosagem de 50g/t de amina e 40% de sólidos em polpa.

Percebe-se que para as outras duas faixas de granulometria, os resultados de recuperação de sílica dos ensaios de flotação em coluna (menor de 95,15% e maior de 97,67%) foram superiores aos resultados de recuperação de sílica dos ensaios de flotação convencional (menor de 78,72% e maior de 93,53%). O que se pode dizer que o equipamento de flotação convencional apresenta melhores resultados de recuperação de sílica para a granulometria fina quando comparado ao equipamento de flotação em coluna. E em contrapartida o equipamento de flotação em coluna apresenta melhores resultados de recuperação de sílica para as faixas de

granulometria global e grossa quando comparado com o equipamento de flotação convencional.

É possível ainda afirmar que no equipamento de flotação convencional, para os minérios com uma contaminação de 20% de sílica nas faixas de granulometria global e grossa, os resultados de recuperação de sílica são superiores aos resultados de recuperação de sílica para os minérios com uma contaminação de 30% de sílica na faixa de granulometria fina.



**FIGURA 16** – Gráfico de comparação entre as recuperações de sílica para a flotação em convencional e para flotação em coluna, onde se utilizou uma dosagem de 70g/t de amina e 40% de sólidos em polpa.

Uma possível explicação para este comportamento é o possível desligamento das partículas minerais devido à agitação do sistema. Que é facilmente entendido, visto que para uma quantidade maior de partículas será necessária uma maior força de atração entre partículas e bolha (maior dosagem de coletor) suficiente para carregar tais partículas até a espuma. E isto pode ser mais pronunciado para as partículas com maior diâmetro, já que o diâmetro da partícula está relacionado à força centrífuga do sistema. E observa-se que ao se utilizar uma maior dosagem de coletor, para os minérios com sílica na faixa grosseira, a diferença no valor da recuperação de sílica é menos pronunciada do que nos ensaios onde a dosagem de coletor foi menor, já que uma maior dosagem de coletor eleva a força de atração entre partícula e bolha.

Para o equipamento de flotação em coluna, verifica-se que na maioria dos ensaios, os resultados de recuperação de sílica foram superiores para os minérios

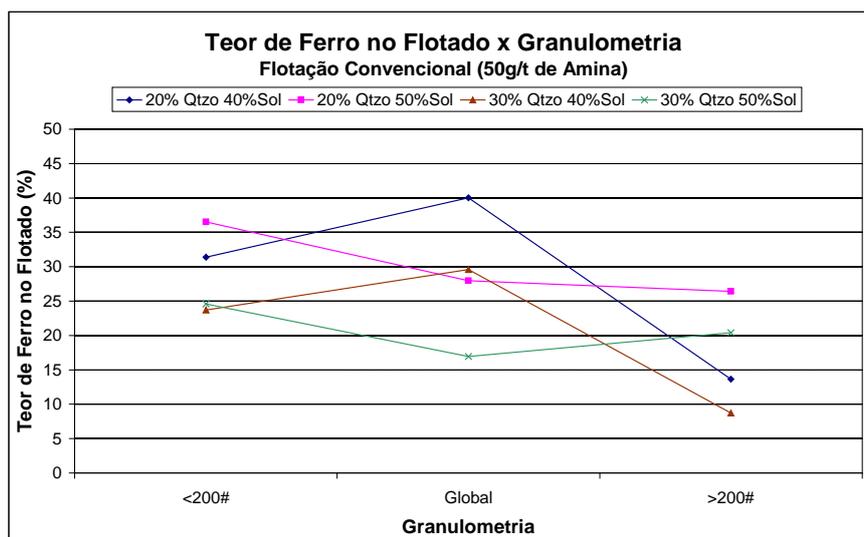
com uma contaminação de sílica de 30%. Além de uma maior dosagem de amina proporcionar um acréscimo na recuperação de sílica para os minérios com a faixa de granulometria fina de sílica contaminante.

#### 5.4 – Gráficos de Teor x Granulometria

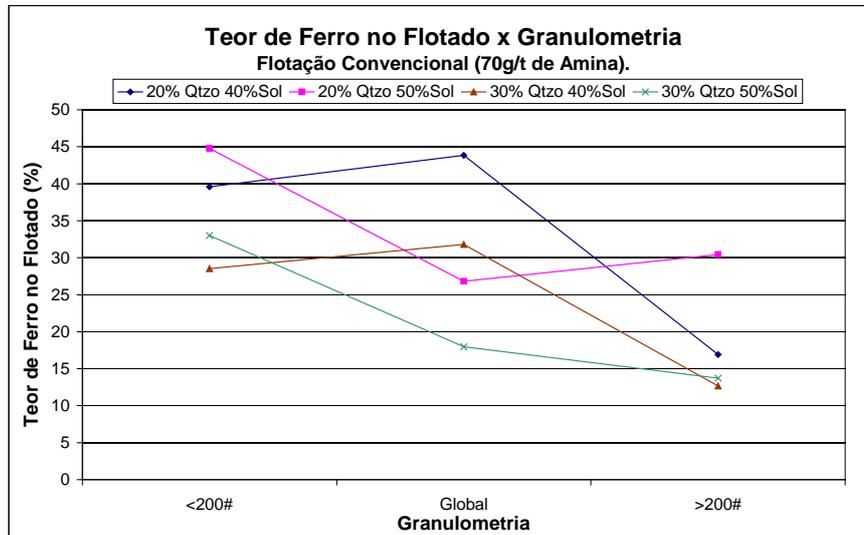
Vale lembrar que também é importante analisar os teores dos produtos e neste item são então apresentados os gráficos de teor de ferro no flotado x granulometria e de teor de sílica no afundado x granulometria confeccionados a partir dos dados das condições gerais, considerando-se cada um dos parâmetros que foram variados durante os ensaios, ou seja, segundo a granulometria da sílica contaminante (abaixo de 75 $\mu$ m, Global, e acima de 75 $\mu$ m), segundo a percentagem de sólidos na alimentação (40 e 50% para os ensaios de flotação convencional e 40% para os ensaios de flotação em coluna), segundo a dosagem de coletor (amina) utilizada (50 e 70g/t), e segundo a percentagem de sílica adicionada como contaminante do minério (20 e 30%).

