

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

**AVANÇOS NA RECUPERAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIOS PELO PROCESSO DE
FLOTAÇÃO “EXTENSORA”, O CASO DA MINA DE CHUQUICAMATA**

Fabiano Capponi

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2005

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

**AVANÇOS NA RECUPERAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIOS PELO PROCESSO DE
FLOTAÇÃO “EXTENSORA”, O CASO DA MINA DE CHUQUICAMATA**

Fabiano Capponi

Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre

2005

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Rubio

Banca Examinadora:

Dr. Elzvir de Azevedo Guerra, Ministério de Ciência e Tecnologia

Dr. Rafael Teixeira Rodrigues-UFRGS-Pesquisador visitante

Prof. Dr. Ivo A. H. Schneider, DEMET-UFRGS

Coordenador do PPGEM

Prof. Dr. Antônio César Faria Vilela

Aos meus pais,
Paulo Umberto Capponi e Ana Maria Nunes Capponi

e à minha afilhada,
Caroline Gutz Pedde Capponi

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jorge Rubio, pela paciência e dedicação como amigo, orientador e professor universitário e principalmente pelo incentivo e confiança, fundamentais em meu crescimento profissional e pessoal;

Aos colegas Elves Matiolo, Rafael Rodrigues, Jaílton Rosa e Maurício Sartori, por todo auxílio, troca de informações, e valiosas sugestões, que fizeram possível a realização deste trabalho, e principalmente pela amizade e companheirismo em vários anos de convivência;

A todos da minha família, em especial meus pais;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro;

A Divisão Codelco Norte e IM2 (“Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia”), pelo fornecimento das amostras e apoio técnico e financeiro para realização deste trabalho;

À Solange Amaral pela atenção amizade e companheirismo;

À professora Maria Luiza, pela orientação, disponibilidade, troca de informações e amizade.

Sem citar nomes para não esquecer de ninguém, todos os colegas do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM);

Ao povo brasileiro e a todos que trabalham pelo ensino e pesquisa no Brasil;

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	VI
RESUMO	VIII
ABSTRACT	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. A Problemática do tratamento de finos de minérios.....	4
2.1.1. Definição de finos (F) e ultrafinos (UF) de minérios	5
2.1.2. Geração de partículas minerais finas	7
2.1.3. Características e comportamento da flotação de partículas finas	8
2.1.4. A Influência do tamanho de partícula na flotação	10
2.1.5. Hidrofobicidade e sua relação com a flotação	15
2.2 Alternativas para o tratamento de F-UF.....	16
2.2.1. Alternativas baseadas em processos de agregação química e física	17
2.3. Flotação Extensora (<i>Extender flotation</i>)	25
2.3.1. Flotação Extensora Convencional.....	28
2.3.2. Flotação Extensora Não convencional	29
2.3.3. Mecanismos envolvidos na flotação extensora.....	29
2.4. Emulsões óleo/água	30
2.5. Generalidades sobre os hidrocarbonetos.....	33
2.4.1. Óleo Diesel.....	35
2.4.2. Querosene	36
3. EXPERIMENTAL	37
3.1. Materiais.....	37
3.1.1. Minério	37
3.2. Métodos.....	41
3.2.1. Ensaio Standard (STD)	41
3.2.2. Estudos de flotação extensora (EXT)	43
3.2.3. Preparo de emulsões óleo/água	46
3.2.4. Procedimentos analíticos para avaliação metalúrgica	49

3.2.5. Estudo dos parâmetros cinéticos	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. Estudos de flotação Standard (STD).....	52
4.1.1. Flotação de sulfetos de cobre	52
4.1.2. Flotação de sulfeto de molibdênio	54
4.1.3. Comparação entre os resultados dos estudos STD com a flotação Rougher primária da usina de Chuquicamata	56
4.2. Estudos de flotação extensora com óleo emulsificado (EXT-OD e EXT-QS)	58
4.2.1. Flotação de sulfetos de cobre.....	58
4.2.2. Flotação de sulfetos de molibdênio.....	62
4.3. Estudos de flotação extensora com óleo Diesel não emulsificado (EXT-ODn) ...	66
4.3.1. Flotação de sulfetos de cobre.....	66
4.3.2. Flotação de sulfetos de molibdênio.....	69
4.4. Avaliação dos resultados nas frações finas e ultrafinas	71
4.5. Considerações Finais	75
5. CONCLUSÕES	78
TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
APÊNDICES	86
Apêndice I. Procedimento dos ensaios STD para os estudos de flotação com minério de Chuquicamata-Chile.....	87
Apêndice II. Técnica utilizada na digestão das amostras utilizadas nos estudos de flotação.....	90
Apêndice III: Procedimentos analíticos para avaliação metalúrgica.....	91
Apêndice IV. Materiais e custos gerais envolvidos para teste industrial de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado na usina de Chuquicamata....	92

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

- a - área superficial das gotas dispersas;
- A - água;
- Ac - alimentação calculada;
- C - concentrado;
- CAI - condicionamento em alta intensidade;
- CVRD - Companhia Vale do Rio Doce;
- Dp - diâmetro de partículas;
- E_c - eficiência de colisão;
- E_{col} - eficiência de coleção;
- EXT - extensora;
- F - partículas finas;
- FAD - flotação por ar dissolvido;
- g - gramas;
- H - altura manométrica,
- K - constante cinética de flotação modelo Klimpel;
- N_c - número de partículas que realmente colidiram coma bolha;
- N_o - número de partículas disponível para colisão;
- O - óleo;
- OD - óleo Diesel emulsificado;
- ODn - óleo Diesel não emulsificado;
- PAX - amil xantato de potássio;
- PAH's - hidrocarbonetos poliaromáticos;
- PTR - planta de tratamento de rejeitos;
- Q - fluxo do fluido a ser bombeado;
- QS - querosene emulsificado;
- R - recuperação;
- R_c - raio crítico;
- Rj - rejeito;
- S_b - área superficial de bolhas;
- STD - ensaio Standard ou padrão;
- t - tonelada;
- T - teor;
- t_i - tempo de indução;

t_r – tempo de ruptura;

UF – partículas ultrafinas;

α - módulo de distribuição;

ΔW - trabalho reversível necessário para dispersar dois sistemas sobre condições isotermais;

ε - eficiência;

ρ - densidade;

ϕ - diâmetro;

γ_{LG} – tensão superficial na interface líquido-gás;

γ_{SG} – tensão superficial na interface sólido-gás;

γ_{SL} – tensão superficial na interface sólido-líquido;

γ_{OA} é a tensão interfacial óleo-água;

θ - ângulo de contato;

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Comparação entre a recuperação de cobre total e das frações UF (< 13 μm) da usina de Chuquicamata - Divisão Codelco Norte - Chile, no ano 2001 (dados fornecidos pela Superintendência Metalúrgica de Chuquicamata).	5
Figura 2.2. Relação entre as propriedades físicas e químicas das partículas finas e seu comportamento na flotação. T e R indica se o fenômeno afeta o teor e/ou a recuperação, respectivamente. As flechas indicam os vários fatores que contribuem para um particular fenômeno observado na flotação de partículas finas (adaptada de Subrahmanyam e Forssberg, 1990).	8
Figura 2.3. Efeito do diâmetro de partícula na recuperação e cinética de flotação.	11
Figura 2.4. Fenômeno de “captura” (colisão + adesão) de uma partícula dentro do raio crítico R_c e trajetórias de partículas de vários tamanhos e densidades, (1) não-inercial, (2) Browniana, (3) fracamente inercial, (4) fortemente inercial, (5) linha de fluxo.....	13
Figura 2.5. Representação esquemática do ângulo de contato entre as três fases: sólido, líquido e gasosa em equilíbrio.....	15
Figura 2.6. Aumento do tamanho de partículas via técnicas de agregação seletiva para aumento da recuperação por flotação.	18
Figura 2.7. Flotação extensora Clássica. (a) O coletor se dissolve no óleo com sua parte polar voltada para a solução; (b) O coletor com sua parte polar interage com a partícula estabelecendo um maior ângulo de contato.	28
Figura 2.8. Fenômenos envolvidos no processo de flotação extensora. (a) Interação gota/partícula; espalhamento do óleo e formação de uma lente; (b) adesão bolha/gota/partícula.	30
Figura 2.9. Fenômeno de agregação entre as partículas e UF recobertas por um filme de óleo e adesão bolha partícula.	30
Figura 2.10. Exemplos de cicloalcanos. Hidrocarbonetos de cadeia fechada ou cíclica que apresentam ligações simples entre átomos de carbono.....	34
Figura 2.11. Benzeno: exemplo de hidrocarboneto aromático.....	35
Figura 3.1. Fluxograma de moagem e classificação utilizado na preparação das amostras. ...	38
Figura 3.2. Distribuição de massa e de cobre na amostra de minério de cobre de Chuquicamata, usando peneiras comuns e micropeneiras.	39
Figura 3.3 Comparação entre a distribuição granulométrica de massa das amostras de flotação produzidas no LTM com valores da etapa de flotação Rougher primária da usina de Chuquicamata.....	40
Figura 3.4. Comparação entre a distribuição granulométrica de cobre das amostras de flotação produzidas no LTM com valores da etapa de flotação Rougher primária da usina de Chuquicamata.....	40
Figura 3.5. (a) imagem da célula utilizada nos estudos de flotação e (b) transbordo do concentrado no primeiro minuto de flotação.	42
Figura 3.6. Fluxograma simplificado dos estudos de flotação.	43

Figura 3.7 Tamanho de gota das emulsões de óleo Diesel e querosene gerados pelo agitador Turrax. [Óleo] = 6000 mg.L ⁻¹	45
Figura 3.8. Fluxograma dos estudos de flotação com injeção de óleo emulsificado.....	45
Figura 3.9. Desenho esquemático dos sistemas utilizados para geração das emulsões.....	46
Figura 3.10. Tamanho de gota das emulsões óleo Diesel/água, geradas pelo agitador Turrax e pela bomba helicoidal em função da perda de carga ocasionada pela válvula agulha. [Óleo Diesel] = 6000 mg.L ⁻¹	47
Figura 3.11. Diâmetro médio volumétrico de gotas das emulsões óleo/água em função da perda de carga na válvula agulha. Condições: Vazão de água oleosa de 37,5 L.min ⁻¹ ; [Petróleo] = 150 mg.L ⁻¹ (Rosa, 2002).	48
Figura 3.12 Diferenças de aspecto do óleo antes e após emulsificação [óleo Diesel] = 6000 g.L ⁻¹	48
Figura 4.1. Recuperação metalúrgica de cobre em função do tempo de flotação nos estudos de flotação STD.	53
Figura 4.2. Relação teor/recuperação na flotação de sulfetos de cobre nos estudos de flotação STD.	54
Figura 4.3. Recuperação metalúrgica de molibdênio em função do tempo de flotação nos estudos de flotação STD.	55
Figura 4.4. Relação teor/recuperação na flotação de sulfetos de molibdênio nos estudos de flotação STD.....	56
Figura 4.5. Recuperação acumulada de sólidos em função do tempo da flotação. Comparação entre os resultados de flotação da etapa Rougher primária da usina de Chuquicamata com os resultados obtidos nos estudos de flotação STD.....	57
Figura 4.6. Recuperação metalúrgica de cobre em função do tempo da flotação. Comparação entre os resultados de flotação da etapa Rougher da usina de Chuquicamata com os resultados obtidos nos estudos de flotação STD.....	57
Figura 4.7. Recuperação metalúrgica de cobre em função do tempo de flotação. Efeito da adição de óleo Diesel e querosene emulsificado.	59
Figura 4.8. Efeito da adição de óleo emulsificado na recuperação final cobre.....	60
Figura 4.9. Efeito da adição de óleo emulsificado na recuperação real de cobre.....	60
Figura 4.10. Efeito da adição de óleo emulsificado no teor de cobre nos rejeitos.	60
Figura 4.11. Curva de teor/recuperação de cobre para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado.	61
Figura 4.12. Efeito da adição de óleo emulsificado na constante cinética de flotação de cobre (Modelo Klimpel) em comparação com o STD.....	61
Figura 4.13. Recuperação metalúrgica de Mo em função do tempo de flotação. Efeito da adição de óleo Diesel e querosene emulsificado.	63
Figura 4.14. Efeito da adição de óleo emulsificado na recuperação metalúrgica de molibdênio no final da flotação.....	63
Figura 4.15. Efeito da adição de óleo Diesel e querosene emulsificado na recuperação real de molibdênio.	64

Figura 4.16. Efeito da adição de óleo emulsificado no teor de molibdênio nos rejeitos dos estudos em comparação com o STD.....	64
Figura 4.17. Curva de teor/recuperação de molibdênio para os estudos de flotação como injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado.	65
Figura 4.18. Efeito da adição de óleo emulsificado na constante cinética de flotação de molibdênio (Modelo Klimpel) em comparação com o STD.....	65
Figura 4.19. Recuperação acumulada de cobre em função do tempo da flotação. Comparação entre EXT-ODn e STD. [Óleo Diesel não emulsificado] = 90 g.t ⁻¹	67
Figura 4.20. Efeito da injeção de óleo Diesel não emulsificado na recuperação metalúrgica de cobre no nono minuto de flotação. [Óleo Diesel não emulsificado] = 90 g.t ⁻¹	68
Figura 4.21. Efeito da adição de óleo Diesel não emulsificado na constante cinética de flotação de cobre (Modelo Klimpel). [óleo Diesel] = 90 g.t ⁻¹	68
Figura 4.22. Recuperação acumulada de molibdênio em função do tempo da flotação. Comparação entre EXT-ODn e STD. [Óleo Diesel não emulsificado] = 90 g.t ⁻¹	69
Figura 4.23. Efeito da injeção de óleo Diesel não emulsificado na recuperação metalúrgica de molibdênio no nono minuto de flotação. [Óleo Diesel não emulsificado] = 90 g.t ⁻¹	70
Figura 4.24. Efeito da adição de óleo Diesel não emulsificado na constante cinética de flotação de molibdênio (Modelo Klimpel). [óleo Diesel] = 90 g.t ⁻¹	70
Figura 4.25. Recuperações metalúrgicas de Cu e Mo nos concentrados ao final da flotação, por faixa granulométrica nas frações F e UF (separadas em micropeneiras).	71
Figura 4.26. Efeito do óleo na estrutura da espuma. (a) penetração de gotas de óleo nas “lamelas” das bolhas na espuma; (b) Movimento da gota nos espaços vazios das lamelas e transferência à interface ar/água.	74
Figura 4.27. Desenho esquemático da zona de espuma para os estudos de flotação STD, EXT-OD 120 e EXT-ODn 90.	75
Figura 4.28. Fluxograma simplificado para implantação da técnica de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado na etapa Rougher da usina de Chuquicamata.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Intervalo de tamanho para recuperação por flotação de diferentes minerais reportados por diversos trabalhos, em função da escala de operação (Subrahmanyam e Forssberg, 1990).	6
Tabela 2. Grau de arraste hidrodinâmico para diferentes minerais, reportados por diversos trabalhos, em função do tamanho de partícula (Subrahmanyam e Forssberg, 1990).	9
Tabela 3. Propriedades físicas e físico-químicas de interesse em estudos de flotação de partículas finas e ultrafinas.....	10
Tabela 4. Situação atual das alternativas para o tratamento partículas F e UF.	16
Tabela 5. Alternativas emergentes para e aumento na recuperação das frações F-UF de minérios.....	17
Tabela 6. Distintas aplicações de óleos na floculação e flotação de minerais.	25
Tabela 7. Classificação das emulsões óleo/água em função do tamanho médio de gotas.	31
Tabela 8. Condição de moagem para produção das amostras para os estudos de flotação.....	38
Tabela 9. Distribuição mássica e de cobre na amostra da alimentação.	39
Tabela 10. Denominação dada aos estudos de flotação.	43
Tabela 11. Características dos óleos utilizados nos estudos de flotação.....	44
Tabela 12. Características do tamanho de gotas das emulsões óleo Diesel/água gerado nos métodos estudados.	47
Tabela 13. Teores de cobre analisados na alimentação calculada, concentrado e rejeito para os quatro ensaios Standard LTM.	49
Tabela 14. Teores de molibdênio analisados na alimentação calculada, concentrado e rejeito para os quatro ensaios Standard.....	49
Tabela 15. Recuperação de massa, água e teor de sólidos no concentrado final para os estudos de flotação STD.	52
Tabela 16. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Cu na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética de flotação (K-modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação STD.	53
Tabela 17. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Mo na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação STD.	55
Tabela 18. Recuperação de massa, água e teor de sólidos no concentrado final para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado em comparação com o STD.....	58
Tabela 19. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Cu na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética K (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação EXT OD e QS em comparação com o STD.....	59

Tabela 20. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Mo na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética K (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação EXT-OD em comparação com o STD.....	62
Tabela 21. Recuperação de massa, água e teor de sólidos no concentrado final para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel não emulsificado em comparação com o STD.....	66
Tabela 22. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Cu na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética K (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação EXT-ODn em comparação com o STD.....	67
Tabela 23. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Mo na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética K (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação EXT-ODn em comparação com o STD.....	69
Tabela 24. Recuperações metalúrgicas de Cu e Mo nos concentrados ao final da flotação, por faixa granulométrica nas frações F e UF.	71
Tabela 25. Ganhos esperados de recuperação de cobre nas frações F-UF utilizando a técnica de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado na usina de Chuquicamata.	77

RESUMO

O trabalho apresenta resultados comparativos, em escala de laboratório, de recuperação de sulfetos de cobre e molibdênio e inclui uma análise detalhada do estado da arte na flotação de partículas minerais finas (“F” 40 a 13 μm) e ultrafinas (“UF” < 13 μm) utilizando a técnica de flotação extensora (“extender flotation”) com diferentes tipos de óleos minerais. Os estudos foram realizados utilizando minério da usina concentradora da Mina Chuquicamata – Chile / Divisão Codelco Norte e visaram o aumento da recuperação de Cu e Mo nas frações F-UF sem comprometer a recuperação das outras frações nem a qualidade do concentrado. No processo de flotação extensora, óleos não polares são utilizados na forma não emulsificada ou emulsificada (para aumentar sua difusão em solução aquosa) em concentrações da ordem de 20-120 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ juntamente com os coletores tradicionais. A palavra “extensora” refere-se ao fenômeno de espalhamento do óleo em superfícies hidrofóbicas, causando um aumento significativo na hidrofobicidade das partículas, e tem o sentido de extensão de uma película superficial sobre as partículas. Foram avaliados parâmetros químicos (tipo e concentração de óleo adicionado juntamente com os coletores convencionais), físicos (diâmetro de gotas dos óleos emulsificados), e operacionais (aspectos na geração de emulsões). Os resultados foram comparados com ensaio que simula o comportamento da flotação Rougher primária da empresa que processa os sulfetos (ensaio Standard - STD) e avaliados em termos de recuperações metalúrgicas, teores totais de Cu e Mo (concentrados e rejeitos), recuperação real (*true flotation*), constante cinética de flotação (K - modelo Klimpel) e grau de arraste hidrodinâmico das partículas de valor. Os melhores resultados foram encontrados na flotação extensora usando óleo Diesel emulsificado (> 60 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$). As recuperações de Cu variaram entre 85 - 90 % (84 % no STD), com teores de Cu de 14 - 17 % (15 % Cu no STD) e 3,5 - 4,5 min^{-1} para a constante cinética de flotação comparada com 3 min^{-1} no Standard. Para a molibdenita (MoS_2) os resultados apresentaram recuperações superiores a 78 % (72,6 % no STD) e ganho de recuperação real superior a 7 %. A adição de querosene emulsificado apresentou menores ganhos em relação ao óleo Diesel, que foram explicados pela interação existente entre os grupos naftênicos do Diesel e os sítios hidrofóbicos dos sulfetos. A flotação extensora com injeção de óleo Diesel não emulsificado mostrou redução significativa na constante cinética de flotação e não apresentou ganhos significativos na recuperação de Cu e Mo em comparação com o STD e resultados inferiores quando comparados com os ensaios EXT com o mesmo óleo emulsificado. Os estudos

permitiram concluir que a técnica de flotação extensora com óleos contendo grupos naftênicos como o óleo Diesel e derivados, na forma emulsificada, aumenta a recuperação das partículas finas e ultrafinas de sulfetos de cobre e molibdênio. A interação das gotículas de óleo com as partículas dos sulfetos, com os coletores já adsorvidos, é caracterizada pela existência de etapas sucessivas de colisão, adesão, formação de lentes, espalhamento das lentes de óleo e agregação entre as partículas. Os resultados são discutidos em termos do aumento da hidrofobicidade e agregação das partículas F-UF por forças de efeito hidrofóbico.

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate, at laboratory scale, the effect of the extender flotation in the recovery by flotation of fines (“F” 40-13 μm) and ultrafines (“UF” < 13 μm) mineral particles of a copper/molybdenum sulphide ore, and compared with a standard mill laboratory procedure (STD). The sulphide ore correspond to the feed in the Rougher flotation stage from the Chuquicamata concentrator plant, of the “Corporación Nacional del cobre del Chile”, Codelco S.A, (Chuquicamata mine – Codelco North Division). Chemical parameters (type and oil concentration added with conventional collectors), physical parameters (emulsified oil drops diameter), and operational (aspects in the emulsion) were evaluated. Results were compared with the mill test that simulates the behaviour of the Rougher flotation of the plant that dresses the sulphide ore (Standard – STD). The main parameters were evaluated through metallurgical recoveries and grades of Cu and Mo (concentrates and tailings), “true” flotation values, process rate constant (Klimpel model) and the degree of hydrodynamic drag. Both oils yielded higher metallurgical efficiencies than the mill standard but better results were obtained with the extender flotation, with emulsified diesel oil (> 60 gt^{-1}) and concentrate recoveries were in the order of 85-90 % (84 % in the STD), 14-17 % Cu grade (15 % Cu in the STD) and 3.5-4.5 min^{-1} for the Klimpel rate constant (compared to 3 min^{-1} in the STD). Compared with the molybdenite (MoS_2) the results yielded recoveries higher than 78 % (72,6 % in the STD) and a true flotation gain higher than 7 %. The emulsified kerosene oil yielded lesser gains compared to the Diesel oil, that may be explained by the interaction between the Diesel naftenic groups and the sulphide hydrophobic sites. The extender flotation with the non emulsified Diesel oil injection did not yielded significative gains in the recovery of Cu and Mo and it did not presented a significative reduction in the rate constant, with a thicker foam zone compared with the extender mill tests with the same emulsified oil. The studies allow to conclude that the extender flotation technique with oils containing naftenic groups as the Diesel oil, in the emulsified form, increases the recovery of F-UF particles of copper/molybdenum sulphide. Results are discussed in terms of the increase of the hydrophobicity and the aggregation of the F-UF particles by hydrophobic forces effect. The interaction of the oil drops with the sulphide particles, with adsorbed collector, is characterized by the existence of the steps of collision, adhesion, lenses formation, oil lenses spread and aggregation among particles.