##### 5.4.1 – Flotação Convencional

As Figuras 17 e 18 apresentadas a seguir representam o teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios onde se utilizaram as dosagens de 50g/t e 70g/t de amina, respectivamente.



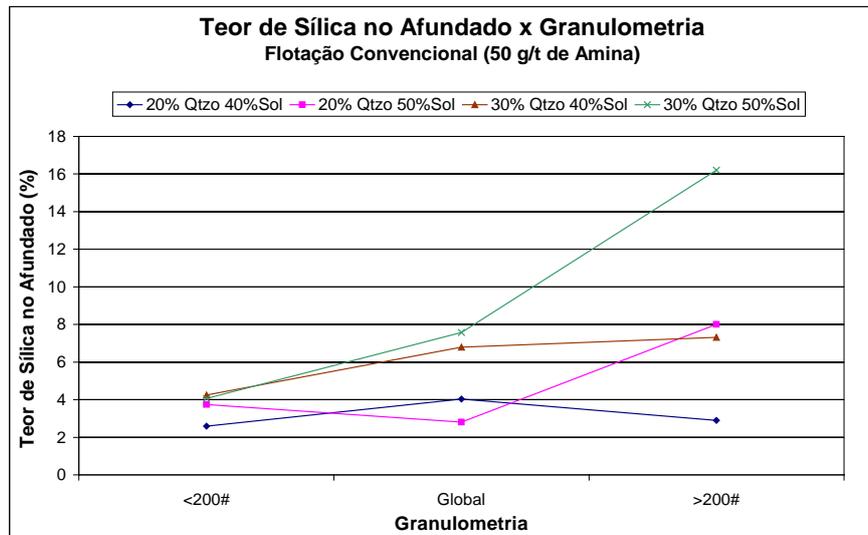
**FIGURA 17** – Gráfico do teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação convencional para uma dosagem de 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa.



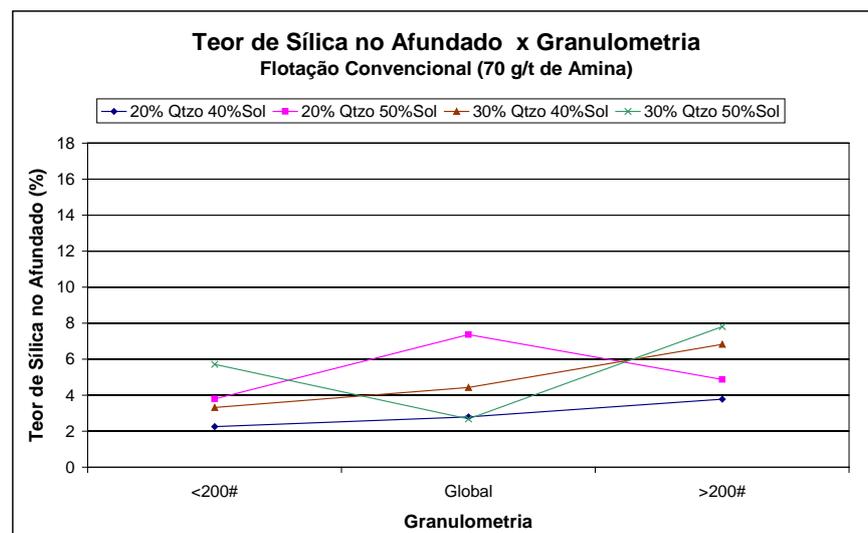
**FIGURA 18** – Gráfico do teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação convencional para uma dosagem de 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 17 e 18, tem-se que nos ensaios onde se utilizou o minério com sílica na faixa de granulometria grosseira, foram os que apresentaram os menores valores de teor de ferro no flotado, independente dos parâmetros estudados. Pode-se notar também que para os ensaios com 40% de sólidos em polpa e minérios com 20% e 30% de sílica na faixa de granulometria global, e que para os ensaios com 50% de sólidos em polpa e minérios com 20% e 30% de sílica na faixa de granulometria fina apresentaram os maiores valores de teor de ferro no flotado. Porém, no gráfico da Figura 18, os valores de teor de ferro são maiores, uma vez que se utilizou uma maior dosagem de coletor.

As Figuras 19 e 20 apresentadas a seguir representam o teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios onde se utilizaram as dosagens de 50g/t e 70g/t de amina, respectivamente.



**FIGURA 19** – Gráfico do teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação convencional para uma dosagem de 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa.



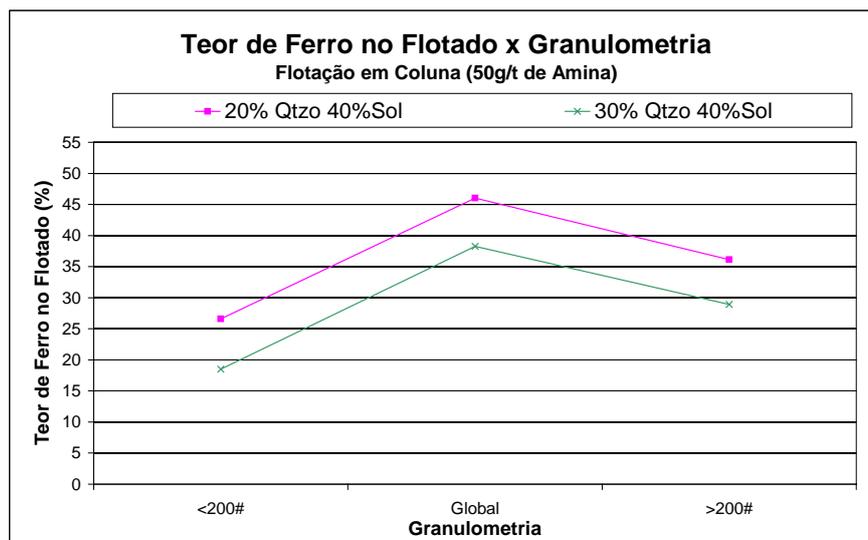
**FIGURA 20** – Gráfico do teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação convencional para uma dosagem de 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40 e 50% de sólidos em polpa.

No gráfico representado pela Figura 19 é mostrado que os maiores valores de teor de sílica no afundado são apresentados nos ensaios onde se utilizaram polpas com 50% de sólidos e sílica na faixa de granulometria grosseira. Percebe-se ainda que para polpas com 40% de sólidos, há uma tendência de se obter os maiores valores de

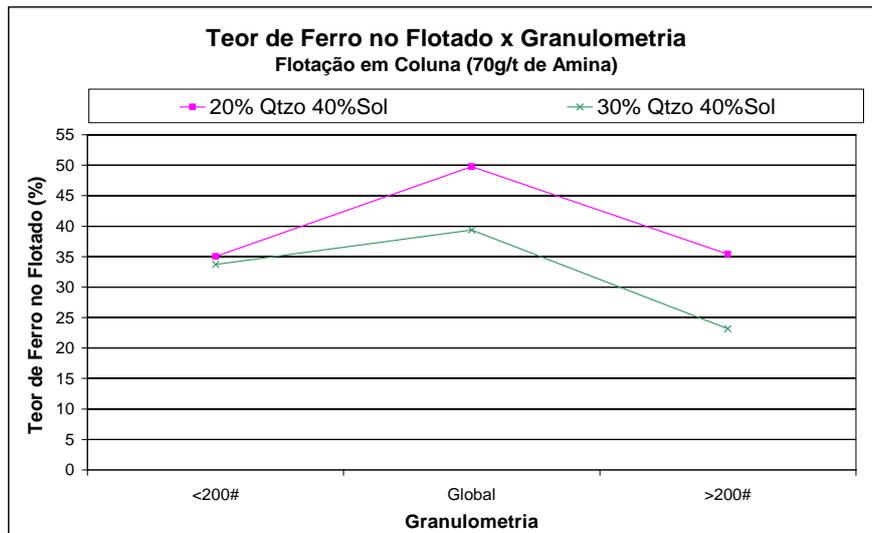
teor de sílica no afundado para os minérios com sílica na faixa de granulometria grosseira. Pode-se dizer então que a granulometria grosseira é prejudicial na obtenção de um “concentrado” mais limpo, uma vez que o afundado da etapa de desbaste é parte do concentrado final, para a flotação de minério de ferro, como foi mencionado anteriormente na análise dos gráficos de recuperação. O mesmo acontece para o gráfico apresentado pela Figura 20, porém como se utilizou uma dosagem de coletor maior para a execução dos ensaios, é facilmente compreensível que os valores de teor de sílica no afundado estejam em uma faixa menor do que no gráfico da figura anterior.

#### 5.4.2 – Flotação em Coluna

As Figuras 21 e 22 apresentadas a seguir representam o teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios onde se utilizaram as dosagens de 50g/t e 70g/t de amina, respectivamente.



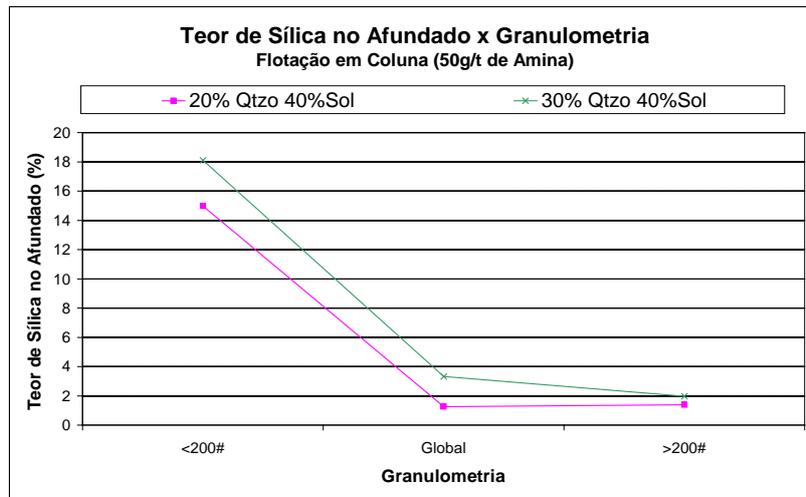
**FIGURA 21** – Gráfico do teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação em coluna para uma dosagem de 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40% de sólidos em polpa.