1. INTRODUÇÃO

O tratamento de partículas minerais finas (“F” 40 até 13 μm) e ultrafinas (UF < 13 μm) ainda constitui um dos principais problemas que afetam a produção da mineração atual. Além da geração involuntária da produção de finos nas etapas de cominuição há uma tendência cada vez mais acentuada de que os minérios a explorar sejam de teores mais baixos e requeiram moagem mais fina para que ocorra a liberação dos minerais de interesse (Lins e Adamian, 2000). Estima-se que 1/3 da produção mundial de fosfatos, 1/6 da de cobre, 1/5 da de tungstênio, 1/2 da produção boliviana de estanho, 1/10 da produção americana de ferro, junto com milhões de toneladas de outros minerais são perdidas nestas frações (Subrahmanyam e Forssberg, 1990; Rubio et al., 2003).

O problema de recuperação de frações finas e ultrafinas tem sido analisado exaustivamente por diversos autores. Collins e Read (1971), Trahar (1981), Sivamohan (1990), Rosa (1997), Rubio et al. (2003) têm demonstrado as dificuldades encontradas no processamento destas partículas, decorrentes de suas características inerentes, ou seja, pequena massa, superfície específica elevada e alta energia superficial. As alternativas para o aumento de recuperação de F-UF são diversas e apresentam um grau diferenciado de eficiência. As existentes são baseadas em novos conceitos de diminuição da geração em planta, de finos e ultrafinos, da otimização da “captura” de partículas por bolhas e do aumento do tamanho das partículas problema. As técnicas com maior potencial são as que empregam CAI seguida de flotação transportadora e/ou autotransportadora (Rubio et al., 2002; Rubio et al., 2004; Bulatovic e Salter, 1989; Rosa, 1997), flotação com maior *hold up* de ar e ampla distribuição de tamanho de bolhas (Rubio et al., 2003; Rodrigues, 2003), flotação “extensora” otimizada (com óleos emulsificados) e novos desenhos de plantas de tratamento de rejeitos.

As alternativas para redução da geração de F-UF em planta são possíveis pelo controle e otimização da britagem, moagem e estágios de remoagem, classificação da alimentação, separando as F-UF das frações grossas e introdução de flotação rápida, *Unit* ou *Rougher-Flash* (Andrade et al., 2002; Mackinnon et al., 2002, McCulloch, 1990), com colunas de flotação de “alto teor” (enriquecedoras).

Outra forma de aumentar a recuperação das partículas F-UF é o uso de óleos não polares juntamente com os demais coletores. As diversas técnicas existentes são classificadas de acordo com a concentração de óleo adicionada (Rubio, 2002) e visam aumentar a

hidrofobicidade e o tamanho das partículas problema através de processos de agregação, facilitando a captura desses agregados pelas bolhas de ar.

No processo de flotação extensora, óleos não polares são utilizados como tal ou na forma de emulsão (para aumentar sua difusão em solução aquosa) em concentrações da ordem de 20-120 g·t⁻¹ juntamente com os coletores tradicionais. A palavra “extensora” refere-se ao fenômeno de espalhamento do óleo em superfícies hidrofóbicas causando um aumento significativo na hidrofobicidade das partículas. Em relação aos microfenômenos que operam, é importante destacar que a característica mais marcante no uso de óleos não é a adsorção e sim uma “interação” entre gotas e partículas. Como as gotas são hidrofóbicas (portanto insolúveis em água), a interação ocorre por forças hidrofóbicas com as partículas que já possuem coletor e inclui etapas de colisão e adesão. Imediatamente após ocorrer a adesão, o óleo (a gota) se “espalha” sobre a superfície da partícula aumentando consideravelmente, a hidrofobicidade. O nível de espalhamento depende do grau de afinidade entre o tipo de óleo (e seus constituintes) e a superfície das partículas minerais. As partículas contendo as películas de óleo podem, sob turbulência, se agregar, aumentar o tamanho das espécies flotáveis via interação hidrofóbica (homoagregação), e resolver o problema de tamanho e flotação incipiente.

O diâmetro das gotas de óleo é outro fator importante na eficiência técnica de flotação extensora. Aumentando a dispersão do óleo na água através da geração de gotículas de óleo, aumenta o número de colisões entre as partículas e as gotas, o que por sua vez, aumenta a recuperação (Rubio et al., 2003, 2004; Matiolo et al., 2004).

Este trabalho teve por objetivo geral avaliar o efeito da flotação extensora, em escala de laboratório, na recuperação de frações finas e ultrafinas de sulfetos de cobre e molibdênio. Foram estudados parâmetros químicos (tipo e concentração de óleo), físicos (diâmetro de gotas dos óleos emulsificados), físico-químicos (hidrofobicidade, grau de agregação) e operacionais (geração de emulsões óleo/água e efeito no tipo e rigidez da espuma) na flotação com adição de óleos combustíveis, emulsificados ou não, juntamente com os coletores tradicionais. Os resultados foram avaliados pelos parâmetros de separação: % R (recuperação), grau de arraste das partículas de valor, flotação real, teor do mineral de valor e constante nominal do processo (modelo Klimpel) e comparados com ensaios padronizados sem a presença de óleos.

Os objetivos específicos na avaliação do efeito da flotação extensora foram:

1. Desenvolver um ensaio padrão que simule as condições da flotação primária de sulfetos Cu e Mo da usina de Chuquicamata - Divisão Codelco Norte ;
2. Avaliar o efeito do tipo e concentração de óleo adicionado juntamente com os coletores convencionais na flotação de sulfetos de Cu e Mo;
3. Avaliar o efeito da emulsificação destes óleos na flotação de sulfetos de Cu e Mo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A Problemática do tratamento de finos de minérios

Um dos principais problemas técnico-econômicos da mineração atual é a baixa recuperação das partículas finas e grossas por flotação. Enquanto na prática as partículas mais grossas podem sofrer uma remoagem, grande parte das partículas minerais finas são perdidas nos rejeitos. Essa faixa de tamanho depende da espécie mineral, escala de operação e concentração de reagentes, por exemplo 6-70 μm para galena, 8-90 μm para esfarelita, 15-60 μm para calcopirita e 20-150 μm para pirita

Diversos autores (Collins e Read, 1971; Trahar e Warren, 1976; Trahar, 1981; Sivamohan e Cases, 1990; Rosa, 1997; Rubio et al., 2003) têm descrito, em detalhe, as dificuldades existentes em relação à flotação. A flotação “convencional” de frações de finos, ultrafinos junto com partículas grossas, é ineficiente por fenômenos que derivam de suas características intrínsecas: pequena massa, alta superfície específica e alta energia superficial.

Os principais problemas que se observam são: baixa probabilidade de colisão e adesão entre partículas e bolhas, dificuldade para superar a barreira energética entre elas, arraste mecânico (*entrainment* e *entrapment*), elevada adsorção de reagentes, rigidez da espuma e uma baixa seletividade na adsorção de reagentes. Todos estes fatores contribuem para uma diminuição da cinética de flotação, uma menor recuperação e seletividade um maior consumo de reagentes. A principal característica das partículas finas responsáveis por sua baixa recuperação tem sido creditado a sua baixa massa, o que torna difícil para elas deixar as linhas de fluxo e colidir com a superfície da bolha.

Os problemas relacionados à flotação de partículas finas não se restringem apenas a sua baixa recuperação, mas também em relação ao efeito negativo de que as partículas induzem na recuperação de partículas de ótima flotabilidade (recobrimento por ultrafinos, *slime coating*). As partículas grossas por sua vez apresentam o problema contrário derivado de sua elevada massa e do baixo grau de liberação (baixa hidrofobicidade).

Revisões dos antecedentes operacionais da usina de Chuquicamata-Chile mostraram que uma parte importante das perdas de cobre na flotação encontra-se na frações abaixo dos 13 μm , isto equivale a quase 18 % do cobre perdido nos rejeitos, o que corresponde a aproximadamente 1.500 toneladas de finos de cobre por mês. A Figura 2.1 mostra uma

comparação entre a recuperação de cobre total e das frações UF (< 13 μm) da usina de Chuquicamata - Divisão Codelco Norte, no ano 2001.

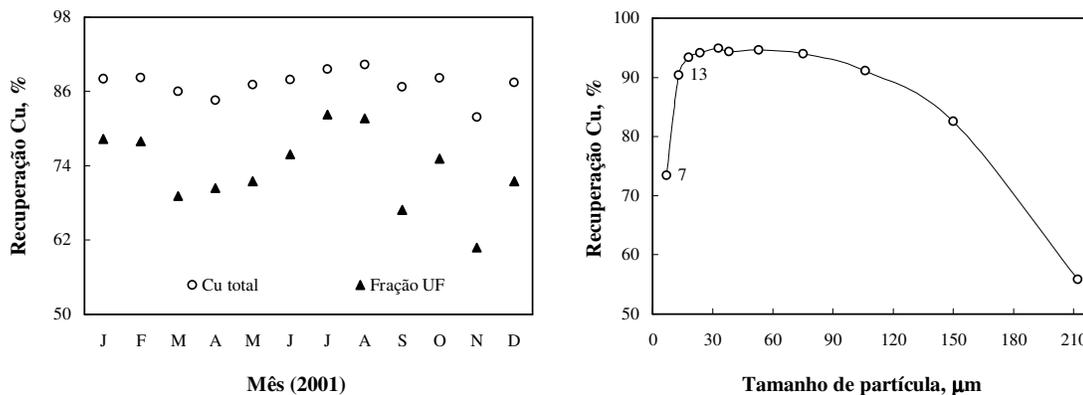


Figura 2.1. Comparação entre a recuperação de cobre total e das frações UF (< 13 μm) da usina de Chuquicamata - Divisão Codelco Norte - Chile, no ano 2001 (dados fornecidos pela Superintendência Metalúrgica de Chuquicamata).

2.1.1. Definição de finos (F) e ultrafinos (UF) de minérios

Os termos finos, ultrafinos (e lamas) são utilizados para designar uma fração granulométrica que apresenta problemas de manuseio, separação, transporte, etc.

Conhecer as particularidades de cada sistema (dispersões, emulsões e suspensões) é fundamental para a escolha das operações e processos adequados para cada sistema de tratamento, conforme o tamanho das partículas, a saber:

- Dispersão coloidal: partículas sólidas com tamanho entre 1 nm e 1 μm . Área superficial específica: 50 - 500 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$;
- Suspensões de partículas ultrafinas: tamanho entre 1 μm e 6 - 13 μm . Área superficial específica: 1 - 50 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$;
- Suspensões de partículas finas: tamanho entre 6 - 13 μm e 75 - 100 μm . Área superficial específica: < 1 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$.

O tamanho a partir do qual as partículas passam a ser consideradas finas, ultrafinas ou lamas varia em função do processo e das próprias características do minério. Para este

trabalho foi denominado finos (F) as partículas no intervalo de 13 a 40 μm e como ultrafinos (UF) as partículas menores do que 13 μm .

Na flotação, que é um dos mais importantes processos para concentração de minerais, o intervalo ótimo de granulometria que apresenta melhor flotabilidade pode variar com o mineral e com a magnitude da operação (laboratório, piloto ou industrial). A Tabela 1 apresenta as faixas de tamanho para recuperação por flotação de diversos minerais, em função da escala de operação.

Tabela 1. Intervalo de tamanho para recuperação por flotação de diferentes minerais reportados por diversos trabalhos, em função da escala de operação (Subrahmanyam e Forssberg, 1990).

Mineral	Intervalo de Tamanho, μm	Escala
Barita	10 - 30	laboratório
Cassiterita	3 - 20	industrial
Fluorita	40 - 110	laboratório industrial
	10 - 90	
	50 - 150	
Galena	37 - 295	laboratório industrial
	13 - 75	
	20 - 100	
Pirita	50 - 100	piloto
Pirita-Pirrotita	20 - 70	laboratório
Quartzo	9 - 50	laboratório
	10 - 40	piloto
Esfalerita	15 - 100	laboratório
	8 - 70	industrial
Wolframita	20 - 50	laboratório

2.1.2. Geração de partículas minerais finas

As partículas minerais finas estão presentes na maioria dos minérios devido às intempéries e à decomposição de componentes rochosos. Subseqüentemente ocorre a geração de finos secundários nos processos de transporte e cominuição. A geração de finos primários é mais comum para minérios não metálicos e minerais oxidados, bem como alguns minérios maciços sulfetados com alteração na gênese. A natureza dos finos depende das características físicas do próprio minério.

A geração de finos secundários é normalmente mais associada ao requerimento de moagem e a performance da classificação, do que às características físicas do minério (último estágio do processo de fragmentação). Neste estágio as partículas são reduzidas, pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado à liberação do material. Cada minério tem uma granulometria ideal para ser moído, dependendo de muitos fatores incluindo a distribuição do mineral útil na ganga e o processo de separação que vai ser usado em seguida. A submoagem do minério resulta num produto grosso com liberação parcial do mineral útil, inviabilizando o processo de concentração. A sobremoagem também não é desejada, pois ela reduz o tamanho das partículas, desnecessariamente, o que acarretará maior consumo de energia e perdas no processo de concentração. A produção de finos secundários é mais comum no processamento de minérios maciços ou semi-maciços sulfetados onde uma moagem muito fina é requerida para alcançar a liberação do mineral de valor. Finos secundários também podem ser gerados em usinas de beneficiamento quando a classificação no circuito de moagem não é eficiente. Normalmente, os minerais pesados acumulam-se na carga circulante do circuito de moagem, submetendo-se a uma moagem maior do que aquela requerida para sua liberação.

Quando um minério é submetido a um processo de cominuição para liberação dos minerais de valor, o produto final é caracterizado por uma determinada distribuição granulométrica, que pode ser representada pela equação de Gaudin/Schuhman:

$$Y = 100 * \left[\frac{X}{X_m} \right]^\alpha \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde Y é a percentagem acumulada de material menor que o tamanho X , X_m é o tamanho máximo teórico da distribuição e α é o módulo da distribuição. Quanto menor o valor de α maior a proporção de finos no material analisado.

2.1.3. Características e comportamento da flotação de partículas finas

O comportamento das partículas finas nos processos de flotação tem sido investigado por vários autores (Trahar e Warren, 1976; Fuerstenau et al., 1979; Trahar, 1981; Warren, 1985; Subrahmanyam e Forssberg, 1990; Rosa, 1997; Rubio et al., 2003). A Figura 2.2 ilustra os efeitos adversos a presença de partículas finas nos circuitos de flotação.

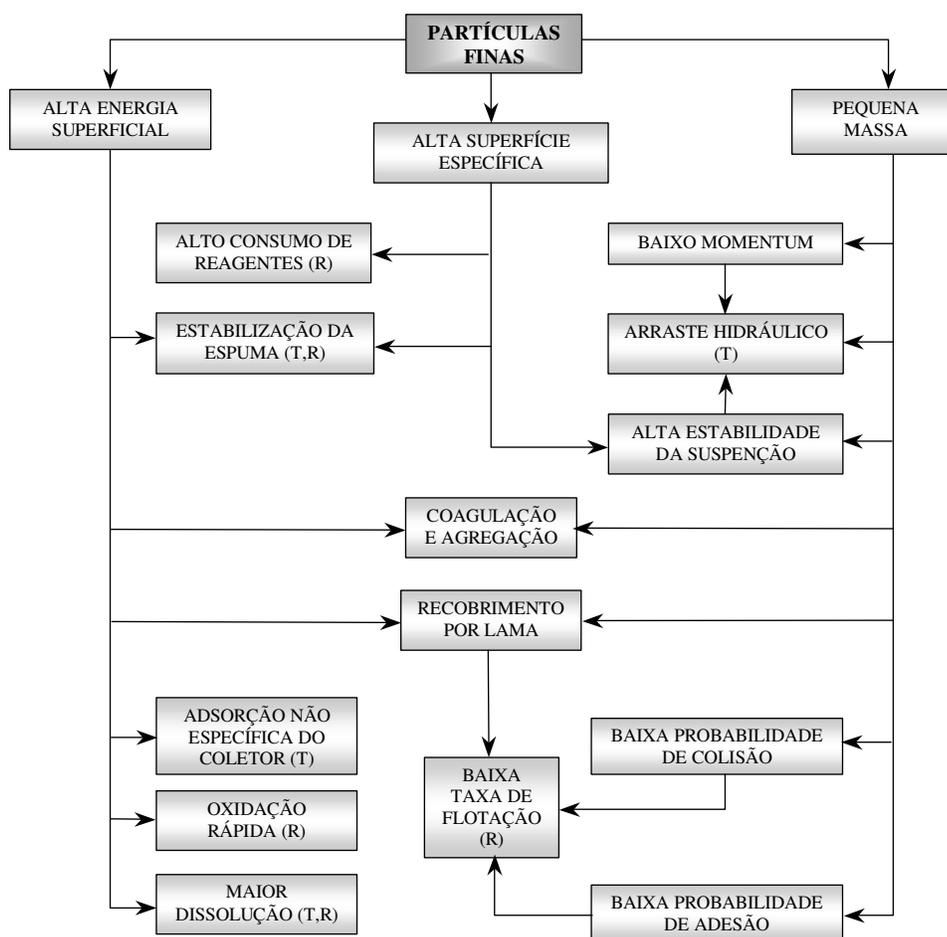


Figura 2.2. Relação entre as propriedades físicas e químicas das partículas finas e seu comportamento na flotação. T e R indica se o fenômeno afeta o teor e/ou a recuperação, respectivamente. As flechas indicam os vários fatores que contribuem para um particular fenômeno observado na flotação de partículas finas (adaptada de Subrahmanyam e Forssberg, 1990).

Devido à pequena massa, as partículas finas apresentam: baixo momento de inércia (quantidade de movimento); heterocoagulação; arraste hidrodinâmico ao concentrado; baixa probabilidade de colisão e dificuldade em superar a barreira energética entre partícula e bolha e entre as próprias partículas.

Um outro problema relacionado com as partículas finas é a sua alta energia superficial. Esta energia é devida principalmente a imperfeições durante a cristalização, aumento das fendas e deslocamento de bordas na superfície da partícula, assim como a presença de outros sítios superficiais de alta energia. Como resultado desta alta energia superficial, as partículas finas apresentam problemas de adsorção não específica de reagentes, alta hidratação, rápida reação superficial, aumento da solubilidade e um indesejável recobrimento das partículas de valor por partículas ultrafinas de ganga (*slime coating*). Todos estes fatores contribuem para uma diminuição da cinética de flotação, uma menor recuperação e um maior consumo de reagentes.

Normalmente as partículas finas com tamanho menor que 10 micrômetros têm baixa eficiência de colisão com bolhas de ar e são susceptíveis ao mecanismo de arraste hidrodinâmico. Este não distingue entre partículas hidrofílicas e partículas hidrofóbicas e está estreitamente relacionado com a recuperação de água. Alguns trabalhos (Trahar, 1981; Warren, 1985; Subrahmanyam e Forssberg, 1990) observaram uma relação linear entre a recuperação de água e de mineral. Warren também introduziu os conceitos de grau de arraste hidrodinâmico e recuperação real, recuperação obtida somente através do mecanismo bolha/partícula. A Tabela 2 apresenta o grau de arraste para diferentes minerais. Pode ser observado que com o decréscimo do tamanho da partícula o arraste hidrodinâmico torna-se o mecanismo dominante de coleção de partículas.

Tabela 2. Grau de arraste hidrodinâmico para diferentes minerais, reportados por diversos trabalhos, em função do tamanho de partícula (Subrahmanyam e Forssberg, 1990).

Mineral	Tamanho de Partícula, μm	Grau de Arraste hidrodinâmico
Quartzo	3,5	0,72
	>40	0,10
Sílica	<12	0,99
Carvão	<38	1,00
Ganga Fina	<40	0,78
Ganga Ultrafina	-	0,87

A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas e físico-químicas de interesse em estudos de flotação de partículas finas e ultrafinas.

Tabela 3. Propriedades físicas e físico-químicas de interesse em estudos de flotação de partículas finas e ultrafinas.

Físicas	Físico-Químicas
Tamanho e distribuição de tamanhos	Carga e potencial superficial
Forma e textura	Hidrofobicidade
Porosidade	Hidrofilicidade
Mineralogia	Solubilidade (interação sólido/líquido)
Área Superficial	
Movimento Browniano	Estabilidade de sedimentação

2.1.4. A Influência do tamanho de partícula na flotação

O efeito do tamanho de partícula na flotação tem sido investigado experimentalmente através dos parâmetros cinética de flotação (k , min^{-1}) e medidas de eficiência de coleção (E_{col}). Os estudos experimentais relativos ao efeito do tamanho de partícula na cinética de flotação têm apresentado resultados contraditórios, embora geralmente indiquem uma diminuição na cinética de flotação com decréscimo do tamanho de partícula.

As curvas de eficiência de flotação em função do tamanho de partículas têm a forma aproximada de um “sino” normalmente apresentando um máximo para certo intervalo e ineficiência nos dois extremos (Figura 2.3). O decréscimo de eficiência no intervalo de partículas grossas se explica pela capacidade de transporte das bolhas enquanto que as perdas nas frações mais finas são funções de uma série de micro fenômenos que diminuem a captura de partículas por bolhas.

A baixa flotação das partículas grossas está relacionada ao estágio de ascensão e forças que atuam sobre agregado bolha/partícula. Se o tamanho de partícula for de tal ordem que as forças de ruptura (*detachment*) bolha-partícula forem superiores as forças de adesão (*attachment*), as partículas não permaneceram aderidas à superfície da bolha. Segundo Klassen e Mokrousov (1963), a força de ruptura depende do peso da partícula na terceira potência, enquanto que a força de adesão aumenta em primeira ordem.

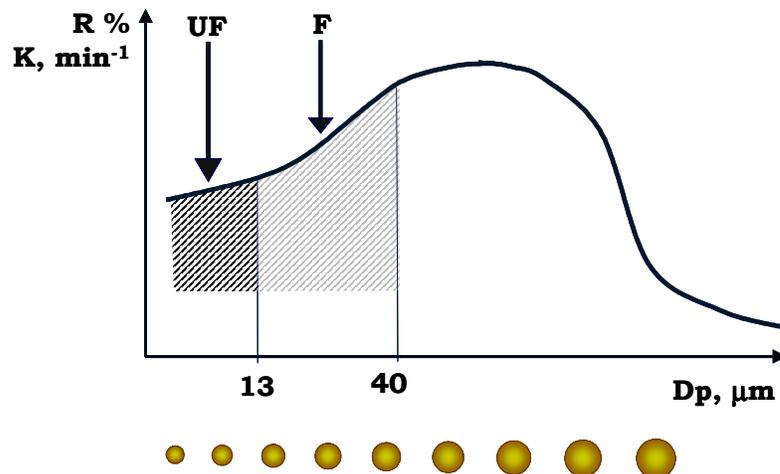


Figura 2.3. Efeito do diâmetro de partícula na recuperação e cinética de flotação.

Segundo Anfruns (1976), os estágios de adesão e ascensão bolha/partícula podem ser favorecidos pela redução do tamanho de partícula. O estágio de colisão, ao contrário, é favorecido por um aumento no tamanho de partícula. A probabilidade de flotação, que é obtida pela combinação destes três estágios, apresentará uma recuperação ineficiente nos dois extremos da faixa de tamanho de partículas. Assim, para partículas pequenas, a flotação pode ser prejudicada pela baixa eficiência no estágio de colisão, enquanto que para partículas grossas, a baixa eficiência nos estágios de adesão e/ou ascensão é fator responsável pelo baixo desempenho da flotação.

Os estágios de colisão e adesão são particularmente importantes visto que o primeiro determina a máxima cinética de flotação (transferência de partículas da polpa para espuma) e o segundo representa um estágio onde alguma redução deste máximo pode ser esperada.

A agregação é importante na flotação quando se trata da remoção de partículas finas, as quais apresentam baixa eficiência de coleção. No caso da flotação para enriquecimento de minerais, a agregação de partículas de tipos diferentes (heterocoagulação) é prejudicial à seletividade do processo. No tratamento de águas, esgotos, e efluentes em geral, a agregação leva ao aumento da eficiência de coleção e conseqüentemente ao aumento da cinética do processo.

2.1.4.1. Efeito do tamanho de partícula na colisão

Na teoria da flotação, a colisão é descrita como o processo de aproximação de uma partícula à superfície de uma bolha de forma que as forças superficiais sejam capazes de atuar. Esta aproximação deve-se principalmente a forças de natureza mecânica e hidrodinâmica para partículas maiores do que 10 μm . Não existe uma teoria quantitativa que inclua ao mesmo tempo a influência da concentração de sólidos, distribuição de tamanho de bolhas e partículas, sob condições de regime laminar ou turbulento. Experimentalmente tem sido possível medir esta “probabilidade” através da eficiência de colisão (E_c), definida pela equação:

$$E_c = \frac{N_c}{N_o} \quad (\text{Eq. 2})$$

Segundo Anfruns (1976), este parâmetro é igual à razão entre o número de partículas que realmente colidiram com a bolha (N_c) e o número de partículas disponíveis para a colisão (N_o), localizadas acima da bolha e dentro de uma coluna de raio crítico, R_c . A E_c define a capacidade de uma bolha de "capturar" ou coletar partículas dentro do R_c . Esta definição para eficiência de colisão não é estritamente o termo probabilidade porque pode assumir valores maiores do que um, pois o termo N_o somente inclui as partículas que estão verticalmente acima da bolha.

A Figura 2.5 mostra as linhas de fluxo (5) e a trajetória de partículas próximo a uma bolha em ascensão. Se a partícula for pequena e (ou) a sua densidade próxima da densidade do líquido, esta seguirá as linhas de fluxo ao redor da bolha (trajetória 1) ou, então, a colisão ocorrerá via mecanismo de interceptação, ou seja, somente quando as partículas seguirem as linhas de fluxo que levam ao contato com a superfície da bolha. No caso de partículas coloidais, o movimento Browniano pode sobrepor-se a trajetória, como mostrado pela trajetória 2. Quando os efeitos inerciais começam a aparecer, as partículas desviam suavemente da trajetória definida pelas linhas de fluxo (curva 3). Finalmente, as partículas grandes e (ou) mais densas possuem inércia suficiente para vencer as linhas de fluxo e colidir com a superfície da bolha pelo impacto direto, também chamado de colisão inercial, como mostra a curva 4.

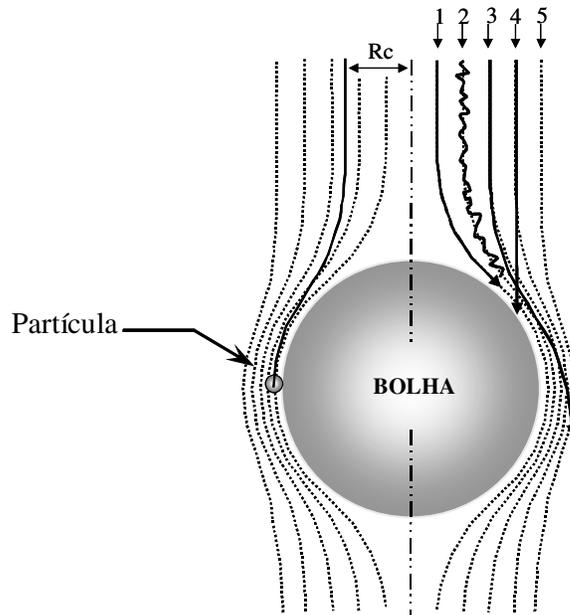


Figura 2.4. Fenômeno de “captura” (colisão + adesão) de uma partícula dentro do raio crítico R_c e trajetórias de partículas de vários tamanhos e densidades, (1) não-inercial, (2) Browniana, (3) fracamente inercial, (4) fortemente inercial, (5) linha de fluxo.

A linha de fluxo crítica (trajetória limite ou crítica) é aquela em que uma partícula se movimentando segundo a mesma e apenas tangencia, sem colidir, a superfície da bolha. Supõe-se que todas as partículas localizadas dentro deste raio crítico (R_c) colidirão com a superfície da bolha.

A probabilidade de colisão é, portanto, função do movimento relativo de partículas e bolhas, controlado pelos seguintes fatores:

1. Força de cisalhamento produzido pelo movimento relativo entre o líquido e as partículas (F_d);
2. Força de atração gravitacional, com maior importância para partículas densas, de tamanho intermediário e partículas grossas;
3. A inércia e/ou momento das partículas (partículas grossas);
4. A difusão ou movimento browniano (partículas ultrafinas).

2.1.4.2. Efeito do tamanho de partícula na adesão

A adesão bolha-partícula é a etapa (micro processo) mais importante da flotação e depende de uma série de características do sistema de flotação, incluindo tamanho de bolha,

tamanho de partícula, propriedades superficiais da fase dispersa, temperatura, propriedades físico-químicas da fase contínua e condições hidrodinâmicas. Para que ocorra a adesão é necessário o deslocamento do filme líquido da superfície mineral pela bolha de ar. Este fenômeno ocorre somente se a força resultante entre a superfície e a bolha de ar é de caráter atrativo, condição que é determinada pela hidrofobicidade da superfície. No entanto, além deste critério puramente termodinâmico, existe uma condição de tipo cinética para que ocorra a adesão, isto é, que o tempo de contato entre bolha e partícula seja maior que o tempo de indução (tempo necessário para o afinamento e deslocamento do filme hidratado da superfície).

A adesão envolve as seguintes etapas:

1. Indução, tempo que leva após a colisão de se localizar no ponto onde ocorre a adesão propriamente dita. t_i = tempo de indução é da ordem de milissegundos e depende do ângulo de contato θ , das forças interfaciais e da energia de colisão e inclui o adelgaçamento inicial do filme ou película líquida;

2. Ruptura do filme ou película líquida. t_r = tempo de ruptura é da ordem de microssegundos e depende basicamente do ângulo de contato;

3. Deslocamento do filme até o ponto de equilíbrio (restauração do equilíbrio) (ou tempo de expansão da linha trifásica). O tempo t_d de deslocamento do filme é da ordem dos milissegundos e depende do θ , do tipo de tensoativo e da rugosidade (*roughness*) das partículas.

A "captura" portanto aumenta com a diminuição do tamanho de bolhas e com o aumento do tamanho de partículas, depende do fluxo da área superficial de bolhas disponível (*lifting power*), de parâmetros hidrodinâmicos (peso no campo gravitacional, pressão hidrostática e capilaridade, tensão, compressão e forças de cisalhamento), fatores termodinâmicos associados à interação hidrofóbica entre bolhas e partículas e de fatores cinéticos como a energia mínima de colisão para destruir a camada líquida de água que antecede a adesão.

2.1.4.3. Efeito do tamanho de partícula na estabilidade dos agregados

Este fator inclui os subprocessos que seguem à captura, ou seja, os de ascensão das unidades bolha-partícula e sua recuperação como produto flotado. Dois são os principais fatores nesta etapa: um fator relacionado com a resistência ao cisalhamento na ascensão entre

as próprias partículas, e outro, com o fenômeno de ruptura via colapso das unidades bolha-partícula. Nesta capacidade de transferência, influem o tamanho dos flocos ou coágulos formados (quanto maior, menor é a probabilidade de permanecer no produto flotado), a concentração de sólidos, viscosidade e densidade da polpa, a altura da camada flotada, a turbulência, fricção, velocidade de ascensão das bolhas e o tipo de célula, convencional ou coluna.

2.1.5. Hidrofobicidade e sua relação com a flotação

A hidrofobicidade de um sólido pode ser avaliada diretamente pelo ângulo de contato θ entre as fases sólida, líquida e gasosa. Quando este ângulo, medido por convenção na fase líquida, é estabelecido, admite-se que o equilíbrio foi atingido entre as interfaces sólido-líquido, sólido-gás e gás-líquido, estando as mesmas mutuamente saturadas. Se o ângulo θ apresentar valores elevados, as bolhas espalham-se sobre a superfície e, portanto, o sólido que não foi molhado pelo líquido (meio aquoso) é considerado hidrofóbico. A Figura 2.5 ilustra a linha de contato entre as três fases: sólido, líquido e vapor.

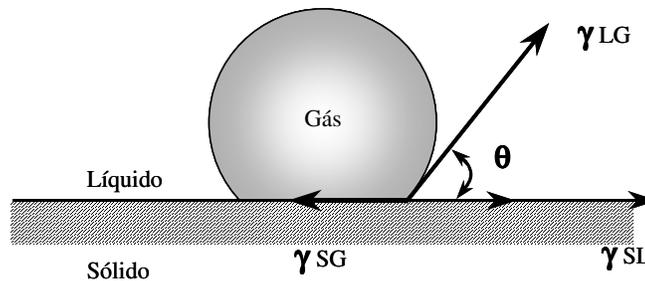


Figura 2.5. Representação esquemática do ângulo de contato entre as três fases: sólido, líquido e gasosa em equilíbrio.

A equação de Young estabelece a condição termodinâmica de equilíbrio entre as interfaces envolvidas, onde o ângulo de contato θ depende da tensão superficial ou energia livre superficial, γ , das três interfaces:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cos \theta \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

γ_{SG} – tensão superficial na interface sólido-gás;

γ_{SL} – tensão superficial na interface sólido-líquido;

γ_{LG} – tensão superficial na interface líquido-gás.

A equação de Youg é válida para um sistema ideal, onde todos os efeitos gravitacionais estão ausentes e as três fases em equilíbrio.

2.2 Alternativas para o tratamento de F-UF

As técnicas emergentes existentes para o aumento da recuperação de partículas F e UF são baseadas em novos conceitos da otimização da “captura” de partículas por bolhas e do aumento do tamanho das partículas problema. Estas podem ser implementadas em usinas de concentração ou de tratamento de rejeitos. As técnicas com maior potencial são as que empregam condicionamento em alta intensidade (CAI) seguida de flotação transportadora, flotação com maior *hold up* de ar, com uso de bolhas (com ou sem modificação de carga) de menor tamanho em células convencionais, flotação extensora (*extender flotation*) e novos desenhos de plantas de tratamento de rejeitos.

O aumento da recuperação por flotação das frações F-UF por agregação das partículas tem um grande potencial, mas é necessário uma boa compreensão de todos os aspectos básicos envolvidos. A Tabela 4 resume a situação das alternativas estudadas para o tratamento partículas F e UF.

Tabela 4. Situação atual das alternativas para o tratamento partículas F e UF.

Processo	Laboratório	Piloto	Industrial
Aglomeração esférica (com óleos)			?
Floculação com alto cisalhamento			?
Agregação hidrofóbica		?	
Extração líquido-líquido			?
Flotação com ampla distribuição de tamanho de bolhas			?
Condicionamento em alta intensidade			?
Floculação seletiva			
Flotação “extensora”			

(O sinal de interrogação significa falta de informação sobre a existência ou continuidade dos processos que têm sido reportados).

As técnicas com maior potencial para diminuição de geração e aumento na recuperação das frações F-UF de minérios são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Alternativas emergentes para e aumento na recuperação das frações F-UF de minérios.

Alternativas	Considerações
Alternativas para redução da geração de F-UF, em planta (remoagem de concentrados Rougher)	i) controle e otimização da britagem, moagem e estágios de remoagem; ii) classificação da alimentação e flotação em separado das F-UF e das frações grossas; iii) introdução de flotação rápida, <i>Unit</i> ou <i>Rougher-Flash</i> com células convencionais; iv) introdução de flotação rápida, com colunas de flotação de “alto teor” (enriquecedoras).
Alternativas fora da usina de tratamento, em plantas de tratamento de rejeitos-PTR.	Estas alternativas são baseadas em novo <i>design</i> de plantas de tratamento de rejeitos-PTR. As modernas PTR deveriam incluir as alternativas anteriores (CAI-F-Ext) e colunas de flotação que operem com altas taxas de enriquecimento visando a obtenção de concentrados com teores vendáveis .
Alternativas para aprimorar a “coleta ou captura” de partículas por bolhas	i) flotação com injeção de bolhas de menor tamanho que as produzidas em células convencionais de flotação; flotação com maior <i>hold up</i> de ar (taxa volumétrica de ar) ou com maior taxa de área superficial de bolhas, S_b (m^2 de bolhas/ m^2 equipamento por unidade de tempo); ii) CAI ou condicionamento em alta intensidade como etapa pré-flotação. (Rosa et al., 1998, Valderrama, 1995, 1997, 1998); iii) flotação extensora (com adição extra de óleos emulsificados). Aumento da hidrofobicidade e agregação das partículas F-UF por forças de efeito hidrofóbico, após contato e interação das gotículas de óleo com as partículas de minério que já possuem coletor.

2.2.1. Alternativas baseadas em processos de agregação química e física

O objetivo desta via é resolver o problema dos F-UF por agregação, ou seja, aumentando o tamanho das partículas e resolvendo o problema de tamanho das partículas unitárias (Figura 2.6).

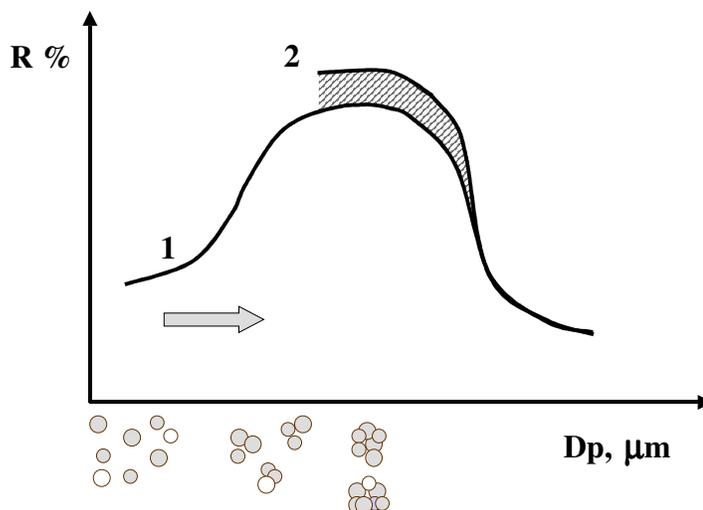


Figura 2.6. Aumento do tamanho de partículas via técnicas de agregação seletiva para aumento da recuperação por flotação.

Agregação é o termo geral que se usa para descrever a formação (união) de um conjunto de partículas unitárias. Esta pode ser realizada através do uso de reagentes (químico ou físico-químico) ou por forças de interação (eletrostáticas ou hidrofóbicas) entre partículas de igual ou diferente composição mineralógica. Considerando que existe certa confusão na terminologia relativa a processos de formação de unidades maiores a partir de partículas coloidais ou ultrafinas, são descritos os processos de acordo com a terminologia técnica da área de tratamento de minérios e físico-química de superfície.

2.2.1.1. Floculação seletiva

A floculação de partículas finas específicas, utilizando material polimérico, e a separação destes agregados de partículas de outros componentes dispersos é conhecida como floculação seletiva. Os flocos assim formados são separados da suspensão por sedimentação, elutrição, peneiramento ou flotação dos flocos. Desde que sejam resistentes o suficiente, estes flocos podem ainda ser limpos, melhorando a qualidade do concentrado (Mathur et al., 2000). O princípio da floculação seletiva é agregar seletivamente partículas minerais finas de uma determinada espécie através da formação de flocos, que possam ser mais facilmente separados do meio aquoso e de outra fase sólida do sistema.

A competição entre diferentes superfícies pelo floculante tem que ser controlada para garantir sua adsorção seletiva no componente desejado, e subsequente sucesso do processo de

floculação seletiva. Os mecanismos da interação seletiva do grupo funcional do polímero com as superfícies coloidais minerais e orgânicas, biocolóides e proteínas solúveis podem ser utilizados para orientar o desenvolvimento de floculantes e dispersantes seletivos.

As principais barreiras para o incremento da aplicação comercial da floculação seletiva é consequência da ineficiente transição entre sistemas com componentes isolados para sistemas com componentes mistos, sistemas mistos sintéticos para sistemas naturais, e escalonamento de estudos de bancada para escala real. A seletividade observada em sistemas isolados e sintéticos muitas vezes é perdida em sistemas reais devido a um ou mais dos seguintes fatores: heterocoagulação, interferência de íons dissolvidos, recobrimento por lamas, aprisionamento físico, heterofloculação e contaminação cruzada durante a moagem (Mathur et al., 2000).

A Floculação Seletiva tem sido aplicada com sucesso no beneficiamento de minério de ferro em *Tilden Iron Ore Mine*, Michigan, EUA. O processo aplicado em *Tilden* consiste de dispersão do minério, de tamanho inferior a 30 μm , a pH 10-11, utilizando Silicato de Sódio e/ou Fosfatos, floculação seletiva da hematita com amido de milho, sedimentação e flotação reversa para separação dos flocos de hematita da sílica (Weissenborn et al., 1994). Os floculantes mais comuns para minérios de ferro são o amido e poliacrilamidas hidrolisadas.

Uma aplicação massiva da floculação seletiva encontra-se na recuperação de partículas minerais de ferro em associação com a flotação reversa, catiônica da ganga silicosa. No Brasil a floculação seletiva dos minérios de ferro (ao redor de 50% Fe) é hoje um processo estabelecido e incorporado a escala industrial em várias plantas de beneficiamento.

2.2.1.2. Agregação com tensoativos e com agitação ("shear flocculation")

Warren (1985) desenvolveu um processo que denominou floculação por cisalhamento (*shear flocculation*) onde as partículas finas hidrofóbicas (com coletor), se agregam num campo de turbulência controlada. Neste processo, os agregados se formam por efeito hidrofóbico que resulta das interações entre as partículas hidrofobizadas com os coletores adsorvidos ou também entre partículas naturalmente hidrofóbicas.

As características do processo de floculação por cisalhamento podem ser demonstradas pelos estudos de Fuerstenau et al. (1988, 1991). Nesses estudos, partículas finas de hematita foram mantidas em suspensão à pH 3, onde apresentam uma carga superficial positiva. Nestas condições, uma velocidade de 1600 rpm, por 60 minutos, não foi suficiente para obtenção de agregados destas partículas. Porém, após a adição de dodecil sulfato de sódio (10^{-4} M), com a

hematita hidrofobizada e com carga superficial negativa, foi observada a formação de agregados, no intervalo de agitação de 800-1600 rpm, sendo que para velocidade abaixo de 800 rpm, não foi observada uma formação significativa de agregados.

Pascoe e Doherty (1997) avaliaram a separação de ultrafinos ($< 10 \mu\text{m}$) de hematita de quartzo utilizando oleato de sódio como hidrofobizante em um estudo com *shear flocculation*. Segundos esses autores, os principais fatores que afetam a formação do “flocos” hidrofóbicos de hematita são a concentração de oleato, pH, taxa de cisalhamento e tempo de agitação.

Existem dados industriais que mostram aumentos significativos de recuperação de sulfetos quando o condicionamento anterior à flotação é realizado sob intensa agitação (condicionamento em alta intensidade - CAI) (Bulatovic, 1989; 1993). É postulado que os agregados hidrofóbicos se formam pelo processo *shear flocculation*, o qual ocorre quando se introduz uma energia mínima para vencer barreiras de repulsão eletrostática permitindo, desta forma, a ação das forças hidrofóbicas de curto alcance.

2.2.1.3. Agregação (adesão) física

Este tipo de agregação ocorre por adesão de partículas F-UF entre si ou com partículas de um tamanho maior (*carrier*), não necessariamente da mesma composição mineralógica. Esta adesão é específica e depende exclusivamente do efeito hidrofóbico (forças de interação hidrofóbicas) entre partículas hidrofóbicas. A posterior separação dos agregados formados por flotação é conhecida como flotação por transporte ou transportadora (*carrier flotation*).

Esta agregação pode ser induzida ou pode ocorrer em condições hidrodinâmicas favoráveis (CAI-condicionamento em alta intensidade). No primeiro caso é necessário adicionar, ao sistema, partículas hidrofóbicas (*carrier*) e no segundo caso, a agregação é entre as próprias partículas hidrofóbicas existentes no sistema, tal como ocorre na *shear flocculation* ou no CAI. Quando as partículas "transportadoras" são da mesma espécie que a "transportada", a agregação se denomina “homo-agregação”, e o processo de flotação é conhecido como flotação autotransportadora.

A aplicação industrial que tem sido reportada tem por objetivo a remoção de impurezas (partículas UF) de compostos de titânio na limpeza de caulim. Neste processo adiciona-se calcita com granulometria adequada à flotação e ácidos graxos como coletores. A interação entre estas partículas transportadoras e as de rutilo (UF, “transportadas”) leva à formação de agregados (“hetero-agregação”) com alta taxa de flotação. No caso do tratamento de frações

F-UF de sulfetos metálicos, as partículas transportadoras podem ser partículas (de Cu e Mo) com alta cinética de flotação.