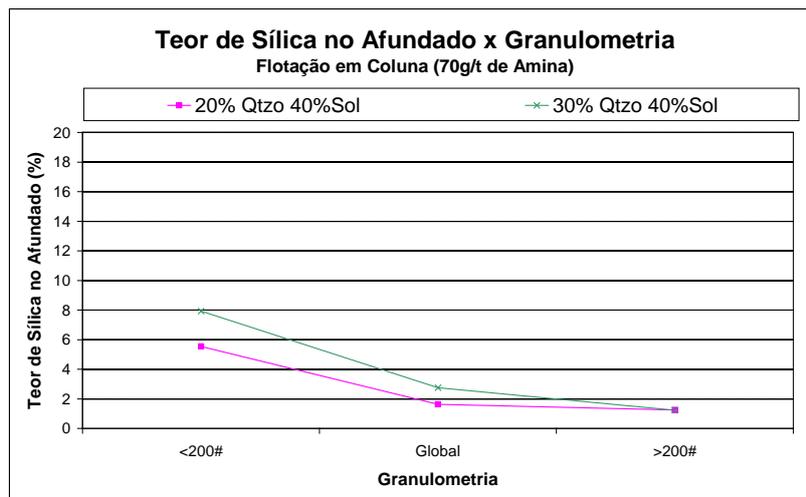
**FIGURA 22** – Gráfico do teor de ferro no flotado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação em coluna para uma dosagem de 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40% de sólidos em polpa.

Nos gráficos apresentados pelas Figuras 21 e 22, nota-se que os ensaios onde se apresentaram os maiores valores de teor de ferro no flotado foram os que utilizaram os minérios com 20% de sílica na faixa de granulometria global. Pode-se notar que para os ensaios onde se utilizaram minérios com 20% de sílica os valores de teor de ferro no flotado foram superiores aos ensaios com minérios com 30% de sílica, o que pode ser compreensível, pois para minérios com menor teor de sílica há uma tendência de coleta das partículas de ferro pelas bolhas, a fim de consumir a quantidade de coletor disponível.

As Figuras 23 e 24 apresentadas a seguir representam o teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios onde se utilizaram as dosagens de 50g/t e 70g/t de amina, respectivamente.



**FIGURA 23** – Gráfico do teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação em coluna para uma dosagem de 50g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40% de sólidos em polpa.



**FIGURA 24** – Gráfico do teor de sílica no afundado em função dos três níveis de granulometria para os ensaios de flotação em coluna para uma dosagem de 70g/t de amina, para 20 e 30% de sílica contaminante e 40% de sólidos em polpa.

Nos gráficos apresentados pelas Figuras 23 e 24, percebe-se que nos ensaios onde se utilizaram minérios com sílica na faixa de granulometria grosseira, que os valores de teor de sílica no afundado, são muito menores do que os valores de teor de sílica no afundado para os ensaios com sílica na faixa de granulometria fina. Este fato reforça que para os minérios utilizados nos ensaios, o equipamento de flotação em coluna é indicado para minérios com sílica na faixa de granulometria grosseira.

## 6 – CONCLUSÕES

---

- Nos ensaios de flotação convencional onde a percentagem de sólidos em polpa utilizada foi de 40%, os resultados de recuperação de sílica, foram superiores, quando comparados com os ensaios de flotação convencional onde se utilizou uma percentagem de sólidos em polpa de 50%.
- Os resultados de recuperação de sílica obtidos nos ensaios de flotação em coluna foram superiores aos resultados obtidos nos ensaios de flotação convencional para os minérios com sílica na faixa de granulometria grosseira (acima de 75 $\mu$ m).
- Os resultados de recuperação de sílica obtidos nos ensaios de flotação convencional foram superiores aos resultados obtidos nos ensaios de flotação em coluna para minérios com sílica na faixa de granulometria fina (abaixo de 75 $\mu$ m).
- Os resultados de recuperação de sílica para os ensaios de flotação em coluna, não apresentaram diferenças significantes quando se aumenta a dosagem de coletor de 50g/t para 70g/t, para os minérios com sílica nas faixas de granulometria global e grosseira. Sendo significante (passando da faixa de 30%-50% para a faixa de 80%) para os minérios com sílica na fração fina.

## 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

Um procedimento que certamente faz o diagnóstico do comportamento de cada mineral no processo de flotação é a execução análise química de cada uma das frações granulométricas dos produtos dos ensaios executados. Este procedimento não foi efetuado neste trabalho, pelo motivo de se manusear um grande número de ensaios e variáveis, o que tornaria o trabalho muito extenso e dispendioso. Sugere-se então que o procedimento citado seja executado em trabalhos futuros, onde se utilize um número mais reduzido de variáveis.