2.2.1.4. Processos que empregam uma fase orgânica

Normalmente óleos não polares são utilizados em processos de concentração de partículas finas, adicionados na forma livre ou como emulsão, que aumenta a difusão na solução aquosa. Dependendo da concentração de óleo, podem ser definidos os diversos processos apresentados a seguir (Rubio 2002).

i. Flotação Extensora (*Extender flotation*)

Para concentrações baixas da ordem de 20-120 g.t⁻¹ em conjunto com coletores, o processo se conhece como *extender flotation* onde o óleo aumenta a hidrofobicidade que via interação hidrofóbica. Esta foi a técnica utilizada neste trabalho e será mais detalhada no texto a seguir.

ii. Emulsão Flotação (*Emulsion Flotation*)

Esta técnica objetiva tratar sólidos naturalmente hidrofóbicos como carvões, grafite, enxofre, molibdenita e talco. (Laskowski, 1992). Neste método, um óleo insolúvel em água é usado como um coletor e o espumante, como em todos os outros processos de flotação, é um surfactante solúvel em água. A quantidade de óleo usada neste processo é um pouco maior do que no processo de flotação extensora (até alguns kg.ton⁻¹). Um exemplo de aplicação desta técnica é a flotação de minérios sulfetados de cobre-molibdênio (Laskowski, 1992), onde o concentrado bulk contém ambos os minérios de valor. O cobre é deprimido com NaHS ou Na₂S, enquanto que o molibdênio é flotado com o uso de um coletor oleoso ajudado por alguma quantidade de um emulsificante (um óleo de coco sulfatado cuja denominação comercial é Sintex).

iii. Flotação aglomerante (*agglomeration-flotation*)

Quando a concentração de óleo é da ordem de 2-20 kg por tonelada de sólidos, se formam pequenos aglomerados que podem ser separados por flotação. O método envolve um condicionamento de polpa com elevado teor de sólidos na presença de um coletor para tornar as partículas hidrofóbicas e com um óleo para aglomerar as partículas por pontes de óleo. Bos e Quast (2000) em seu trabalho sobre os efeitos de óleos e lubrificantes na flotação de minerais sulfetados de cobre, realizado na *Girilambone Cooper Company*, na Austrália, após estudarem uma série de óleos residuais da operação da mina e processos, concluíram que a adição de um *fuel oil* usado por caminhões (e outros equipamentos móveis da mina), nas concentrações de 0,5 e 1,0 kg.t⁻¹, aumentou a seletividade no estágio de flotação. Entretanto a adição de quaisquer dos outros óleos testados reduziu a seletividade devido à flotação indesejada de partículas de ganga liberadas. Afirmam ainda que a adição deste *fuel oil* agiu pela formação de algum tipo de aglomeração esférica e que os outros óleos estudados causariam um espalhamento generalizado sobre a superfície de todos os minerais da polpa, tornando algumas partículas de ganga hidrofóbicas.

iv. Flotação por Bolhas Oleosas

Esta técnica de flotação é baseada no fato de que as bolhas de ar estão recobertas por uma fina camada de óleo contendo coletores solúveis em óleo. Liu et al (2002) sugerem a denominação de *Reactive Oily-Bubble* flotation para esta técnica, cuja principal proposta seria o uso de coletores insolúveis em água e solúveis no óleo que recobre as bolhas. As bolhas oleosas teriam um ângulo de contato muito maior que as bolhas de ar, assegurando uma elevada força de adesão, permitindo com isso a flotação de partículas grosseiras e finas. Este modelo eliminaria ainda a necessidade de diluição de coletores na fase aquosa, evitando interações indesejadas entre coletores, ativadores, depressantes e dispersantes presentes no sistema, minimizando a ativação inadvertida de ganga e diminuindo significativamente a quantidade de coletor. Fundamentos adicionais sobre a formação de bolhas oleosas foram estudados por Grattoni et al. (2003) e Moosai et al. (2003), mostrando evidências fotográficas da formação do filme de óleo sobre as bolhas de ar. Entretanto não existem muitos estudos sobre aplicações desta técnica inclusive há controvérsias de suas vantagens.

v. Aglomeração oleosa (*oil agglomeration*)

Quando a concentração de óleo aumenta até o equivalente ao volume de espaços vazios, ocorre um grande crescimento dos aglomerados, impedindo a flotação. Neste caso utiliza-se uma separação baseada em sedimentação seletiva ou peneiramento. Neste processo, suficiente quantidade de óleo é necessária não somente para aumentar os aglomerados, mas também para deslocar a água dos interstícios deste aglomerado de forma que os *pellets* adquiram resistência suficiente para suportar o peneiramento (Song et al., 1999). House e Veal (1989) citam o exemplo da agregação oleosa dos carvões, onde o principal fenômeno é o efeito capilar nos interstícios das partículas. Na aglomeração oleosa ou esférica um líquido imiscível, como um hidrocarboneto, é adicionado à uma suspensão de sólidos em água. Sob agitação, o óleo é distribuído sobre as superfícies oleofílicas/hidrofóbicas e o impacto das partículas propicia a formação de pontes líquidas interpartículas, causando aglomeração. O controle da oleofilicidade de determinado componente mineral, por exemplo pela adição de coletores, levará à uma recuperação seletiva deste mineral .

Neste mesmo trabalho - recuperação seletiva de calcopirita por aglomeração esférica - estudando os principais parâmetros desta técnica na separação de calcopirita de misturas contendo pirrotita e sílica, os autores conseguiram bons resultados em termos de teor e recuperação. Foram variados o pH, o tipo de coletor, tipo de óleo e adição de coletor, densidade da polpa, adição de óleo, intensidade da agitação, tamanho das partículas, taxa de alimentação e tempo de aglomeração. As principais conclusões são:

i) recuperação de partículas finas é possível devido ao fato de que a tensão superficial na superfície óleo/água é menor do que na interface ar/água. Ainda, gotas de óleo e partículas cobertas de óleo possuem um momentum maior que as bolhas de ar e, em consequência, as forças de repulsão da dupla camada podem ser reduzidas;

ii) O teor dos concentrados de partículas finas podem ser aumentados, devido ao alto grau de hidrofobicidade necessária para a extração numa fase orgânica, e a ausência de arraste de ganga nas espumas aquosas. House e Veal (1989) cita ainda vários trabalhos em escala de laboratório de tentativas de usar esta técnica com outros minerais: cassiterita, ilmenita, hematita, barita, wolframita e ouro.

Guerra (1985) estudou a técnica de aglomeração oleosa na concentração de ultrafinos de carvão utilizando querosene e misturas de querosene e óleo combustível. Nos melhores

resultados foram obtidos concentrados com 9-10 % de cinzas com 94-96 % de recuperação da matéria carbonosa.

Drzymala et al (1986) estudaram os efeitos da presença de ar na aglomeração oleosa de sólidos carbonáceos (grafite e partículas de carvão) numa suspensão aquosa, na presença de vários hidrocarbonetos parafínicos. A principal conclusão é de que o ar pode desempenhar um importante papel na aglomeração oleosa quando alcanos de baixo peso molecular (menores que octano) são usados. Desta forma, a presença de ar propiciaria uma diminuição no consumo do reagente.

vi. Extração Líquido-Líquido

Ocorre quando a quantidade de óleo aumenta até exceder várias vezes o volume de vazios, permitindo que se forme um sistema de três fases, onde a nova fase é uma fase orgânica, para onde se transferem as partículas hidrofóbicas (naturais ou com coletores).

Kusaka et al (1994) demonstrou uma utilização desta prática, transferindo finos de galena de uma fase aquosa para uma fase oleosa ou para uma interface água/óleo. Partículas < 44 µm de galena apresentaram alta recuperação quando foi usada uma fase oleosa composta por um líquido de baixa polaridade (hidrocarbonetos aromáticos e parafínicos) ou por um *higher alcohol*. Nas mesmas condições, o quartzo mostra uma baixa recuperação.

A Tabela 6 mostra os processos e algumas características do uso de óleos na floculação e flotação de minerais.

Tabela 6. Distintas aplicações de óleos na floculação e flotação de minerais.

Processo	Observações / Mecanismos	Exemplos / referências
“Hidrofobizador” ou auxiliar de coleção	Neste caso os óleos são adicionados em baixas concentrações diretamente nos moinhos ou nos tanques de condicionamento, na forma não emulsificada ou com adição de emulsificantes. Muitas vezes utiliza-se óleos usados	i.Divisões Codelco-Chile: circuitos Rougher e flotação seletiva de molibdênio; ii. CVRD: flotação (reversa de minério de ferro) da ganga silicosa com aminas. Dmitreva et al., 1970; Gorodetskii et al., 1973
Floculação/flotação hidrofóbica ou agregação hidrofóbica	“Auxiliar de agregação” em conjunto com os coletores. O processo de separação dos agregados pode ser por sedimentação, filtração ou flotação.	Song et al, 1990, 1994, 1998, 1999, 2000; Laskowski, 1992; Guerra, 1985
Como simples coletor	Como coletor na flotação de sólidos hidrofóbicos (carvão, talco, grafite). As concentrações usadas aqui são elevadas e podem chegar a 1000-2000 g.t ⁻¹ .	Todas as plantas de flotação de carvão; Guerra, 1985
Bolhas hidrofóbicas, sem carga	O óleo atua como modificador superficial das bolhas para diminuir sua carga e aumentar a hidrofobicidade.	Liu et al., 2002.

2.3. Flotação Extensora (*Extender flotation*)

No processo de flotação extensora, óleos não polares são utilizados como tal ou na forma de emulsão em concentrações da ordem de 20-120 g.t⁻¹ juntamente com os coletores (hidrofobizantes) tradicionais. Este tipo de flotação proporciona um fenômeno de espalhamento do óleo em superfícies hidrofóbicas causando um aumento significativo na hidrofobicidade das partículas e tem o sentido de extensão de uma película superficial sobre as partículas. Este fenômeno de espalhamento é que dá origem ao nome “extensora” (*extender*) à técnica, e tem o sentido de extensão de uma película superficial.

Este tipo de flotação é muito utilizado na área de beneficiamento de carvão e em sistemas minerais como a silvita (Rubio, 1998; Duong et al, 2000; Laskowski, 1996, 1997) e ilustra muito bem o benefício do efeito hidrofóbico pretendido. Os carvões, em geral, correspondem a partículas com certo grau de hidrofobicidade natural e por isso, muitas dessas flutam facilmente sem coletor e somente com espumantes. Devido a fenômenos de oxidação parcial, esta hidrofobicidade diminui drasticamente e é por este motivo que se utiliza óleo na flotação.

Os antecedentes de seu potencial na flotação de molibdênio são também positivos porque se considera que sua flotação é semelhante a do carvão no sentido de que este mineral é hidrofóbico e que flota muito bem com hidrocarbonetos como reagentes coletores. Da mesma forma que a flotação de carvão, se tem constatado que os hidrocarbonetos lineares (saturados) de cadeia longa, não são os melhores coletores de Molibdenita. Isto, de acordo com vários autores, está associado a menor solubilidade e a maior viscosidade de hidrocarbonetos de cadeia longa. Como na prática estes óleos ou petróleos nem sempre são adicionados na forma emulsificada, sua dispersão e diluição necessária para difundir-se na polpa e interagir com as partículas de Molibdenita é muito menor.

No caso da Molibdenita, por exemplo, se tem reportado que hidrocarbonetos comuns apresentam eficiências muito variadas (Smit and Bhasin, 1985) provavelmente devido às diferenças de viscosidade. Por outro lado, uma mistura de hidrocarbonetos com frações naftênicas de alto peso molecular e óleo combustível aumenta, significativamente, sua recuperação por flotação.

Dmitreva et al. (1970) cita o uso de óleo Diesel emulsificado na flotação de calcopirita na etapa Rougher de flotação, em uma usina na Rússia, obtendo com ganhos de 5 % (85 % para 90 %) de Cu usando $100 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ de óleo.

Smit e Bhasin (1985) publicaram um extenso estudo sobre a relação entre as diversas misturas de óleos comerciais e óleo diesel na flotação de molibdenita, concluindo que uma mistura de 30 % ou mais de um óleo lubrificante naftênico com um óleo de baixa viscosidade, como óleo Diesel, mostrou-se mais atrativo na recuperação de molibdenita.

Laskowski e Qi Daí (1993), estudando flotação coletor “extender” no processamento de frações grosseiras de minérios de potássio com base em diversos óleos comerciais da Esso, identificaram que óleos com alto teor de compostos nitrogenados são eficientes como extender e que a performance destes óleos pode ser aumentada pela dissolução de uma pequena

quantidade de amina alifática de cadeia longa. No mesmo estudo, concluiu-se que todos os óleos testados, com exceção de um (Esso 904), podem não aderir à superfície do KCl na ausência de aminas de cadeia longa. Ainda, óleos com alto teor de compostos nitrogenados, caracterizados por um alto ponto isoelétrico são considerados melhores óleos *extenders*. A adição de 1% de uma amina de cadeia longa pode aumentar significativamente o desempenho das propriedades do *extender*. Os resultados alcançados por Laskowski indicaram ainda que a determinação de pontos isoelétricos e/ou acidez para óleos podem ser usados para pesquisar vários produtos oriundos do petróleo na seleção dos melhores *extenders* para a flotação de grossos de minérios de potássio.

Song et al. (2000), estudando a floculação hidrofóbica de finos de galena (-30 μm) induzidos por amil xantato de potássio (PAX) em suspensões aquosas, atingiram altas recuperações pela adição de pequena quantidade de querosene.

O uso de petróleo (Diesel) também é uma prática comum no Chile, mas seus benefícios são bastante discutidos; existem divergências ao respeito e não há muito consenso entre operadores e engenheiros. De uma forma geral, as concentrações de óleo empregadas são baixas ($< 10 \text{ g.t}^{-1}$) e tanto a forma de adição usada (emulsificado ou não) como o (ou os) tipo(s) de óleo ou petróleo não têm sido, aparentemente, muito estudados.

Em relação aos fenômenos que estão agindo, é importante destacar que a característica mais marcante no uso de óleos é a não existência de adsorção e sim uma “interação” entre gotas e partículas (Laskowski, 1992). Como as gotas são hidrofóbicas, portanto insolúveis em água, a interação ocorre por forças hidrofóbicas com as partículas que já possuem coletor e inclui etapas de colisão e adesão.

Os principais fatores envolvidos no processo de flotação “extensora” são os seguintes:

- O tipo (composição química), concentração e forma de adição do óleo ou misturas destes;
- A interação entre o coletor e o óleo;
- O efeito do óleo nas características estruturais da espuma.

Em relação a flotação “extensora”, existem diferenças entre a realizada com óleos não emulsificados e os coletores tradicionais adicionados no mesmo instante (convencional), e a

realizada com a adição de óleo emulsificado após a adição dos coletores. Como os óleos (querosene, óleo Diesel, entre outros) são insolúveis em água, sua dispersão neste meio é função do ponto e forma de adição e da agitação. A alimentação, na forma de emulsão, apresenta vantagens porque a difusão das “gotas” do óleo até a superfície das partículas é mais rápida e uniforme. Ainda, as maiorias dos estudos realizados não apresentam as curvas de distribuição de tamanho de gotas.

2.3.1. Flotação Extensora Convencional

Neste caso óleos não emulsificados e os coletores tradicionais são adicionados no mesmo instante e os estudos mostram vantagens na flotação de grossos. Isto parece ser possível ao analisar os mecanismos envolvidos, a Figura 2.7 mostra que, depois de “dissolvido” no óleo, o coletor com sua parte polar voltada para a solução (não emulsificado) interage com a partícula mineral estabelecendo um maior ângulo de contato. Ainda, dependendo da concentração de óleo (baixa densidade comparada com os sólidos) é possível que diminua a densidade do conjunto bolha/partícula.

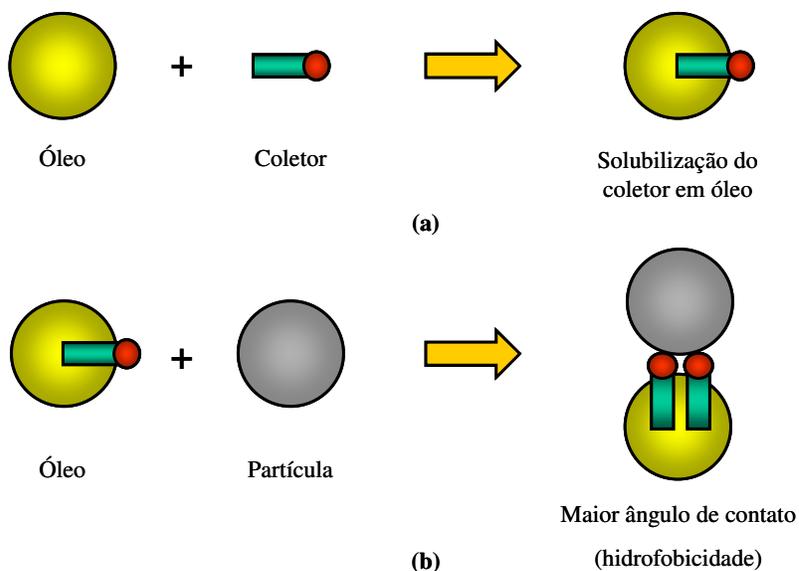


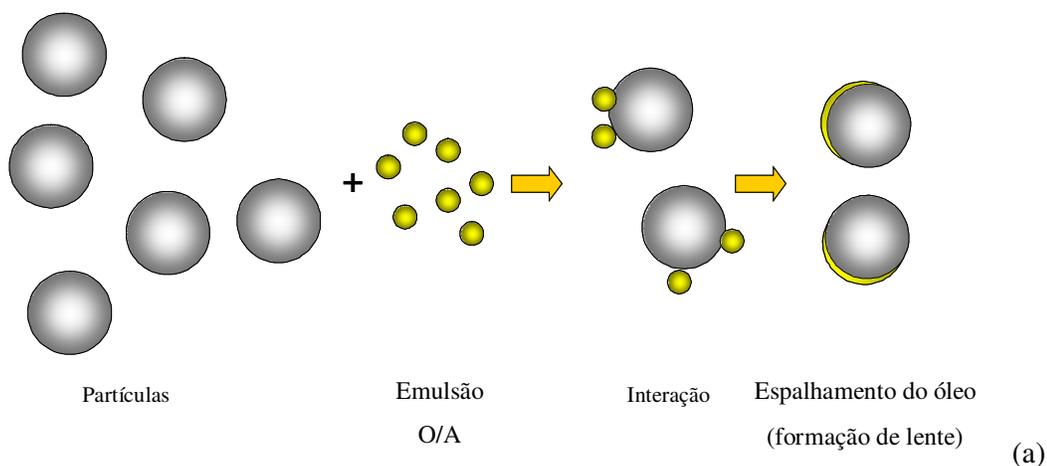
Figura 2.7. Flotação extensora Clássica. (a) O coletor se dissolve no óleo com sua parte polar voltada para a solução; (b) O coletor com sua parte polar interage com a partícula estabelecendo um maior ângulo de contato.

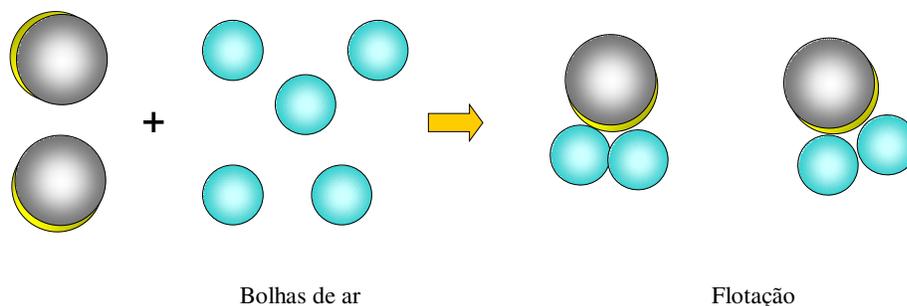
2.3.2. Flotação Extensora Não convencional

Neste tipo de flotação as concentrações são menores que as estudadas no processo anterior ($>50 \text{ g.t}^{-1}$) mas a grande diferença está na etapa de emulsificação, produzindo milhares de gotas coloidais ($1\text{-}5 \mu\text{m}$). Esta flotação tem o objetivo de aumentar tanto a hidrofobicidade como realizar a agregação das partículas F e UF. Assim, uso otimizado de óleos proporciona uma melhora da adesão bolha/partícula (captura) e aumento do tamanho das partículas finas e ultrafinas (homoagregação). O aumento da hidrofobicidade ocorre via iteração entre as gotas hidrofóbicas com as partículas que já possuem coletor, e incluem as etapas de colisão e adesão. Os antecedentes desta técnica (investigação) e suas aplicações são encontrados no beneficiamento de carvões, na flotação de sulfetos metálicos, principalmente a molibdenita, e na flotação direta de minérios fosfáticos (Laskowski, 1996; El_Shall et al, 2000; Sis e Chander, 2003).

2.3.3. Mecanismos envolvidos na flotação extensora

Em relação aos microfenômenos envolvidos no processo de flotação extensora, é importante destacar que a característica mais marcante no uso de óleos é a não existência de adsorção e sim uma “interação” entre gotas e partículas (Laskowski, 1992). Como as gotas são hidrofóbicas (portanto insolúveis em água), a interação ocorre por forças hidrofóbicas com as partículas que já possuem coletor. Imediatamente após ocorrer a adesão, o óleo (a gota) se “espalha” sobre a superfície da partícula aumentando consideravelmente a hidrofobicidade (Figura 2.8).





(b)

Figura 2.8. Fenômenos envolvidos no processo de flotação extensora. (a) Interação gota/partícula; espalhamento do óleo e formação de uma lente; (b) adesão bolha/gota/partícula.

Outro mecanismo provável é o aumento do tamanho das partículas flotáveis via interação hidrofóbica entre as próprias partículas (homoagregação) aumentando o tamanho das partículas iniciais, F e UF (figura 2.9).

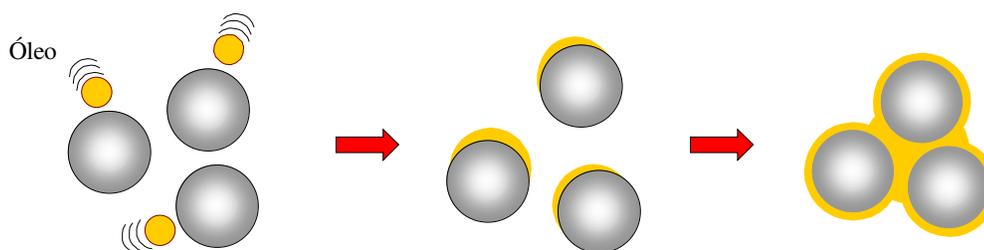


Figura 2.9. Fenômeno de agregação entre as partículas e UF recobertas por um filme de óleo e adesão bolha partícula.

2.4. Emulsões óleo/água

Uma emulsão pode ser definida como uma mistura de dois líquidos imiscíveis ou parcialmente miscíveis onde uma das fases encontra-se dispersa na outra sob a forma de gotas de tamanho microscópico ou coloidal. O diâmetro médio das gotas da fase dispersa (no caso de uma emulsão estável) situa-se geralmente entre 0,1 μm e 10 μm e são, portanto, maiores do que as partículas sólidas encontradas em suspensão (Shaw, 1975). Dependendo das condições físico-químicas do meio, a dimensão da fase dispersa pode alcançar valores até 0,01 μm ,

porém os tamanhos mais conhecidos situam-se em faixas superiores, classificados conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Classificação das emulsões óleo/água em função do tamanho médio de gotas.

Tipo de Emulsão	Tamanho de gotas, μm
Macro emulsão	> 0,1
Micro emulsão	0,01 – 0,1
Emulsão micelar	< 0,01

As emulsões são classificadas de acordo com a fase dispersa em: óleo em água (O/A) e água em óleo (A/O). Numa emulsão A/O a água é a fase dispersa e o óleo a fase contínua, já nas emulsões O/A o óleo é a fase dispersa e a água a fase contínua. O termo “óleo” é usado de modo geral representando um fluido insolúvel em água (Adamson, 1976).

Segundo Fordedal et al. (1995), o tipo de emulsão formada quando dois líquidos imiscíveis são homogeneizados depende principalmente do tipo de agente estabilizante presente ou de sua estrutura química. Shaw (1975) cita que os tensoativos de metais alcalinos tendem favorecer a formação de emulsões O/A, enquanto que os tensoativos de metais pesados, a formação de emulsões A/O. De acordo com o mesmo autor, os volumes relativos das duas fases influenciam no tipo da emulsão formada, e na maioria dos casos, quanto maior for o volume de uma fase, mais provável que esta seja a fase contínua, mas não necessariamente.

De acordo com Shaw (1975) e Adamson (1976), as emulsões podem ser estabilizadas basicamente de duas formas:

i – Emulsões estabilizadas fisicamente:

As emulsões estabilizadas fisicamente são aquelas formadas sem adição de substâncias surfatantes, ou seja, a estabilidade é mantida por cargas elétricas inerentes ao sistema ou outras forças diferentes à influência de agentes estabilizantes. A estabilidade deste tipo de emulsão é fortemente afetada pela fração em volume da fase dispersa em relação à fase contínua, viscosidade da fase externa e principalmente pela distribuição de tamanho e carga superficial das gotas.

ii – Emulsões estabilizadas quimicamente:

Na maioria dos casos, para que as emulsões apresentem uma maior estabilidade (no tempo) é necessário adicionar uma substância surfatante durante sua formação. A estabilidade destas emulsões é consequência da alta densidade de carga superficial conferida às gotas de óleo devido à adsorção da substância emulsificante na superfície das mesmas. As gotas de óleo estabilizadas quimicamente comportam-se mais como partículas sólidas do que as estabilizadas fisicamente devido a sua alta densidade de carga superficial e seu menor tamanho (Lelinski, 1993; Beeby e Nicol, 1993). A adsorção de surfatantes pode ser explicada pela interação entre as cadeias de hidrocarbonos (orgânica) do surfatante e as moléculas constituintes da fase oleosa.

No caso de dois líquidos imiscíveis, como óleo e água, o trabalho reversível (ΔW) necessário para dispersar os dois sistemas, sobre condições isotermais, é dada pela equação 4:

$$\Delta G = \Delta W = \gamma_{OA} \Delta a \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde: γ_{OA} é a tensão interfacial óleo-água e a é a área superficial das gotas dispersas.

As propriedades das emulsões, como a estabilidade, dependem principalmente de sua composição e do modo de preparação, visto que são sistemas heterogêneos, parcialmente dispersões, parcialmente colóides. O óleo emulsificado pode coalescer novamente após ser formado, visto que as gotículas dispersas no meio líquido colidem frequentemente entre si (ou estão em contato permanente, como nas emulsões concentradas). A estabilidade de uma emulsão é consequência da interação entre as gotas (coalescência ou não) e da velocidade de flutuação. Segundo Spence e Masliyah (1989), em sistemas diluídos a colisão entre as gotas são pouco frequentes e assim a coalescência é pouco importante. Nas emulsões diluídas, a melhor indicação de estabilidade pode ser a medida da mudança de concentração da fase dispersa em função do tempo de repouso. Como geralmente a separação (flutuação) da fase oleosa em emulsões O/A segue uma cinética de primeira ordem, Behie et al. (1982) propuseram a quantificação da estabilidade das emulsões em termos de um número, o coeficiente de estabilidade ou sedimentação (K_s). Segundo Lelinski (1993), valores de K_s menores de $0,001 \text{ h}^{-1}$ caracterizam emulsões altamente estáveis, já emulsões instáveis para valores de K_s maiores que 2 h^{-1} .

2.5. Generalidades sobre os hidrocarbonetos

Entre os principais produtos obtidos a partir do petróleo, podemos citar os solventes, óleos combustíveis, gasolina, óleo Diesel, querosene, gasolina de aviação, lubrificantes, asfalto, plástico entre outros. A separação das frações está baseada no ponto de ebulição dos hidrocarbonetos. Os principais produtos provenientes do refino são: gás combustível, GLP, gasolina, nafta, querosene, óleo Diesel, óleos lubrificantes, matéria prima para fabricação de asfalto e parafina.

De acordo com a predominância de hidrocarbonetos encontrados no óleo cru, o petróleo é classificado em:

i. Parafínico

São chamados parafinas os hidrocarbonetos saturados e aqueles que se caracterizam por apresentar exclusivamente ligações carbono-carbono. Exemplos: metano, etano, propano, etc.

Este tipo de petróleo produz subprodutos com as seguintes propriedades:

- Gasolina de baixo índice de octanagem;
- Querosene de alta qualidade;
- Óleo Diesel com boas características de combustível;
- Óleos lubrificantes de alto índice de viscosidade, elevada estabilidade química e alto ponto de fluidez;
- Resíduos de refino com elevado teor de parafina;
- Possuem cadeias retilíneas.

Os hidrocarbonetos saturados que são consumidos na indústria são obtidos geralmente a partir de gás natural do petróleo, que podem ser separados através de destilação fracionada.

ii. Cicloalcanos ou Naftênicos

São hidrocarbonetos de cadeia fechada ou cíclica que apresentam ligações simples entre átomos de carbono (Figura 2.10). A nomenclatura é idêntica à utilizada para os alcanos utilizando o prefixo ciclo. Para os de cadeia ramificada, o ciclo é a cadeia principal, devendo

as ramificações receber a menor numeração. O petróleo do tipo naftênico produz subprodutos com as seguintes propriedades:

- Gasolina de alto índice de octanagem;
- Óleos lubrificantes com baixo resíduo de carbono;
- Resíduos asfálticos no refino;
- Possuem cadeias em forma de anel.

iii. Mistos

Esse óleo corresponde a misturas de hidrocarbonetos parafínicos e naftênicos, com propriedades intermediárias, de acordo com a maior ou menor porcentagem de cada tipo de hidrocarboneto.

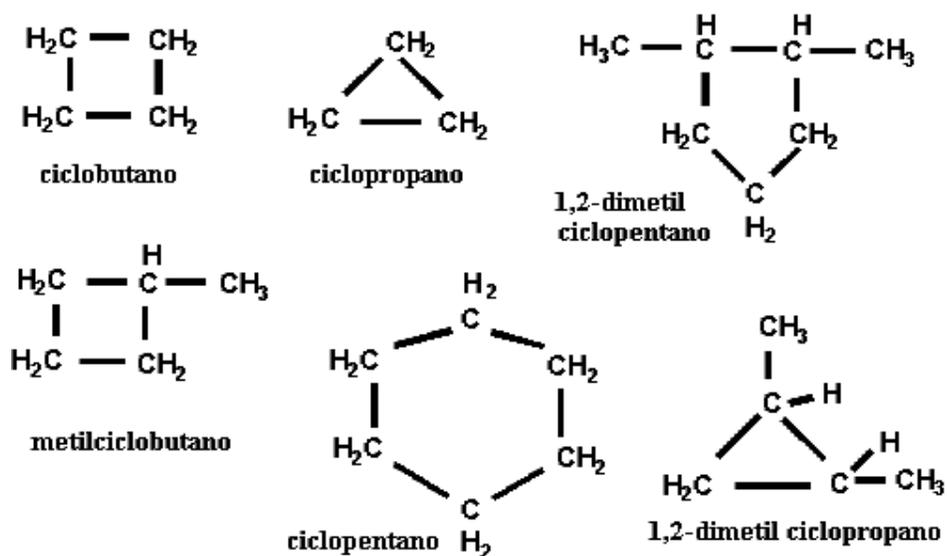


Figura 2.10. Exemplos de cicloalcanos. Hidrocarbonetos de cadeia fechada ou cíclica que apresentam ligações simples entre átomos de carbono.

iv. Aromáticos

São aqueles onde existe predominância de hidrocarbonetos aromáticos que são compostos que apresentam anel benzênico, cuja fórmula molecular é C₆H₆ (Figura 2.11). Este

tipo de petróleo é raro, produzindo solventes de excelente qualidade e gasolina de alto índice de octanagem, porém não são utilizados para fabricação de lubrificantes.

Depois da seleção do tipo de óleo cru, os mistos são refinados através de processos que permitem a obtenção de óleos básicos de alta qualidade, livres de impurezas e componentes indesejáveis. São obtidos através da destilação do petróleo e do alcatrão de hulha a partir de alcenos, fenóis e cetonas e por intermédio da síntese de Wurtz e Grignard.

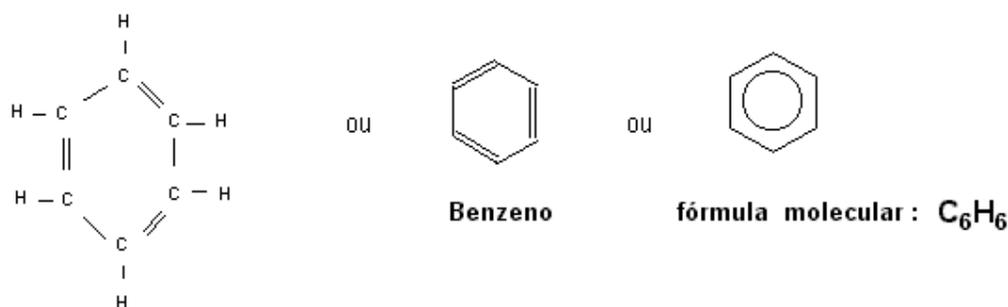


Figura 2.11. Benzeno: exemplo de hidrocarboneto aromático.

2.4.1. Óleo Diesel

O termo Diesel incorpora um amplo conjunto de produtos do petróleo que variam significativamente em sua composição química exata. Um dos maiores problemas ambientais relacionados com o Diesel é que ele contém hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH's) tais como fluoretano e fenantreno, os quais podem ser bastante tóxicos na água ou em sedimentos. Alguns dos PAH's no óleo Diesel são potenciais causadores de câncer e outros permanecem por longo tempo nos sedimentos do fundo. Os óleos mais densos tendem a apresentar níveis mais elevados de PAH's. Uma vez que a toxicidade do óleo Diesel está relacionada com a presença dos PAH's o impacto causado por diferentes óleos depende da concentração de PAH's no combustível.

Os compostos individuais do Diesel que tem efeitos na saúde são os hidrocarbonetos aromáticos voláteis e hidrocarbonetos polinucleares. Dos compostos voláteis e não voláteis (tais como tolueno, benzeno, xilenos e etil benzenos), o principal e mais frequentemente encontrado, é o tolueno. Dos aromáticos polinucleares o naftaleno, o 2-metilnaftaleno e o fenantreno são os mais comumente encontrados.

A composição química dos óleos Diesel é altamente variável mas geralmente não é considerada carcinogênica embora contenha os PAH's em baixas concentrações.

Em função do processo de produção do Diesel, os hidrocarbonetos mais leves (C1 a C8) e a maioria dos compostos aromáticos voláteis, tais como benzeno, tolueno, xileno e etilbenzeno (BETEX) além da maior parte dos PAH's são removidos do óleo durante a destilação.

2.4.2. Querosene

O querosene é um composto formado por uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos, naftalênicos e aromáticos, com faixa de destilação compreendida entre 150oC e 239oC. O produto possui diversas características específicas como uma ampla curva de destilação, conferido a este um excelente poder de solvência e uma taxa de evaporação lenta, além de um ponto de fulgor que oferece relativa segurança ao manuseio.

3. EXPERIMENTAL

Os estudos de flotação foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM-DEMIN-UFRGS) utilizando finos e ultrafinos de sulfetos de cobre e molibdênio, fornecida pela Divisão Codelco Norte – Mina Chuquicamata (DCN-Chuquicamata). Os estudos incluem a caracterização do minério e flotação em escala de laboratório para avaliação dos parâmetros de separação: recuperação (R, %), teor do mineral de valor (T, %), e constante cinética de flotação (K-modelo Klimpel), tipo de óleo, concentração e grau de emulsificação (óleo/água).

3.1. Materiais

3.1.1. Minério

Foi utilizada uma amostra de minério sulfetado com aproximadamente 0,94 % de cobre e 0,05% de molibdênio (amostra representativa de minério da Mina Chuquicamata - DCN-Chuqui), situada na região norte do Chile. Para avaliação metalúrgica foi considerada composição mineralógica da amostra com cerca de 95% de calcopirita (CuFeS_2).

A preparação da amostra para os estudos de flotação compreendeu as etapas homogeneização, moagem, classificação, nova homogeneização e preparo final para os estudos de flotação. As amostras foram constituídas buscando atingir uma distribuição granulométrica semelhante à alimentação real da etapa primária de flotação da Usina de beneficiamento de Chuquicamata, com cerca de 33 % da massa e em torno de 37 % do cobre total nas frações finas e ultrafinas.

Preparação da amostra: Foi utilizado um moinho de bolas ECO-H58A, de 16 cm de diâmetro e 37 cm de comprimento com bolas de aço carbono. A classificação foi feita em um peneirador vibratório marca “Produtest com peneiras quadradas (50 x 50 cm)” nas malhas com aberturas de 297; 210; 149; 74 e 37 μm . Para obter a distribuição granulométrica desejada foram necessárias duas etapas de moagem, a primeira para obter as frações grosseiras (297 e 210 μm) e outra para gerar as demais faixas de tamanho.

Na primeira etapa, o minério bruto (com granulometria inicial 100 % abaixo de 1,7 mm) foi submetido à moagem em moinho de bolas por 10 minutos com alimentação de 1,5 kg de material e com uma carga de bolas de 9,8 kg. O produto da moagem foi submetido a peneiramento por 15 minutos nas malhas com aberturas de 297, 210 e 37 μm . As frações retidas nas peneiras de 297 μm e 210 μm e a fração passante em 37 μm foram armazenadas, formando as faixas correspondentes. A massa retida na malha de 37 μm (i.e. material passante em 210 μm e retido em 37 μm) foi submetida à remoagem por 20 minutos com massa de 1,5 kg e carga de bolas de 15,7 kg, e peneirada nas demais faixas. A distribuição dos corpos moedores para as duas etapas está descrita na Tabela 8.

Tabela 8. Condição de moagem para produção das amostras para os estudos de flotação.

Etapa	Tempo moagem min	Corpo moedor (bolas de aço), mm			
		$\phi=15$	$\phi=45$	$\phi=50$	$\phi=62$
1	10	31,9%	47,8%	13,3%	7,0%
2	20	52,7%	30,7%	9,2%	8,0%

Para evitar oxidação das partículas, todo processo de moagem e classificação foi realizado a seco e após pesagem as amostras foram ensacadas e armazenadas em local adequado. A Figura 3.1 mostra o fluxograma utilizado na preparação das amostras

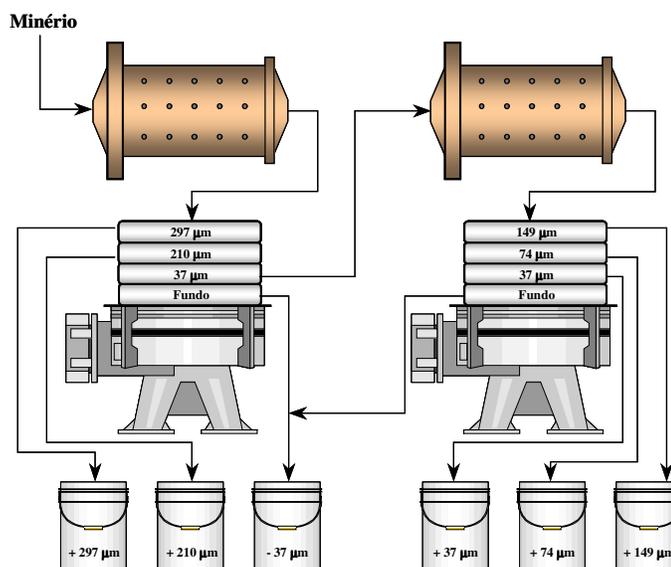


Figura 3.1. Fluxograma de moagem e classificação utilizado na preparação das amostras.

Os resultados mostram que em torno de 33 % da massa e ao redor de 37 % do Cu estão contidos nas frações F-UF (< 37 μm), sendo que o maior teor de Cu está entre as frações 37-15 μm (1,4 %). Na fração > 74 μm o teor de Cu é de 0,38 %. A Tabela 9 e a Figura 3.2 mostram a distribuição de massa e teor de cobre na amostras de minério de Chuquicamata produzidas para os estudos de flotação.

Tabela 9. Distribuição mássica e de cobre na amostra da alimentação.

Tamanho, μm	Massa, %		Cobre %	
	Retido	Retido Acumulado	Retido	Retido Acumulado
> 295	17,7	17,7	0,47	0,08
295-212	12,9	30,6	0,65	0,17
212-150	10,0	40,6	0,81	0,25
150-75	10,9	51,5	1,17	0,38
75-40	16,0	67,5	1,31	0,59
40-15	12,1	79,6	1,39	0,75
15-5	8,0	87,6	1,25	0,85
< 5	12,4	100	0,67	0,94

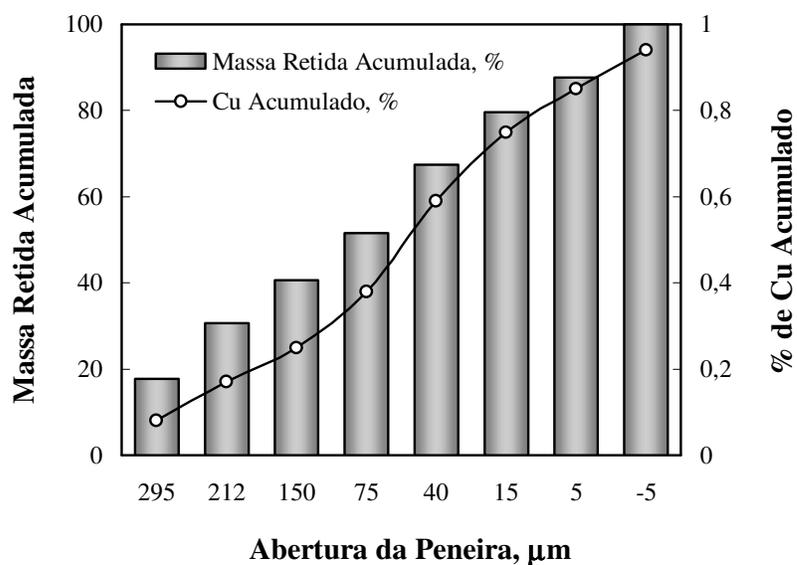


Figura 3.2. Distribuição de massa e de cobre na amostra de minério de cobre de Chuquicamata, usando peneiras comuns e micropeneiras.

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram a comparação entre a distribuição granulométrica de massa e cobre das amostras de flotação produzidas no LTM com valores da etapa de flotação Rougher primária da usina de Chuquicamata.

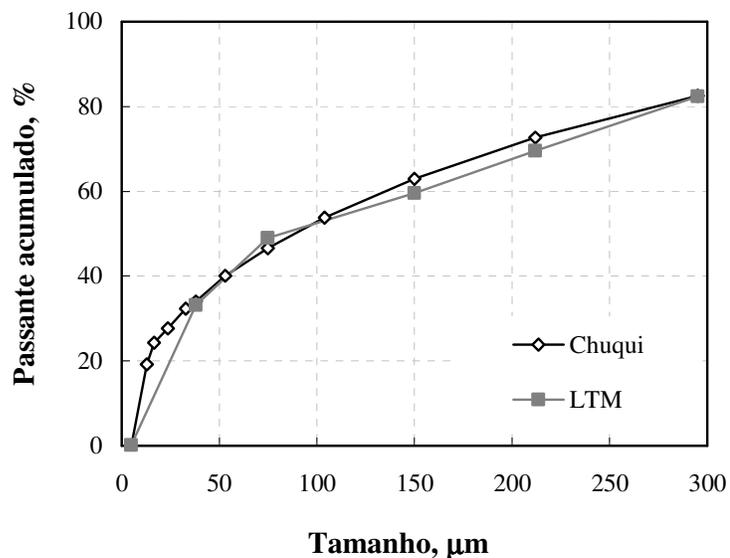


Figura 3.3 Comparação entre a distribuição granulométrica de massa das amostras de flotação produzidas no LTM com valores da etapa de flotação Rougher primária da usina de Chuquicamata.

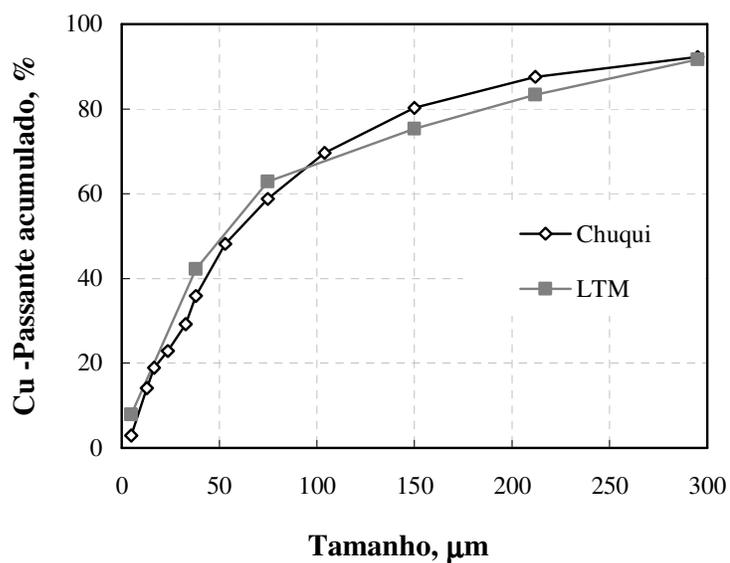


Figura 3.4. Comparação entre a distribuição granulométrica de cobre das amostras de flotação produzidas no LTM com valores da etapa de flotação Rougher primária da usina de Chuquicamata.

3.1.2. Reagentes

Foram utilizados coletores e mistura de espumantes convencionais (utilizado pela empresa) para minérios sulfetados de cobre e leite de cal para regular o pH em 10,5. Foram utilizados SF 113 (Isopropil xantato de sódio) na concentração de $25 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ e SF 506 ($8 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$) como coletores dos minerais portadores de cobre. O espumante utilizado ($25 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$) foi uma mistura de DF 250 (um propileno glicol), MIBC (metil isobutil carbinol) e óleo de pinho na proporção de 4:3:3. Para os ensaios de flotação extensora foi utilizado óleo Diesel e querosene comercializado nos postos de combustíveis de Porto Alegre.

3.2. Métodos

3.2.1. Ensaio Standard (STD)

Os ensaios foram realizados em uma máquina de flotação Denver D-12 de laboratório e em uma célula de flotação quadrada em acrílico com capacidade de 3 litros, dotada de um raspador automático de espuma, com velocidade de raspagem controlada por um motor elétrico. A polpa contendo 38% de sólidos em peso e com pH em 10,5 regulado com leite de cal e monitorado com um medidor de pH marca “Analion™”, modelo PM 608, foi condicionada com os coletores SF 113 ($25 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$) e SF 506 ($8\cdot\text{t}^{-1}$) e com a mistura de espumantes ($25 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$) (adicionados nesta ordem) durante 1 minuto para difusão dos reagentes à 1000 rpm na própria célula de flotação. Após o tempo de condicionamento, o ar foi injetado na célula a uma vazão variável sendo controlado por um rotâmetro.