As partículas de granulometria grosseira (acima de  $75\mu\text{m}$ ), proporcionam uma queda na recuperação, nos ensaios de flotação convencional para todos os parâmetros utilizados. Este fato pode indicar uma possível alteração no processo de flotação convencional reversa de minério de ferro, que possivelmente otimizaria a produção e deve ser ainda pesquisado. A possível alteração seria a introdução de uma classificação por hidrociclones, onde o *overflow* conteria a parte do material com granulometria fina, passaria por uma deslamagem e seguiria para a etapa de flotação e o *underflow* seria recirculado voltando à moagem.

Deve também ser pesquisado o caso de emprego de um possível “corte” de granulometria no circuito, sendo que a parte acima de  $75\mu\text{m}$  seguiria para a parte do circuito referente à etapa de flotação em coluna e a parte abaixo de  $75\mu\text{m}$  seguiria para a parte do circuito referente à etapa de flotação convencional.

Neste trabalho, os minérios utilizados apresentam um alto grau de liberação (praticamente 100%), devendo ser pesquisados os casos para minérios reais, cujo grau de liberação é menor, além de verificar se os efeitos serão semelhantes, ou não, aos apresentados.

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1]. AHMED, N., JAMESON, G.J., ***The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles***. *International Journal of Mineral Processing*, 14, pp.195-215, 1985.
- [2]. AQUINO, J.A., OLIVEIRA, M. L. e FERNADES, M. A. ***Flotação em Coluna***. In: LUZ, A. B. *et. al. Tratamento de Minérios*. CETEM, 2<sup>a</sup> Ed., pp. 433-476, 1998.
- [3]. ATA, S., AHMED, N., JAMESON, G.J. ***Collection of Hydrophobic Particles in the Froth Phase***. *International Journal of Mineral Processing*, 64, pp. 101-122, 2002.
- [4]. CARVALHO, W. R. ***Processo de Beneficiamento de Minério de Ferro da SAMARCO Mineração S.A.*** Não publicado. Relatório de Estágio Supervisionado. DEMIN – EM – UFOP, 2000.
- [5]. DAI Z., DUKHIN S., FORNASIERO D., and RALSTON, J. ***The Inertial Hydrodynamic Interaction of Particles and Rising Bubbles with Mobile Surfaces***. *Journal of Colloid and Interface Science*. 197, 275–292, 1998.
- [6]. DAI Z., FORNASIERO D., and RALSTON J. ***Particle–Bubble Attachment in Mineral Flotation***. *Journal of Colloid and Interface Science* 217, pp. 70–76, 1999.
- [7]. DAI Z., FORNASIERO D., and RALSTON J. ***Particle-bubble Collision Models – A Review***. *Advances in Colloid and Interface Science*. 85, pp. 231-256, 2000.
- [8]. DOBBY, G.S., FINCH, J.A. ***Mixing Characteristics of Industrial Flotation Columns***. *Chemical Engineering Science*, v.40, n.7, pp 1061-1068, 1985.
- [9]. DOBBY, G.S., FINCH, J.A. ***Particle Size Dependence in Flotation Derived From a Fundamental Model of the Capture Process***. *International Journal of Mineral Processing*, 21, p. 241-260, 1987.
- [10]. ESPINOZA-GOMEZ, R., YIANATOS, J., FINCH, J. ***Carrying Capacity Limitations in Flotation Columns***. In: *Column Flotation 88' SME Annual Meeting*. 143-148, 1988.
- [11]. FENG, D., and ALDRICH, C. ***Effect of Particle Size on Flotation Performance of Complex Sulphide Ores***. *Minerals Engineering*, v.12, n.7, pp. 721-731, 1999.

- [12]. FINCH, J. A., DOBBY, G.S. **Column Flotation**. Pergamon Press, 1990.
- [13]. GARIBAY, R.P., GALLEGOS, P.M.A., URIBE, A.S., NAVA, F.A. **Effect of Collection Zone Height and Operating Variables on Recovery of Overload Flotation Columns**. *Minerals Engineering*, v.15, n.5, p.325-331, 2002.
- [14]. HERNÁINZ, F., CALERO, M. **Froth flotation: kinetic models based on chemical analogy**. *Chemical Engineering and Processing*, n.40, p.269-275, 2001.
- [15]. ITYOKUMBUL, M.T. **A Mass Transfer Approach to Flotation Column Design**. *Chemical Engineering*, v.47, n.13/14, p. 3605-3612, 1992.
- [16]. ITYOKUMBUL, M.T. **Selection of Recovery Zone Height in Flotation Column Design**. *Chemical Engineering and Processing*, v., n. 32, p. 77-82, 1992.
- [17]. ITYOKUMBUL, M.T. **Effect of Pulp Cleaning Zone on Gangue Control on Column Flotation**. *Minerals Engineering*, v.8, n.10, p. 1231-1237, 1995.
- [18]. LEPPINEN, D. M. **Trajectory Analysis and Collision Efficiency during Microbubble Flotation**. *Journal of Colloid and Interface Science*. 212, pp. 431–442, 1999.
- [19]. LI, R., HOBREY, H. SCHNEIDER, F.U. **Investigations on the Influence of Particle Size in Flotation**. In: *International Mineral Processing Congress*, 18, Sydney, Australia, p. 689-697, 1993.
- [20]. MAKSIMOV, I.I., BORKIN, A.D., EMEYANOV, M.F., 1991. **The use of Column Flotation Machines for Cleaning Operations in Concentrating Non-ferrous Ores**. In: *Proceedings of XVII International Mineral Processing Congress*, Dresden, FRG, vol.2, pp.273 281.
- [21]. MARTINS, J. **Alguns Aspectos Hidrodinâmicos de Flotação Colunar de Partículas Grossas**. *REM: Revista da Escola de Minas*, Ouro Preto, 51(4): 27-29 out. dez. 1998.
- [22]. MARTINS, J.; SANTOS, A.R.; JÚNIOR, G.G.O.; FREITAS, A.P.; PINTO, J.R.; SACRAMENTO, R.C. **Efeito do Mineral na Flotação Convencional de Sílica Puro**. *XIX ENTMME – Recife*, Pernambuco, 6pp, 2002.
- [23]. NGUYEN, A. V., RALSTON J., SCHULZE H.J. **On Modeling of Bubble-Particle Attachment Probability in Flotation**. *International Journal of Mineral Processing* 53, pp. 225–249, 1998.