Os ensaios tiveram duração de 9 minutos e foram coletados os concentrados nos minutos 1, 2, 3, 5 e 9 de flotação com raspagem da polpa a cada cinco segundos, mantendo-se o volume dentro da célula constante com 3 adições injeções de água (100 mL nos minutos 2, 5 e 7,5) e com a variação do fluxo de ar. A Figura 3.5 mostra uma imagem dos equipamentos utilizados nos estudos. O procedimento detalhado dos ensaios STD esta descrito no Apêndice I.

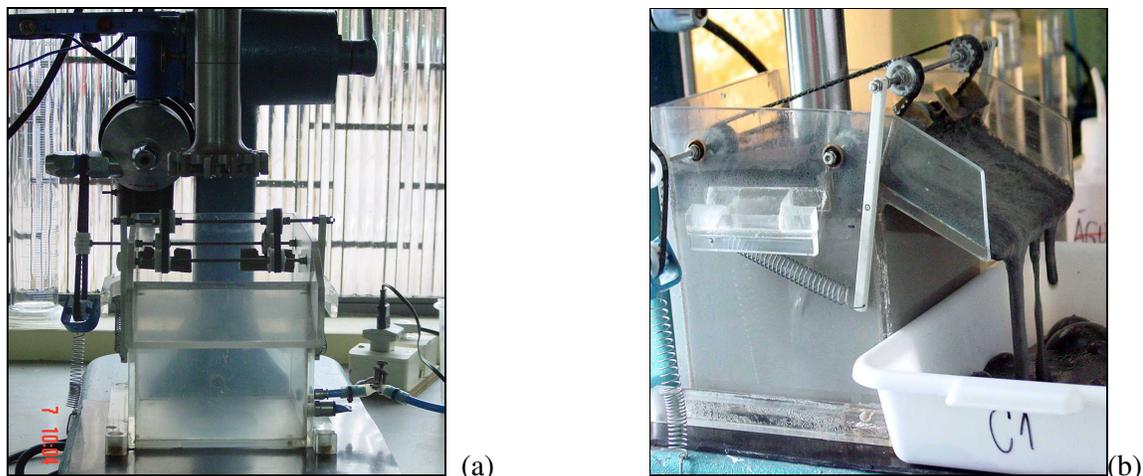


Figura 3.5. (a) imagem da célula utilizada nos estudos de flotação e (b) transbordo do concentrado no primeiro minuto de flotação.

Ao final dos testes as amostras de polpa (concentrados e rejeito) foram pesadas em balança semi-analítica marca Sartorius, filtradas em um filtro a vácuo de laboratório marca Denver e secas em estufa a uma temperatura máxima de 100 °C (12 h para os concentrados e 24 h para os rejeitos). Os concentrados secos foram desagregados em cadinho com auxílio de um bastão de porcelana e os rejeitos, cominuídos em moinho de bolas marca Denver com corpos moedores de cerâmica por uma hora. Toda massa dos concentrados foi enviada ao laboratório para digestão ácida e para os rejeitos uma massa de 30g, que foi retirada diretamente do moinho.

No laboratório de digestão, as amostras foram novamente homogeneizadas em moinho de porcelana e secas a 60 °C por uma hora em cápsulas de alumínio antes da pesagem. Para os concentrados a massa utilizada foi de 0,1 g do material e para os rejeitos 1 g e todas as digestões foram realizadas em duplicata. A análise de cobre e molibdênio foi feita através de absorção atômica em um equipamento modelo SpectrAA 110 da Varian®. A Figura 3.6 mostra o fluxograma simplificado dos estudos de flotação e o Apêndice II mostra o procedimento para digestão ácida e análise química das amostras.

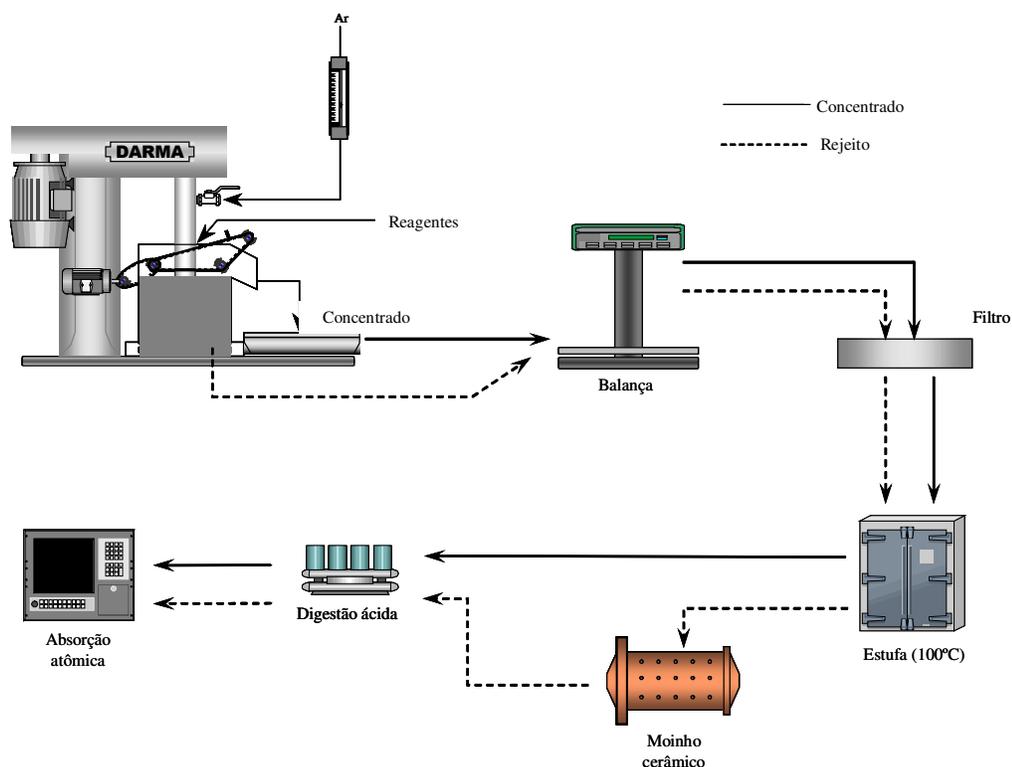


Figura 3.6. Fluxograma simplificado dos estudos de flotação.

3.2.2. Estudos de flotação extensora (EXT)

Os estudos de flotação extensora foram realizados com adição de óleos emulsificados ou não juntamente com os demais reagentes imediatamente após a adição dos coletores e antes da adição do espumante. Foram utilizados óleo Diesel e querosene comercializado nos postos de combustível de Porto Alegre.

A Tabela 10 apresenta a denominação dada aos diferentes estudos, o número ao lado do nome utilizado nos resultados representa a concentração de óleo adicionada, em g.t^{-1} .

Tabela 10. Denominação dada aos estudos de flotação.

Descrição do estudo realizado	Código utilizado
Flotação Standard (padrão)	STD
Flotação extensora com óleo Diesel emulsificado	EXT-OD
Flotação extensora com querosene emulsificado	EXT-QS
Flotação extensora com óleo Diesel não emulsificado	EXT-ODn

A Tabela 11 apresenta as principais características dos óleos utilizados nos estudos de flotação. As medidas de densidade (real) foram realizadas por picnometria e a viscosidade dinâmica (aparente) do óleo foi determinada com um viscosímetro de rotação variável Brookfield modelo LVT, o qual mede o torque necessário para girar um elemento imerso (*spindle*) no fluido analisado. A configuração adotada foi com o adaptador UL (*UL Adapter, closed with em cap*), especificamente projetado para fornecer grande sensibilidade a baixas viscosidades e que permite a imersão do tubo (recipiente) diretamente no banho térmico.

O grau API (*American Petroleum Engineering*) foi obtido pela seguinte equação 5:

$$^{\circ}API = \left(\frac{141,5}{\rho} \right) - 131,5 \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde ρ é a densidade do óleo.

Tabela 11. Características dos óleos utilizados nos estudos de flotação.

Óleo	Densidade		Viscosidade, cp
	g.cm ⁻³	grau API	
Diesel	0,83	38,8	4,5
Querosene	0,79	46,8	1,8

3.2.2.1. Estudos de flotação extensora com óleos emulsificados

Esses estudos foram realizados com a adição de uma emulsão óleo/água na concentração de 6000 g.L⁻¹ a qual foi adicionado à célula, imediatamente após a adição dos coletores, no volume correspondente à concentração desejada. As emulsões, com diâmetro médio de gota de 4 µm foram geradas com auxílio de um “Turrax” (agitador emulsificador de alta rotação marca INGENIERBÜRO CAT, modelo CAT NR6413). Essas foram preparadas emulsões de óleo sob agitação na rotação de 13000 RPM durante 10 minutos. A Figura 3.7 apresenta o diâmetro médio volumétrico das gotas das emulsões de óleo Diesel e querosene gerados pelo agitador Turrax. O tamanho de gota foi determinado por um granulômetro a laser (CILAS).

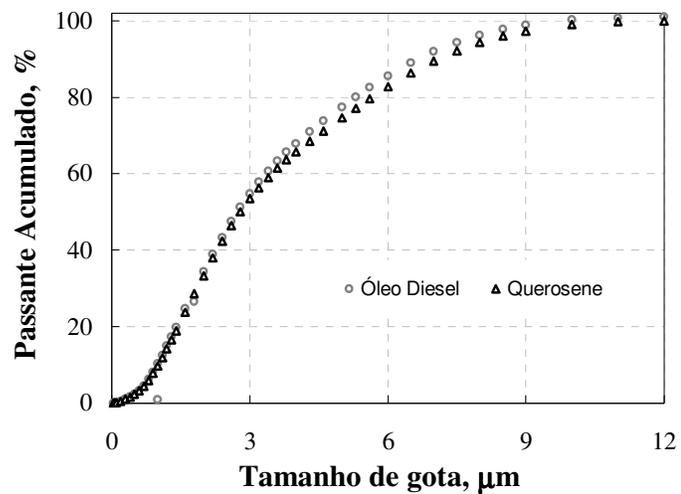
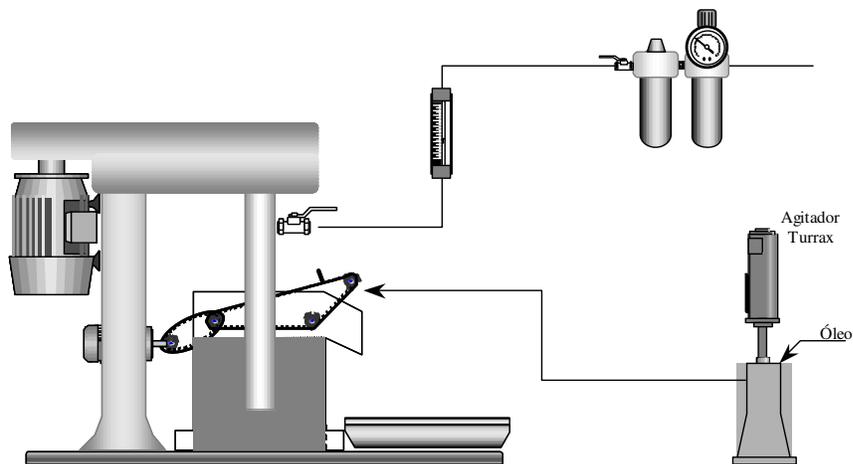


Figura 3.7 Tamanho de gota das emulsões de óleo Diesel e querosene gerados pelo agitador Turrax. $[\text{Óleo}] = 6000 \text{ mg.L}^{-1}$.

A Figura 3.8. mostra o fluxograma dos estudos de flotação com injeção de óleo emulsificado.



imediatamente após a adição dos coletores. Estes estudos foram realizados nas condições de maior recuperação de Cu e Mo dos testes com adição dos óleos emulsificados.

3.2.3. Preparo de emulsões óleo/água

Foi estudada ainda a geração de emulsões composta por utilizando uma bomba helicoidal de alta pressão, uma bomba dosadora, uma válvula agulha e dois manômetros para determinação da perda de carga. A água da rede de abastecimento foi impulsionada pela bomba helicoidal até a válvula agulha com o óleo Diesel injetado aproximadamente 5 cm antes da válvula. A passagem da mistura permite o cisalhamento do óleo, dispersando-o em gotas pequenas e produzindo emulsões estáveis com distintas distribuições de tamanho de gotas. (Santander, 1993; Rodrigues, 1999; Rosa, 2002).

Utilizando o sistema de abertura ou fechamento da válvula agulha, controla-se a perda de carga do sistema e, por consequência, o grau de cisalhamento e a mistura adequada do fluxo para obtenção do tamanho de gotas desejado. Em todos os ensaios foram geradas emulsões com 6000 mg.L^{-1} de óleo. Figura 3.9 mostra um desenho esquemático dos sistemas utilizados para geração das emulsões e a Tabela 12 mostra características do tamanho de gotas das emulsões óleo Diesel/água gerado nos métodos estudados.

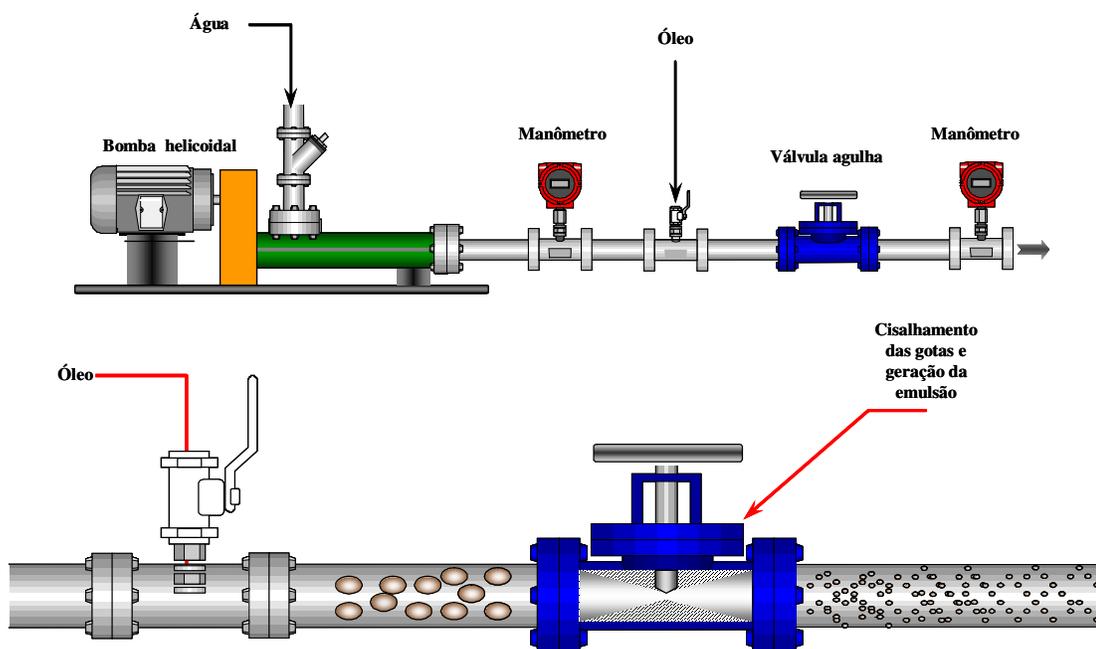


Figura 3.9. Desenho esquemático dos sistemas utilizados para geração das emulsões.

Tabela 12. Características do tamanho de gotas das emulsões óleo Diesel/água gerado nos métodos estudados.

Condição	D ₁₀ , μm	D ₅₀ , μm	D ₉₀ , μm	Diâmetro médio, μm
Turrax 13000 rpm	1,2	3,1	7,5	3,8
Bomba, 4 kgf.cm ⁻²	1,4	8,7	14,7	8,2
Bomba, 6 kgf.cm ⁻²	1,2	5,5	10,7	5,6
Bomba, 8 kgf.cm ⁻²	1,2	4,5	9,6	5,0

A Figura 3.10 apresenta o diâmetro médio volumétrico das gotas das emulsões óleo Diesel/água, geradas pelo agitador Turrax em comparação com emulsões geradas pela bomba helicoidal em função da perda de carga ocasionada pela válvula agulha.

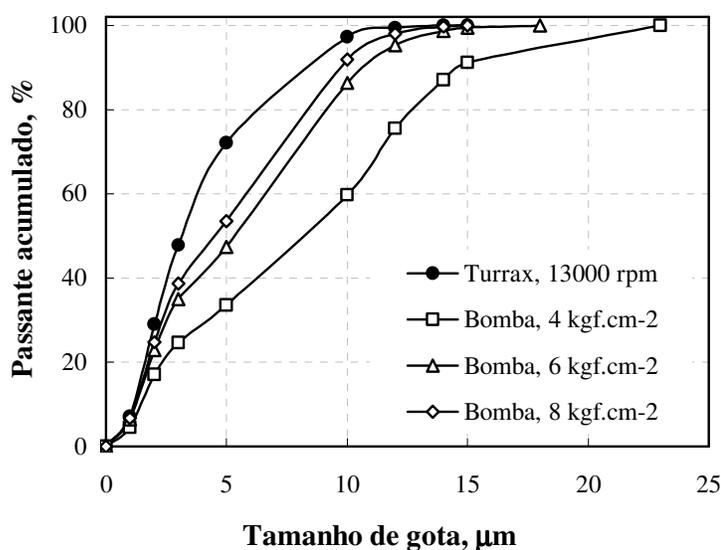


Figura 3.10. Tamanho de gota das emulsões óleo Diesel/água, geradas pelo agitador Turrax e pela bomba helicoidal em função da perda de carga ocasionada pela válvula agulha. [Óleo Diesel] = 6000 mg.L⁻¹.

Rosa (2002) utilizou um sistema semelhante ao mostrado na Figura 3.8 para geração de emulsões óleo/água preparadas utilizando-se petróleo proveniente da Plataforma PNA-1 (PETROBRÁS). Os resultados apresentados mostram que a partir de 12 kgf.cm⁻² de perda de carga ocasionada pela válvula de agulha, as reduções no diâmetro médio das gotas geradas são muito pequenas. A Figura 3.11 apresenta a relação entre o diâmetro médio volumétrico de

gotas, das emulsões óleo/água, em função da perda de carga ocasionada pela válvula de agulha.

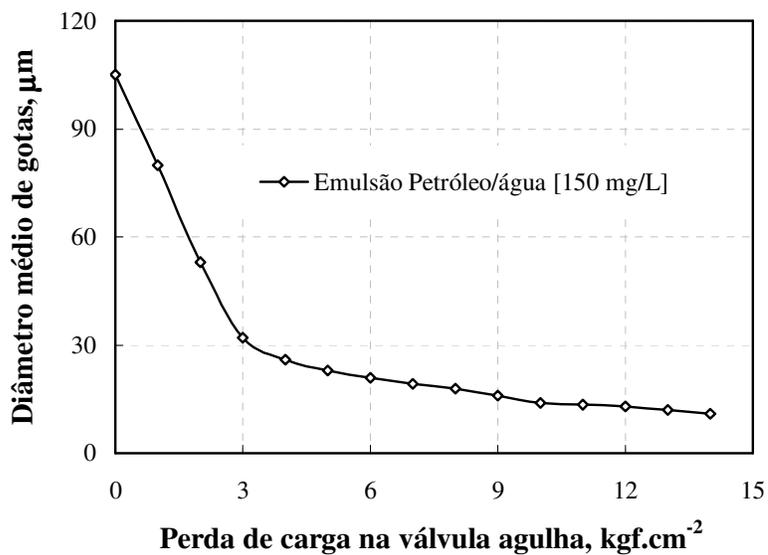


Figura 3.11. Diâmetro médio volumétrico de gotas das emulsões óleo/água em função da perda de carga na válvula agulha. Condições: Vazão de água oleosa de $37,5 \text{ L.min}^{-1}$; $[\text{Petróleo}] = 150 \text{ mg.L}^{-1}$ (Rosa, 2002).

A Figura 3.12 mostra as diferenças de aspecto da do óleo antes e após emulsificação.



Figura 3.12 Diferenças de aspecto do óleo antes e após emulsificação $[\text{óleo Diesel}] = 6000 \text{ g.L}^{-1}$.

3.2.4. Procedimentos analíticos para avaliação metalúrgica

A confiabilidade dos resultados encontrados nos estudos de flotação está apoiada nos valores de desvio padrão encontrado nos resultados das análises químicas. Os estudos STD foram realizados em 4 vias em tempos diferentes e os demais testes feitos em duplicata com uma terceira repetição para os melhores resultados. Todas as digestões ácidas foram realizadas em duas vias e as leituras de teor feitas por absorção atômica realizadas em duplicata. O Apêndice II resume os procedimentos analíticos adotados para avaliação metalúrgica dos resultados.

As Tabelas 13 e 14 mostram os valores (teores de Cu e Mo) obtidos nos estudos de flotação STD (4 ensaios e duas vias de análise) para alimentação (calculada), concentrados e rejeitos de flotação.

Tabela 13. Teores de cobre analisados na alimentação calculada, concentrado e rejeito para os quatro ensaios Standard LTM.

Corrente		STD – Teor de Cu, %				Média, %	Desvio padrão, %	Desvio relativo, %
		1	2	3	4			
Alimentação (calculada)	via I	1,059	1,059	1,059	1,059	1,05	0,010	1,0
	via II	1,040	1,040	1,040	1,040			
Concentrado	via I	12,51	12,48	12,48	12,50	12,49	0,017	1,0
	via II	12,48	12,46	12,50	12,47			
Rejeito	via I	0,18	0,17	0,17	0,17	0,18	0,006	3,6
	via II	0,18	0,18	0,17	0,18			

Tabela 14. Teores de molibdênio analisados na alimentação calculada, concentrado e rejeito para os quatro ensaios Standard.

Corrente		STD – Teor de Mo, %				Média, %	Desvio padrão, %	Desvio relativo, %
		1	2	3	4			
Alimentação (calculada)	via I	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,001	2,8
	via II	0,047	0,047	0,047	0,047			
Concentrado	via I	0,48	0,50	0,47	0,46	0,474	0,002	3,6
	via II	0,47	0,47	0,49	0,45			
Rejeito	via I	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,001	7,7
	via II	0,015	0,015	0,015	0,015			

3.2.5. Estudo dos parâmetros cinéticos

A cinética de flotação é o estudo da variação na quantidade de produto que é recuperado por extravasamento da espuma com o tempo de flotação e a identificação quantitativa de todas as variáveis que controlam esta taxa. Com tais variáveis mantidas constantes, a relação algébrica entre a quantidade de mineral flotado e o tempo de flotação determina a velocidade ou a taxa de flotação.