- [24]. NGUYEN, A. V. and EVANS, G. M. **The Liquid Flow Force on a Particle in the Bubble–Particle Interaction in Flotation.** *Journal of Colloid and Interface Science* 246, pp.100–104, 2002.
- [25]. NGUYEN, A.V., **New method and equations for determining attachment tenacity and particle size limit in flotation.** *International Journal of Mineral Processing*, 68, pp. 167-182, 2003.
- [26]. ÖTEYAKA, B., SOTO, H. **Modeling of Negative Bias Column for Coarse Particles Flotation.** *Minerals Engineering*, v. 8, n.1-2, p. 91-100, 1995.
- [27]. PATWARDHAN, A., HONAKER, R.Q. **Development of a Carrying-Capacity Model for Column Froth Flotation.** *International Journal of Mineral Processing*, v. 59, p. 275-293, 2000.
- [28]. PHAN, C.M., NGUYEN, A.V., MILLER, J.D., EVANS, G.M., JAMESON, G.J. **Investigations of bubble-particle interactions.** *International Journal of Mineral Processing*, v. 72, p. 239-254, 2003.
- [29]. RALSTON J., DUKHIN S.S., MISHCHUK N.A. **Inertial Hydrodynamic Particle–Bubble Interaction in Flotation.** *International Journal of Mineral Processing*. 56, pp. 207–256, 1999.
- [30]. RALSTON J., DUKHIN S.S., MISHCHUK N.A. **Wetting Film Stability and Flotation Kinetics.** *Advances in Colloid and Interface Science*. 95, pp.145–236, 2002.
- [31]. ROSS, V.E. **Particle-Bubble Attachment in Flotation Froths.** *Minerals Engineering*, v.10, n.7, pp. 695-706, 1997.
- [32]. SOTO, H.S. **Column Flotation With Negative Bias, Processing of Complex Ores.** In: DOBBY, RAO, *Anais...* Pergamon Press, 1989.
- [33]. SOTO, H., BARBERY, G. **Flotation of Coarse Particles in a Counter-Current Column Cell.** *Minerals e Metallurgical Processing*, February, p. 16-21, 1991.
- [34]. TAO, D., LUTTRELL, H.G., YOON, R.H. **A Parametric Study Of Froth Stability and its Effect on Column Flotation of Fine Particles.** *International Journal of Mineral Processing*, v. 59, p. 25-43, 2000.
- [35]. TAVERA, F.J., ESCUDERO, R., FINCH, J.A. **Gas Holdup In Flotation Columns: Laboratory Measurements.** *International Journal of Mineral Processing*, v. 61, p. 23-40, 2001.

- [36]. TUTEJA, R.K., SPOTTISWOOD, D.J. and MISRA, V.N. **Column Parameters: Their Effect on Entrainment in Froth.** *Minerals Engineering*, v.8, n. 11, pp. 1359 – 1368, 1995.
- [37]. YIANATOS, J. **Column Flotation Developments and New Trends.** VI *Southern Hemisphere Meeting on Minerals Technology*, 35pp, 2001
- [38]. YOON, R. H. **Hydrodynamic and Surface Forces in Bubble-Particle Interactions.** *Aufbereitungs Technik*, 9, p. 474-485, 1991.
- [39]. YOON, R. H. **Microbubble Flotation.** *Minerals Engineering*, v. 6, n. 6, p. 619-630. 1993.

# **A N E X O S**

## ANEXO I

---

### 1 – Análise Granulométrica do Quartzito

A seguir estão apresentados a tabela e o gráfico referentes à análise granulométrica do quartzito utilizado como contaminante dos minérios utilizado nos ensaios de flotação.

**TABELA 4**

Análise Granulométrica do Quartzito Utilizado como Contaminante dos Minérios.

Análise Granulométrica do Quartzito					
Abertura (#)	( $\mu\text{m}$ )	Massa(g)	%RS	%RA	%PA
65	210	33,50	11,81	11,81	88,19
100	148	42,20	14,87	26,68	73,32
150	105	42,20	14,87	41,55	58,45
200	75	38,20	13,46	55,01	44,99
270	53	47,30	16,67	71,68	28,32
325	44	17,90	6,31	77,99	22,01
400	38	15,40	5,43	83,42	16,58
-400	-38	47,05	16,58	100,00	0,00
Totais		283,75	100,00	-	-

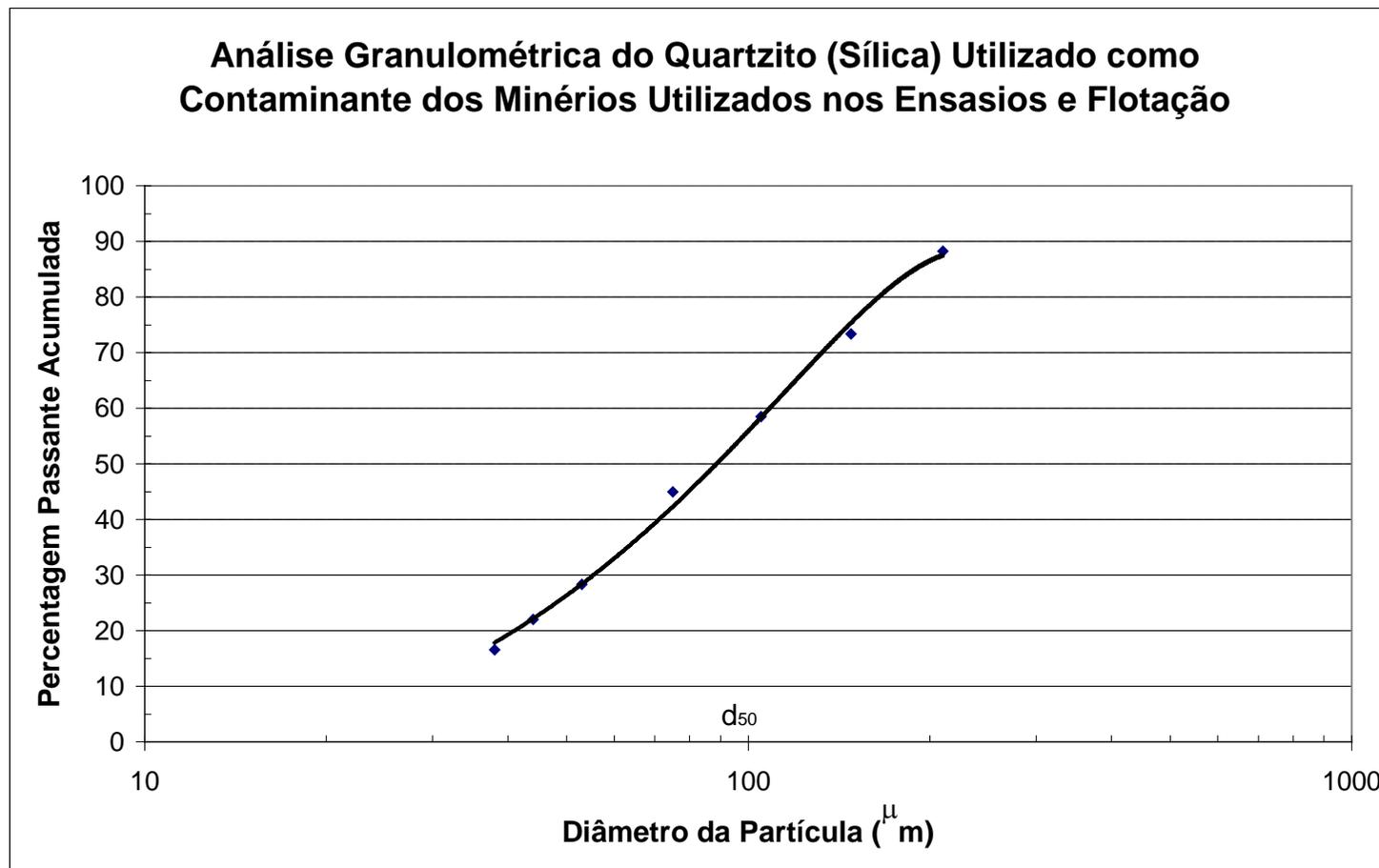
Onde:

%RS, é a percentagem retida simples;

%RA, é a percentagem retida acumulada; e,

%PA, é a percentagem passante acumulada.

A Figura 25 apresenta o gráfico da abertura, representada em  $\mu\text{m}$  em função da percentagem passante acumulada, para o quartzito utilizado como contaminante dos minérios utilizados nos ensaios de flotação.



**FIGURA 25** – Análise Granulométrica do Quartzito Utilizado como Contaminante dos Minérios dos Ensaios de Flotação. Onde se tem que o  $d_{50}$  é igual a  $85\mu\text{m}$ , com peneira de abertura mais próxima de  $75\mu\text{m}$ , ou 200 malhas Tyler.

## ANEXO II

### 1– Recuperações e Teores Obtidos.

Os valores das recuperações e dos teores dos produtos obtidos nos cálculos efetuados utilizando as expressões 20 e 21, foram dispostos em tabelas referentes a cada um dos ensaios de flotação, como mostradas a seguir.

**TABELA 5**

Valores das Recuperações de ferro para os ensaios de flotação convencional, segundo as condições gerais.

Recuperações de Ferro													
Granulometria		<200#				Global				>200#			
Amina		50g/t Aa		70g/t Aa		50g/t Aa		70g/t Aa		50g/t Aa		70g/t Aa	
%Sílica		20%	30%	20%	30%	20%	30%	20%	30%	20%	30%	20%	30%
%Sólidos	40%	80,72	79,32	67,86	71,35	67,67	71,29	58,34	68,39	94,19	95,92	92,68	91,64
	50%	74,34	77,92	57,73	64,57	83,90	88,09	83,60	85,39	88,35	88,35	82,96	90,87

Na tabela 6, são apresentados os resultados de recuperação de sílica referentes aos ensaios de flotação convencional.