Existem várias equações que tentam modelar a cinética de flotação “*batch*” (em escala de laboratório). Uma delas é a Equação 6 proposta por Klimpel (Sepulveda e Gutierrez, 1986), a qual foi utilizada neste estudo para calcular os parâmetros cinéticos da flotação, por apresentar um melhor ajuste aos dados experimentais.

$$R = R_{\text{inf } \textit{inito}} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{1}{K \cdot t} \right) \cdot [1 - e^{(-K \cdot t)}] \right\} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde:

R representa a recuperação acumulada da espécie flotável no instante de tempo **t**;

K é a constante cinética de flotação da espécie flotável (min^{-1});

R_{infinito} é a recuperação máxima alcançada a um tempo infinito de flotação.

O produto da espuma recuperada por flotação é uma mistura de ar, água e partículas sólidas. As partículas podem sair pela corrente do concentrado por flotação real ou por arraste hidrodinâmico. A flotação real (*true flotation*) ocorre quando as partículas aderidas as bolhas de ar em uma polpa agitada e aerada sobem e chegam à camada de espuma saindo pela corrente do concentrado. Por outro lado, o arraste hidrodinâmico ocorre quando as partículas entram na camada de espuma suspensas na água que ocupa os espaços intersticiais entre as bolhas. Isto ocorre principalmente com as frações mais finas e não há distinção entre as partículas de minerais de valor e de ganga.

Neste estudo, para o cálculo da flotação real (ou recuperação real) e do arraste hidrodinâmico, foi utilizada a metodologia proposta por Warren (1985). Baseado em estudos experimentais, este autor propõe uma relação linear, após certo tempo de flotação, entre a recuperação acumulada de uma espécie e a recuperação acumulada de água. A partir desta

relação são determinadas as recuperações reais de cada espécie, que correspondem à interseção da reta no eixo das ordenadas, obtida quando a recuperação de água for igual a zero. Também é possível determinar o grau de arraste hidrodinâmico, dado pela inclinação da reta, que representa a razão entre a recuperação por arraste hidrodinâmico e a recuperação de água.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudos de flotação Standard (STD)

Estes estudos tiveram o objetivo de determinar os parâmetros de flotação que simulassem o comportamento da etapa Rougher de flotação da usina de Chuquicamata. Essa comparação foi realizada com a curva de recuperação em função do tempo de flotação fornecido pela empresa (STD-Chuquicamata). Os ensaios foram realizados em quatro vias em tempos diferentes e a confiabilidade dos resultados está baseada nos valores de desvio padrão, calculados entre os resultados dos ensaios de flotação Standard (quatro ensaios e duas vias de análise) para: Alimentação calculada, teor dos concentrados, teor dos rejeitos e recuperação acumulada no minuto 9.

A Tabela 15 mostra as recuperações de massa, água e teor de sólidos no concentrado final (para o tempo de flotação de 9 minutos) para os estudos de flotação STD.

Tabela 15. Recuperação de massa, água e teor de sólidos no concentrado final para os estudos de flotação STD.

Ensaio	Recuperação, %		Teor de sólidos no concentrado final, %
	massa	água	
STD-1	7,1	15,8	54,7
STD-2	7,2	16,7	53,0
STD-3	7,3	16,9	53,4
STD-4	7,2	17,5	51,0
STD-médio	7,2	16,7	52,8

4.1.1. Flotação de sulfetos de cobre

A Tabela 16 mostra os resultados de recuperação metalúrgica de Cu, recuperação real (*true flotation*), teor de cobre no concentrado (C), rejeito (R) e alimentação calculada (A), grau de arraste e constante cinética de flotação(K) (modelo Klimpel) para os estudos de flotação STD.

Tabela 16. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Cu na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética de flotação (K-modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação STD.

Ensaio	Recuperação de Cu, %		Teor de Cu, %			K (Klimpel) min^{-1}	Grau de arraste Cu
	metalúrgica	real	A	C	R		
STD-1	84,0	60,7	1,05	12,5	0,18	2,9	1,5
STD-2	84,4	62,7	1,06	12,5	0,18	3,1	1,4
STD-3	85,5	63,1	1,07	12,5	0,17	3,3	1,4
STD-4	84,7	63,2	1,06	12,5	0,17	3,0	1,3
STD-médio	84,6	63,3	1,06	12,5	0,18	3,1	1,4

A Figura 4.1 mostra a recuperação metalúrgica de cobre em função do tempo e na Figura 4.2, é mostrada a relação teor/recuperação para os quatros ensaios STD.

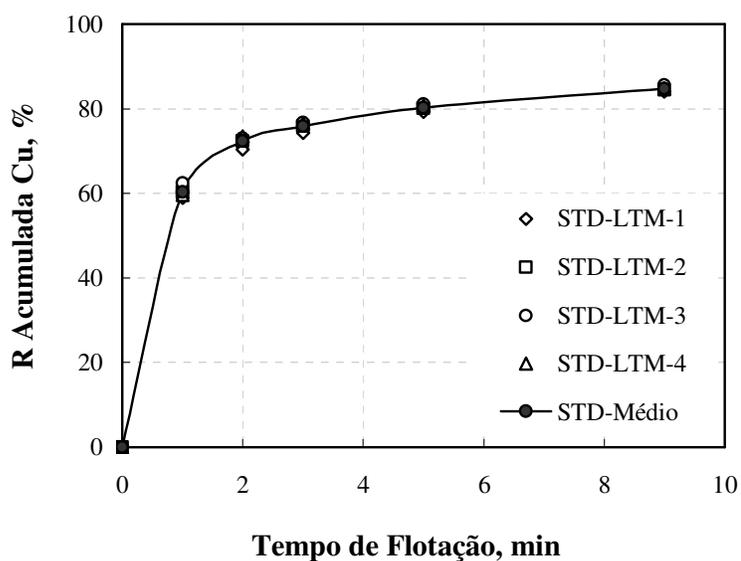


Figura 4.1. Recuperação metalúrgica de cobre em função do tempo de flotação nos estudos de flotação STD.

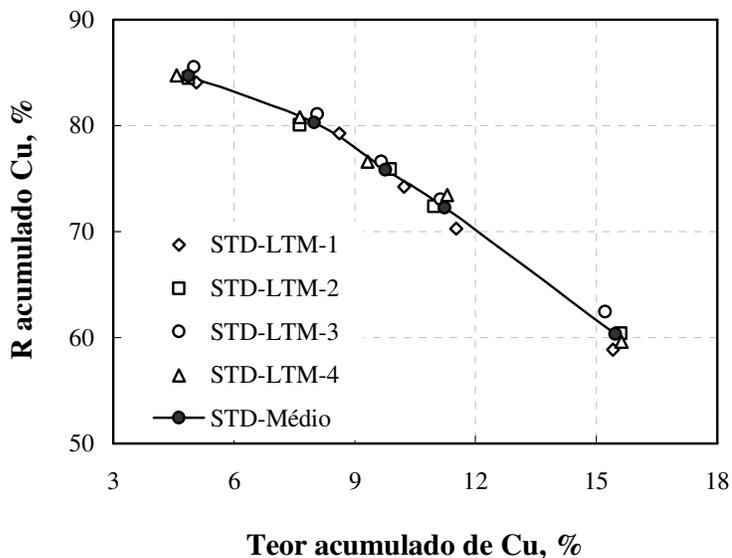


Figura 4.2. Relação teor/recuperação na flotação de sulfetos de cobre nos estudos de flotação STD.

A recuperação mássica foi de 7,2% e a recuperação metalúrgica de Cu variou entre 84 e 85,5%, (média de 84,6%). O teor de Cu nos concentrados foi de 12,5%, a recuperação real variou entre 60,7 e 63,3%, o grau de arraste foi de 1,4 e a constante cinética de flotação foi de $3,1 \text{ min}^{-1}$. Os resultados apresentam um baixo desvio padrão ($<1\%$) em termos de recuperação metalúrgica e teores de Cu, validando assim a metodologia empregada. Os valores médios encontrados nesses estudos foram utilizados para efeito de comparação com as técnicas estudadas.

4.1.2. Flotação de sulfeto de molibdênio

A Tabela 17 mostra os resultados de recuperação metalúrgica de Mo, recuperação real (*true flotation*), teor de molibdênio no concentrado (C), rejeito (R) e alimentação calculada (A), grau de arraste e constante cinética de flotação(K) (modelo Klimpel) para os estudos de flotação STD.

Tabela 17. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Mo na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação STD.

Ensaio	Recuperação de Mo, %		Teor de Mo, %			K (Klimpel) min^{-1}	Grau de arraste Mo
	metalúrgica	real	A	C	R		
STD-1	71,4	44,0	0,05	0,48	0,015	2,2	1,8
STD-2	73,1	42,7	0,05	0,46	0,013	2,1	1,9
STD-3	72,6	44,8	0,05	0,47	0,014	2,4	1,7
STD-4	72,6	45,2	0,05	0,46	0,014	2,2	1,6
STD-médio	72,6	44,1	0,05	0,47	0,014	2,2	1,7

A Figura 4.3 mostra a recuperação metalúrgica de molibdênio em função do tempo e na Figura 4.4 é mostrada a relação teor/recuperação de Mo para os quatro ensaios STD.

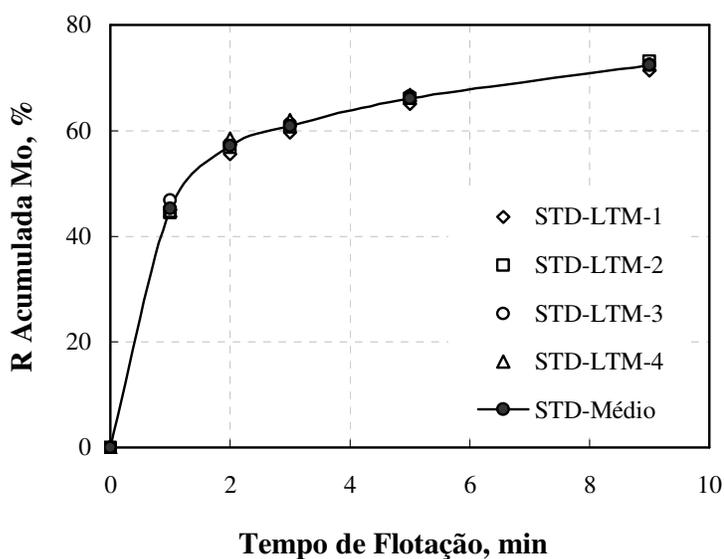


Figura 4.3. Recuperação metalúrgica de molibdênio em função do tempo de flotação nos estudos de flotação STD.

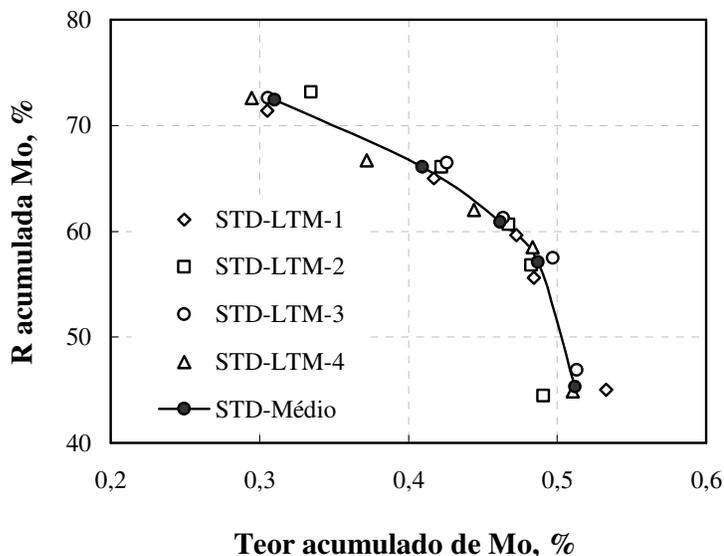


Figura 4.4. Relação teor/recuperação na flotação de sulfetos de molibdênio nos estudos de flotação STD.

A recuperação metalúrgica de molibdênio variou entre 71,4 a 73,1 e o teor de Mo nos concentrados foi de 0,14%, a recuperação real variou entre 42,7 e 45,2%, o grau de arraste foi de 1,7 e a constante cinética de flotação foi de $2,2 \text{ min}^{-1}$. Os resultados dos parâmetros analisados nos estudos de flotação de sulfetos de molibdênio apresentam um maior desvio relativo quando comparados com os estudos de flotação de sulfetos de cobre (1 % para o Cu e 2,8 % para o Mo). Esses desvios podem ser atribuídos a erros analíticos devidos ao baixo teor de Mo na amostra da alimentação. Apesar disso, os valores médios encontrados nesses estudos foram utilizados para efeito de comparação com as técnicas estudadas.

4.1.3. Comparação entre os resultados dos estudos STD com a flotação Rougher primária da usina de Chuquicamata

As figuras 4.5 e 4.6 mostram a comparação entre valores de recuperação de sólidos e cobre em função do tempo de flotação da etapa Rougher primária da usina de Chuquicamata (STD-Chuqui-1 e STD-Chuqui-2), com os resultados obtidos nos estudos de flotação STD.

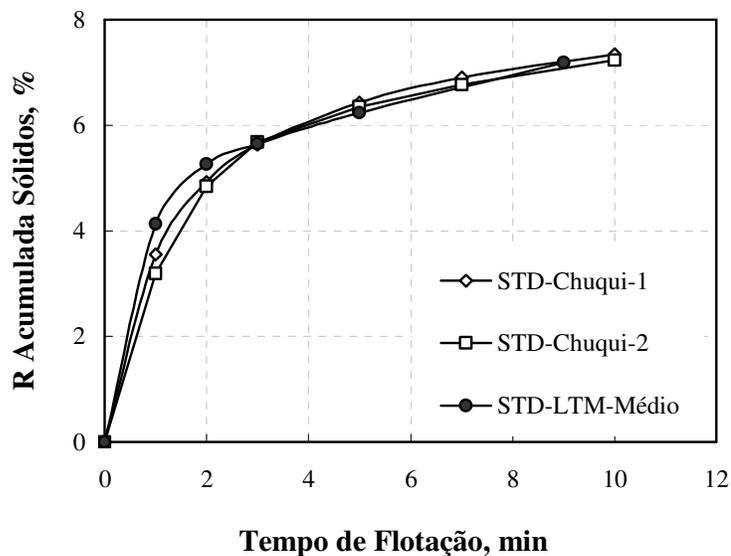


Figura 4.5. Recuperação acumulada de sólidos em função do tempo da flotação. Comparação entre os resultados de flotação da etapa Rougher primária da usina de Chuquicamata com os resultados obtidos nos estudos de flotação STD.

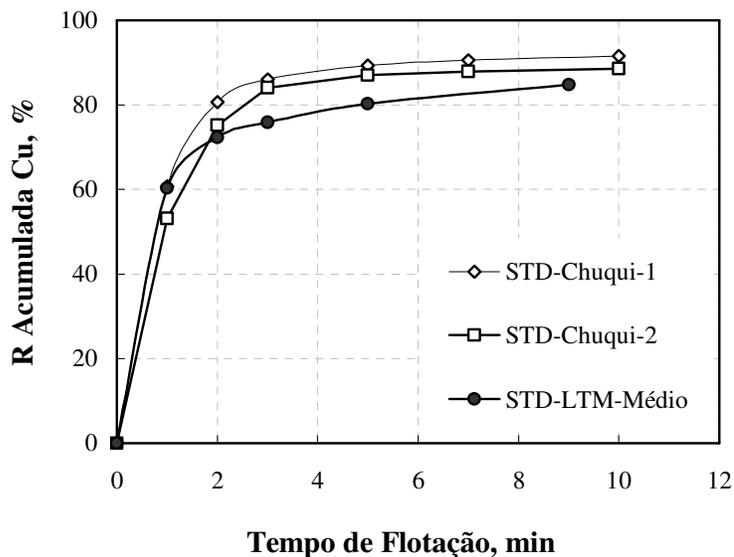


Figura 4.6. Recuperação metalúrgica de cobre em função do tempo da flotação. Comparação entre os resultados de flotação da etapa Rougher da usina de Chuquicamata com os resultados obtidos nos estudos de flotação STD.

Os resultados mostram que as recuperações em massa são muito semelhantes, mas as curvas de recuperação de cobre são diferentes. A menor recuperação dos ensaios STD

realizados neste trabalho pode ser atribuída a maior proporção de grossos e sua distribuição de cobre nestas frações (Figura 3.4). Ainda esta amostra pode apresentar menor liberação nas frações grossas.

4.2. Estudos de flotação extensora com óleo emulsificado (EXT-OD e EXT-QS)

Nestes estudos foram avaliados o efeito da adição de óleo Diesel e querosene emulsificados nas concentrações de 30, 60, 90 e 120* g.t⁻¹ (*somente para óleo Diesel) na flotação de sulfetos de cobre e molibdênio. A Tabela 18 mostra as recuperações de massa, água e teor de sólidos no concentrado final (para o tempo de flotação de 9 minutos) para estes estudos em comparação com o STD.

Tabela 18. Recuperação de massa, água e teor de sólidos no concentrado final para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado em comparação com o STD.

Ensaio	Recuperação, %		Teor de sólidos no concentrado final, %
	massa	água	
STD	7,2	16,7	52,8
OD-30	7,2	16,0	54,8
OD-60	8,1	20,1	52,9
OD-90	8,9	21,1	52,1
OD-120	7,2	16,7	53,3
QS-30	7,8	19,9	49,0
QS-60	7,5	18,3	50,8
QS-90	7,4	17,9	51,2

4.2.1. Flotação de sulfetos de cobre

A Tabela 19 mostra os resultados de recuperação metalúrgica de Cu, recuperação real (*true flotation*), teor de cobre no concentrado (C), rejeito (R) e alimentação calculada (A), grau de arraste e constante cinética de flotação (K) para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado. Os resultados mostram comportamento semelhante para os dois óleos, com ganhos de recuperação metalúrgica, real e cinética de flotação, sem reduções significativas no teor dos concentrados.

Tabela 19. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Cu na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética K (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação EXT OD e QS em comparação com o STD.

Ensaio	Recuperação de Cu, %		Teor de Cu, %			K (Klimpel) min^{-1}	Grau de arraste Cu
	metalúrgica	real	A	C	R		
STD	84,6	63,3	1,06	12,5	0,18	3,1	1,3
OD-30	84,6	63,7	1,03	12,1	0,17	3,4	1,3
OD-60	86,8	64,3	1,07	11,8	0,15	3,4	1,2
OD-90	89,1	67,9	1,08	11,3	0,13	3,4	1,1
OD-120	86,9	66,2	1,10	12,6	0,15	3,4	1,2
QS-30	85,2	66,0	1,02	12,2	0,16	3,4	1,1
QS-60	85,8	67,0	1,00	11,5	0,16	4,1	1,1
QS-90	86,2	68,0	1,00	11,8	0,15	3,4	1,2

A Figura 4.7 mostra a recuperação metalúrgica de Cu em função do tempo de flotação para os ensaios com injeção de óleo Diesel e querosene em comparação com o STD. Na Figura 4.8 é mostrada a recuperação metalúrgica de Cu ao final da flotação e nas Figura 4.9 e 4.10 são mostrados a recuperação real e teor de cobre nos rejeitos, respectivamente.

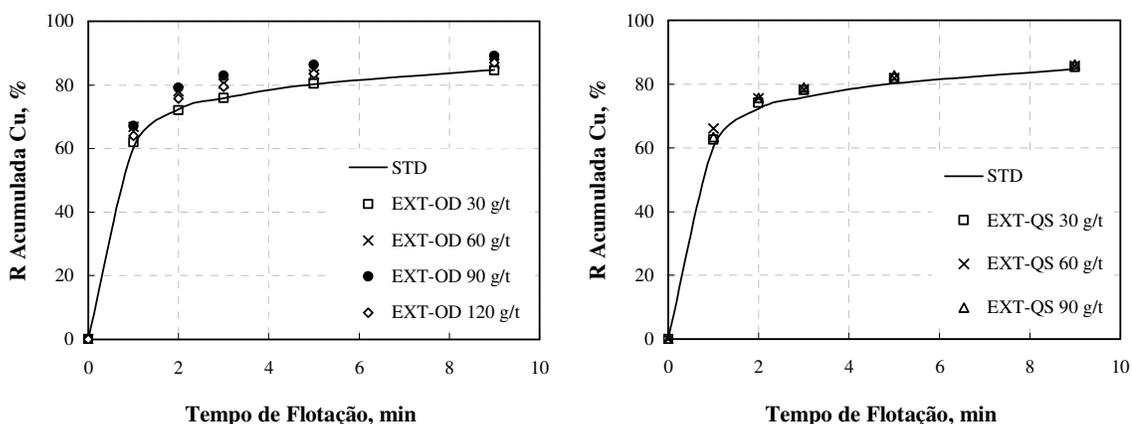


Figura 4.7. Recuperação metalúrgica de cobre em função do tempo de flotação. Efeito da adição de óleo Diesel e querosene emulsificado.

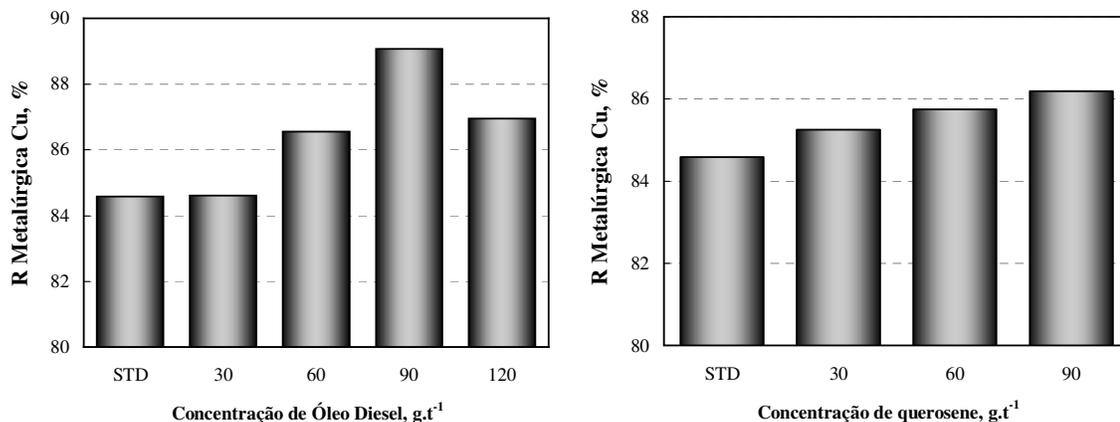


Figura 4.8. Efeito da adição de óleo emulsificado na recuperação final cobre.