**TABELA 6**

Valores das Recuperações de sílica para os ensaios de flotação convencional, segundo as condições gerais.

Recuperações de Sílica													
Granulometria		<200#				Global				>200#			
Amina		50g/t Aa		70g/t Aa		50g/t Aa		70g/t Aa		50g/t Aa		70g/t Aa	
%Sílica		20%	30%	20%	30%	20%	30%	20%	30%	20%	30%	20%	30%
%Sólidos	40%	91,50	91,75	93,80	94,30	89,16	88,03	93,53	92,11	89,25	78,72	86,06	84,62
	50%	88,79	92,33	90,94	90,77	90,66	83,45	79,39	94,58	70,80	61,64	83,41	82,64

Na tabela 7, são apresentados os resultados de recuperação de ferro referentes aos ensaios de flotação em coluna.

**TABELA 7**

Valores das Recuperações de ferro para os ensaios de flotação em coluna, segundo as condições gerais.

<b>Recuperações de Ferro</b>												
<b>Granulometria</b>	<b>&lt;200#</b>				<b>Global</b>				<b>&gt;200#</b>			
<b>Amina</b>	<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>	
<b>%Sílica</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>										
<b>40% Sólidos</b>	94,63	92,07	78,50	63,43	48,74	47,25	35,37	44,89	72,08	72,37	74,24	79,31

Na tabela 8, são apresentados os resultados de recuperação de sílica referentes aos ensaios de flotação em coluna.

**TABELA 8**

Valores das Recuperações de sílica para os ensaios de flotação em coluna, segundo as condições gerais.

<b>Recuperações de Sílica</b>												
<b>Granulometria</b>	<b>&lt;200#</b>				<b>Global</b>				<b>&gt;200#</b>			
<b>Amina</b>	<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>	
<b>%Sílica</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>										
<b>40% Sólidos</b>	33,81	51,36	81,87	87,43	97,59	96,30	97,67	97,01	96,15	96,32	96,31	97,63

Na tabela 9, são apresentados os resultados dos teores de ferro no flotado, referentes aos ensaios de flotação convencional, para as condições gerais nas quais foram efetuados os ensaios.

**TABELA 9**

Valores dos teores de ferro no flotado para os ensaios de flotação convencional, segundo as condições gerais.

<b>Teores de Ferro no Flotado</b>													
<b>Granulometria</b>	<b>&lt;200#</b>				<b>Global</b>				<b>&gt;200#</b>				
<b>Amina</b>	<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		
<b>%Sílica</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>											
<b>% Sólidos</b>	<b>40%</b>	31,37	23,71	39,60	28,51	40,02	29,59	43,83	31,80	13,66	8,73	16,90	12,67
	<b>50%</b>	36,52	24,60	44,76	32,99	27,97	16,96	26,82	17,97	26,41	20,42	30,44	13,72

Na tabela 10, são apresentados os resultados dos teores de sílica no afundado, referentes aos ensaios de flotação convencional, para as condições gerais nas quais foram efetuados os ensaios.

**TABELA 10**

Valores dos teores de sílica no afundado para os ensaios de flotação convencional, segundo as condições gerais.

<b>Teores de Sílica no Afundado</b>													
<b>Granulometria</b>		<b>&lt;200#</b>				<b>Global</b>				<b>&gt;200#</b>			
<b>Amina</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>	
<b>%Sílica</b>		<b>20%</b>	<b>30%</b>										
<b>% Sólidos</b>	<b>40%</b>	2,59	4,25	2,25	3,31	4,04	6,79	2,79	4,43	2,90	7,32	3,77	6,83
	<b>50%</b>	3,74	4,06	3,79	5,71	2,81	7,57	7,37	2,69	8,00	16,20	4,87	7,81

Na tabela 11, são apresentados os resultados dos teores de ferro no flotado, referentes aos ensaios de flotação em coluna, para as condições gerais nas quais foram efetuados os ensaios.

**TABELA 11**

Valores dos teores de ferro no flotado para os ensaios de flotação em coluna, segundo as condições gerais.

<b>Teores de Ferro no Flotado</b>													
<b>Granulometria</b>		<b>&lt;200#</b>				<b>Global</b>				<b>&gt;200#</b>			
<b>Amina</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>	
<b>%Sílica</b>		<b>20%</b>	<b>30%</b>										
<b>40% Sólidos</b>		26,58	18,49	35,03	33,73	46,02	38,26	49,76	39,35	36,13	28,90	35,41	23,16

Na tabela 12, são apresentados os resultados dos teores de sílica no afundado, referentes aos ensaios de flotação em coluna, para as condições gerais nas quais foram efetuados os ensaios.

**TABELA 12**

Valores dos teores de sílica no afundado para os ensaios de flotação em coluna, segundo as condições gerais.

<b>Teores de Sílica no Afundado</b>												
<b>Granulometria</b>	<b>&lt;200#</b>				<b>Global</b>				<b>&gt;200#</b>			
<b>Amina</b>	<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>		<b>50g/t Aa</b>		<b>70g/t Aa</b>	
<b>%Sílica</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>										
<b>40% Sólidos</b>	14,98	18,10	5,53	7,92	1,26	3,32	1,63	2,76	1,38	1,97	1,24	1,23