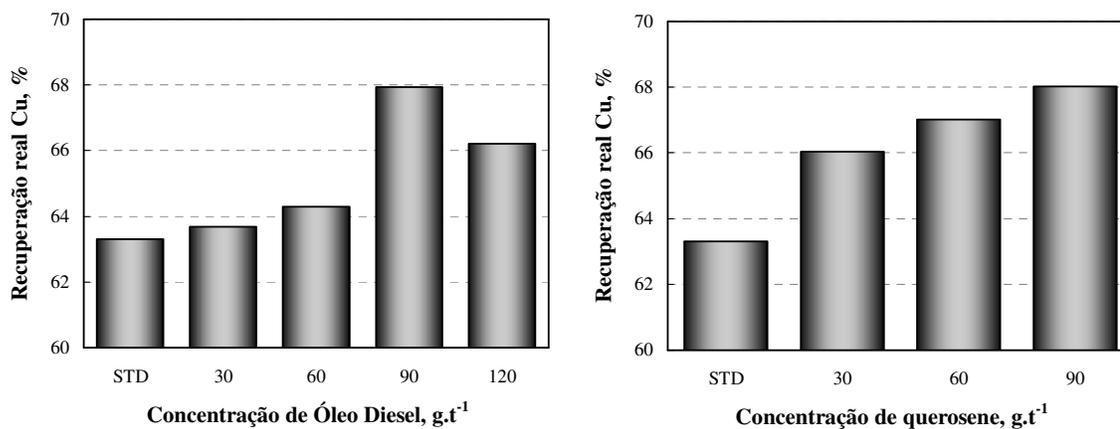


Figura 4.9. Efeito da adição de óleo emulsificado na recuperação real de cobre.

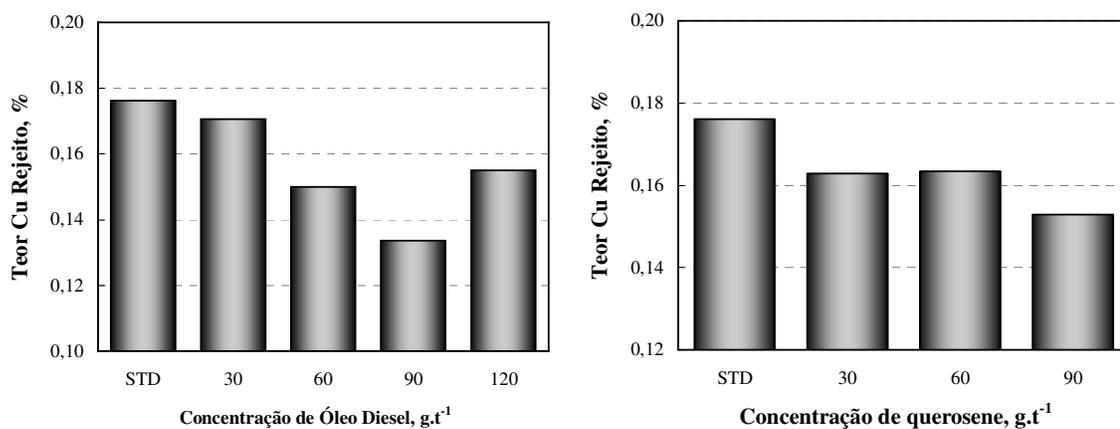


Figura 4.10. Efeito da adição de óleo emulsificado no teor de cobre nos rejeitos.

A Figura 4.11 mostra a curva de teor/recuperação de cobre para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado em comparação com o STD e a Figura 4.12 mostra o efeito da adição de óleo emulsificado na constante cinética de flotação de cobre (Modelo Klimpel) em comparação com o STD.

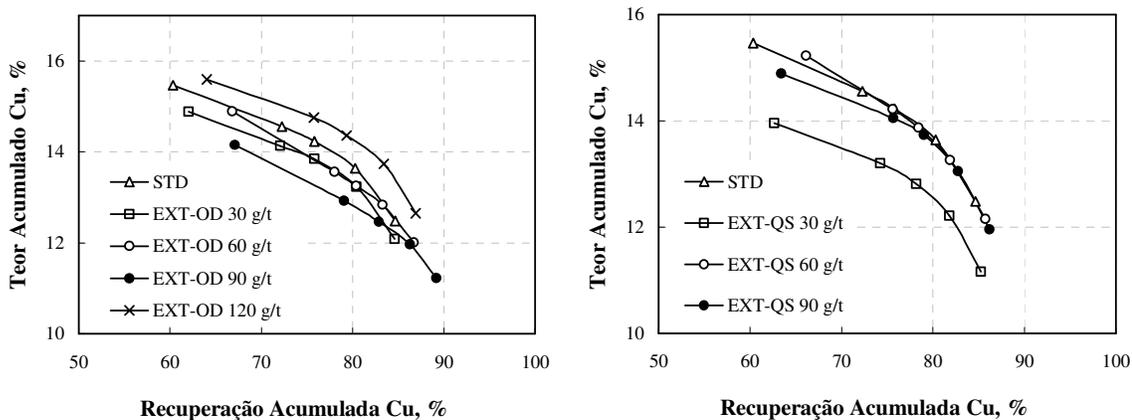


Figura 4.11. Curva de teor/recuperação de cobre para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado.

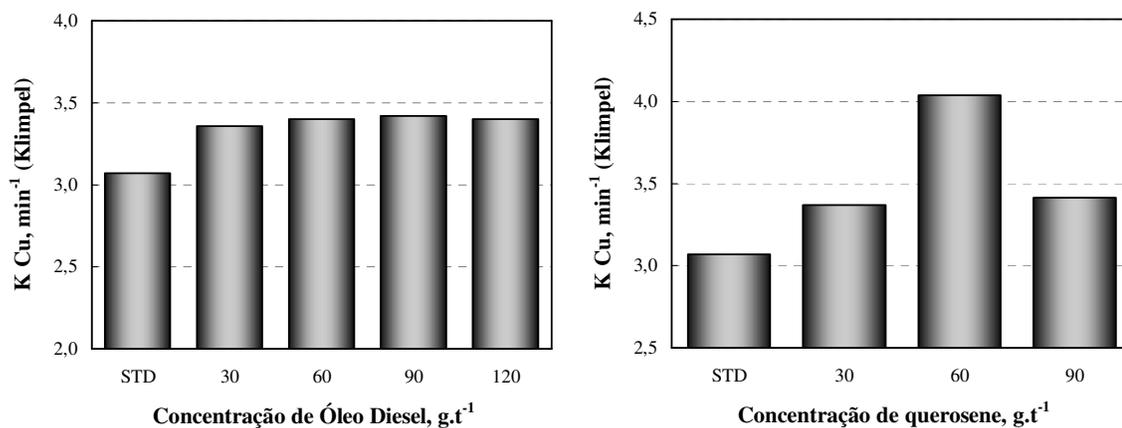


Figura 4.12. Efeito da adição de óleo emulsificado na constante cinética de flotação de cobre (Modelo Klimpel) em comparação com o STD.

Os melhores resultados foram obtidos com adição de óleo Diesel emulsificado na concentração de 90 g.t⁻¹, alcançando recuperação de Cu superior a 89% (84,6% no STD) e ganho de 4,6% na recuperação real. A constante cinética teve o mesmo acréscimo para todas

as concentrações, subindo de 3,1 para 3,4 min^{-1} . Para todos os ensaios o grau de arraste foi menor que no STD.

Nos estudos com adição de querosene emulsificado os melhores resultados também foram obtidos com adição de 90 g.t^{-1} , porém com ganhos menores. A recuperação metalúrgica de Cu foi de 86,2% e a recuperação real teve um acréscimo de 4,7%. Os menores ganhos, em relação ao OD, podem ser explicados pela interação existente entre os grupos naftênicos do óleo Diesel e os sítios hidrofóbicos dos sulfetos comprovando estudos e resultados anteriores (Rosas, 1975; Bos e Quast 2000).

Para concentração de 120 g.t^{-1} de óleo Diesel é observado um decréscimo na recuperação de cobre para 87% (89% para o EXT-OD 90) e na recuperação real. Este efeito pode ser explicado pelo excesso de óleo recobrando as partículas causando um aumento excessivo da sua hidrofobicidade e pela presença de gotículas livres de óleo que não interagiram com a superfície do sulfeto e foram levadas até a camada de espuma.

4.2.2. Flotação de sulfetos de molibdênio

A Tabela 20 mostra os resultados de recuperação metalúrgica de Mo, recuperação real (*true flotation*), teor de Mo no rejeito, grau de arraste e constante cinética de flotação (modelo Klimpel) para os estudos de flotação extensora com injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado em comparação com o STD.

Tabela 20. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Mo na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética K (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação EXT-OD em comparação com o STD.

Ensaio	Recuperação de Mo %		Teor de Mo, %			K (Klimpel) min^{-1}	Grau de arraste Mo
	metalúrgica	real	A	C	R		
STD	72,6	44,1	0,05	0,47	0,014	2,2	1,7
OD-30	73,5	47,8	0,04	0,45	0,013	2,3	1,4
OD-60	76,0	48,1	0,05	0,44	0,012	2,2	1,2
OD-90	78,2	49,9	0,05	0,44	0,012	2,3	1,0
OD-120	75,0	51,3	0,05	0,45	0,15	3,4	1,2
QS-30	74,8	53,4	0,04	0,43	0,01	2,7	1,0

QS-60	74,8	51,3	0,04	0,44	0,01	2,8	1,1
QS-90	74,8	55,0	0,04	0,44	0,01	2,8	1,1

A Figura 4.13 mostra a recuperação metalúrgica de Mo em função do tempo de flotação para os estudos com injeção de óleo Diesel e querosene em comparação com o STD e Na Figura 4.14 é mostrado o efeito da concentração dos óleos na recuperação metalúrgica de Mo ao final do nono minuto de flotação. O molibdênio apresentou comportamento semelhante ao observado na flotação de Cu, porém os efeitos positivos (maior recuperação) da adição do óleo na recuperação de Mo já são encontrados para as concentrações de 30 g.t⁻¹, a menor utilizada.

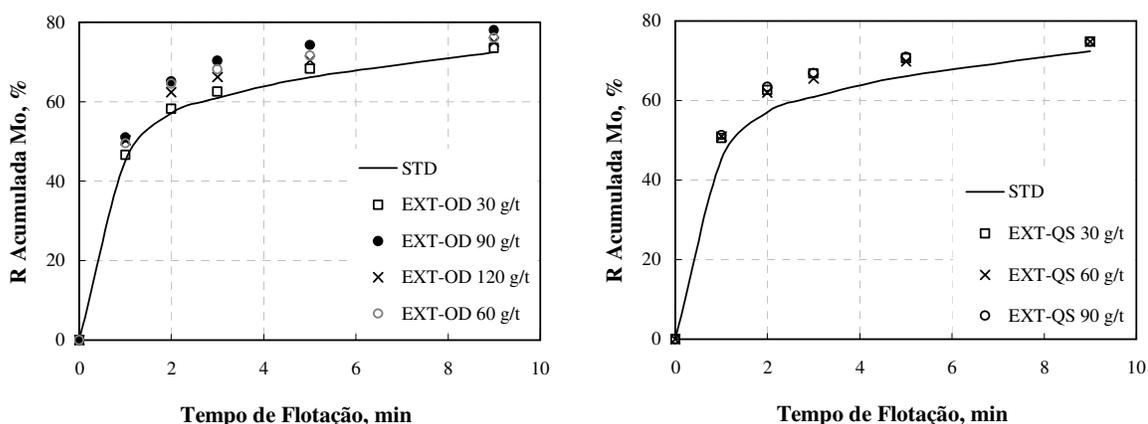


Figura 4.13. Recuperação metalúrgica de Mo em função do tempo de flotação. Efeito da adição de óleo Diesel e querosene emulsificado.

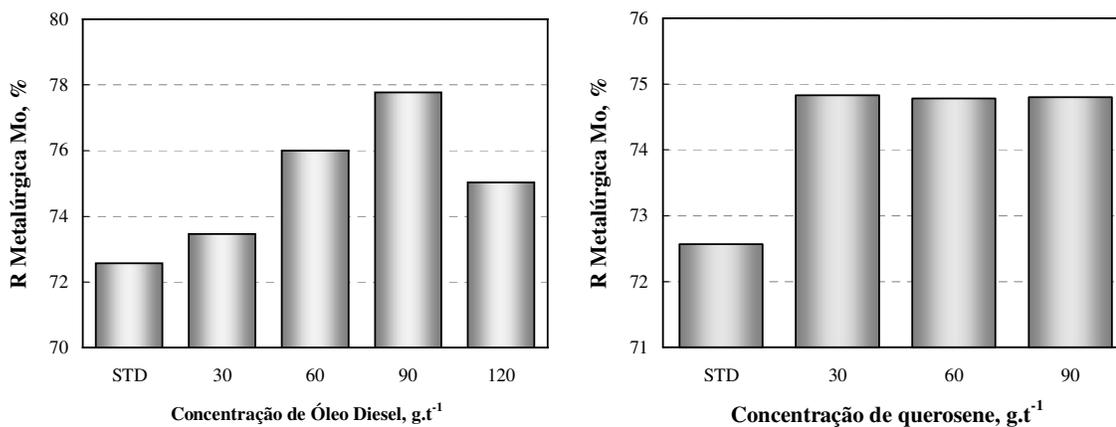


Figura 4.14. Efeito da adição de óleo emulsificado na recuperação metalúrgica de molibdênio no final da flotação.

Na Figura 4.15 são mostrados o efeito da adição de óleo Diesel e querosene emulsificado na recuperação real de molibdênio e na Figura 4.16 são mostrados os teores nos rejeitos desses ensaios.

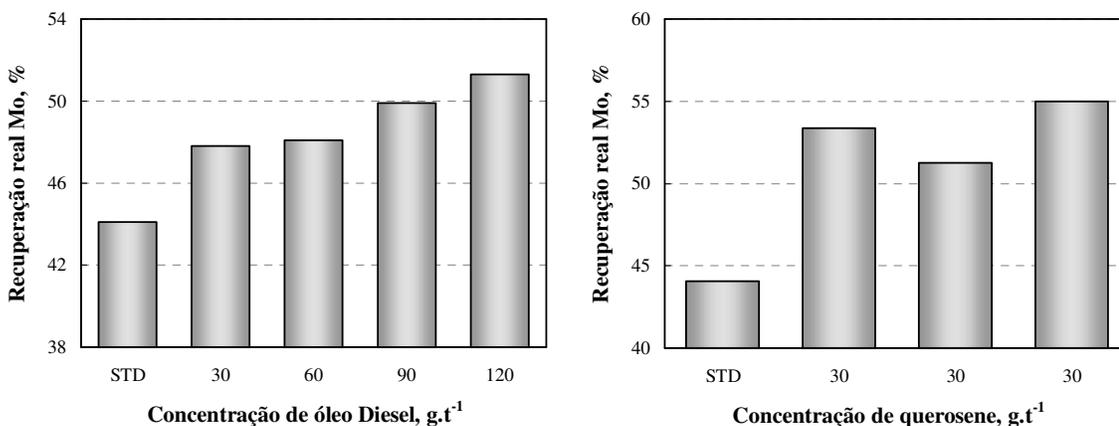


Figura 4.15. Efeito da adição de óleo Diesel e querosene emulsificado na recuperação real de molibdênio.

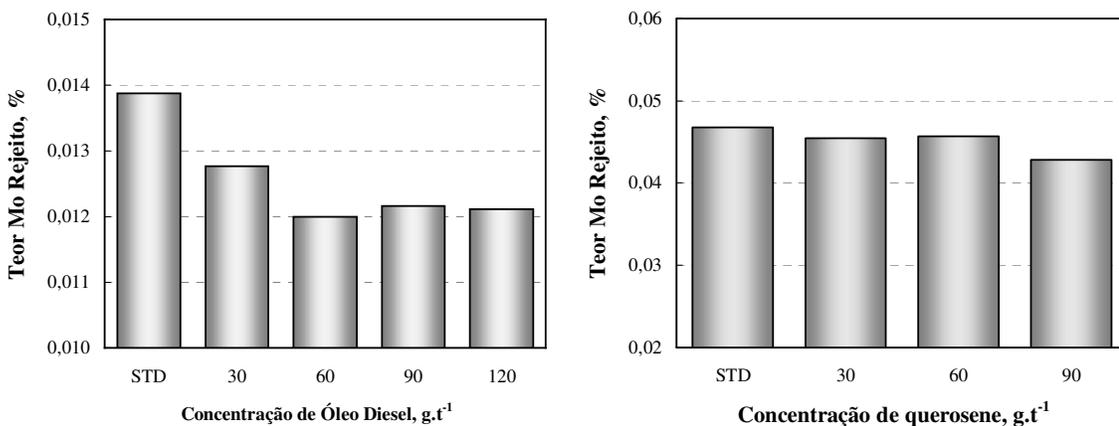


Figura 4.16. Efeito da adição de óleo emulsificado no teor de molibdênio nos rejeitos dos estudos em comparação com o STD.

A Figura 4.17 mostra a curva de teor/recuperação de molibdênio para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado em comparação com o STD e a

Figura 4.18 mostra o efeito da adição de óleo emulsificado na constante cinética de flotação de molibdênio (Modelo Klimpel) em comparação com o STD.

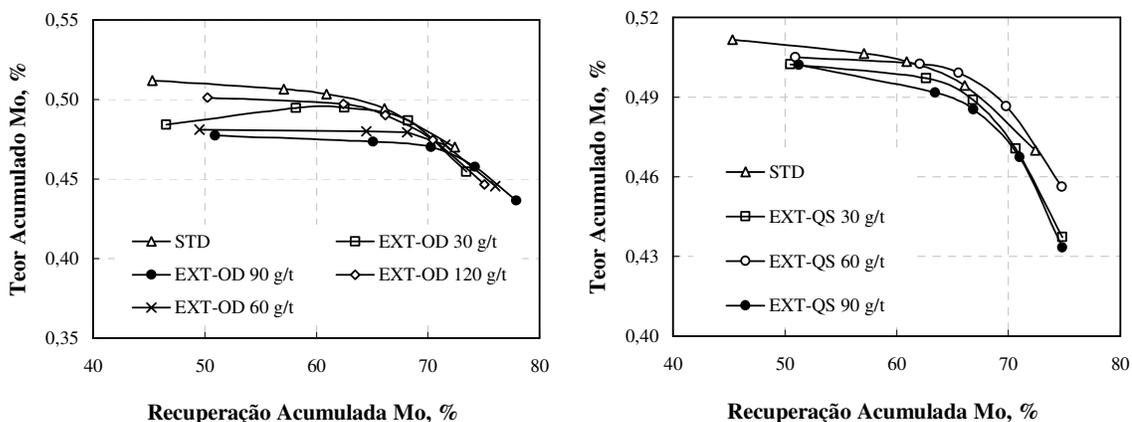


Figura 4.17. Curva de teor/recuperação de molibdênio para os estudos de flotação como injeção de óleo Diesel e querosene emulsificado.

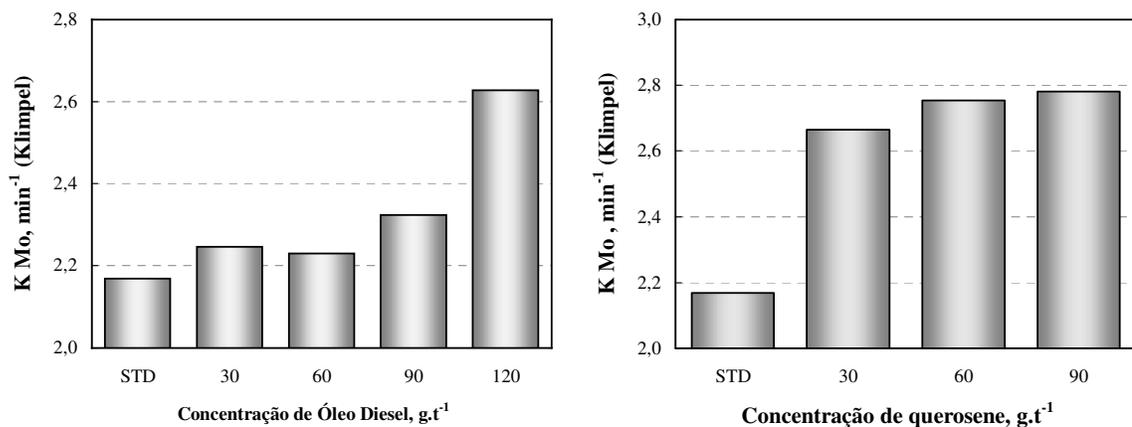


Figura 4.18. Efeito da adição de óleo emulsificado na constante cinética de flotação de molibdênio (Modelo Klimpel) em comparação com o STD.

A flotação de Molibdenita com adição de óleo Diesel emulsificado apresentou comportamento semelhante aos resultados obtidos com sulfetos de Cu, com aumento crescente da recuperação até a concentração de 90 g.t⁻¹. Nos melhores resultados foram verificados ganhos de 5,6% na recuperação metalúrgica e de 7,2 % na recuperação real, e em todos os ensaios houve diminuição do grau de arraste de molibdênio.

Para os estudos EXT-QS os ganhos com adição de querosene emulsificado na flotação de molibdênio foram muito semelhantes em todas as concentrações testadas. Na concentração de 30 g.t^{-1} a recuperação metalúrgica de Mo foi de 74,8 % com ganho de 2,2 %. A recuperação real passou de 44,1 para 57,4 % e a constante cinética subiu para $2,7 \text{ min}^{-1}$.

Da mesma forma que no caso da flotação sulfetos de cobre, a diminuição na recuperação para concentrações de 120 g.t^{-1} ocorre devido a falta de estabilidade na camada de espuma provocado pelo excesso de óleo. A constante cinética de flotação permaneceu sem ganhos significativos. Na maior concentração testada o resultado é afetado pelo retardo do crescimento da camada de espuma, causada pelo óleo em excesso.

4.3. Estudos de flotação extensora com óleo Diesel não emulsificado (EXT-ODn)

Estes estudos foram realizados com objetivo de verificar o efeito da emulsificação dos reagentes na flotação dos sulfetos de cobre e molibdênio e foram feitos com adição de óleo Diesel na concentração de 90 g.t^{-1} (melhor resultado dos estudos com adição de reagentes emulsificados). A Tabela 21 mostra as recuperações de massa, água e teor de sólidos no concentrado final (para o tempo de flotação de 9 minutos) para estes estudos em comparação com o STD.

Tabela 21. Recuperação de massa, água e teor de sólidos no concentrado final para os estudos de flotação com injeção de óleo Diesel não emulsificado em comparação com o STD.

Ensaio	Recuperação, %		Teor de sólidos no concentrado final, %
	massa	água	
STD	7,2	16,7	52,8
ODn-90	7,2	17,4	51,5

4.3.1. Flotação de sulfetos de cobre

A flotação com adição de óleo diesel não emulsificado apresentou a zona de espuma mais espessa (densa e menor) em comparação com os ensaios STD e EXT com o mesmo óleo emulsificado, principalmente no primeiro minuto, impedindo o início do transbordo do concentrado. A Tabela 22 mostra os resultados de recuperação metalúrgica de Cu, recuperação real (*true flotation*), teor de Cu no rejeito, grau de arraste e constante cinética de

flotação (modelo Klimpel) para os estudos de flotação extensora com injeção de óleo Diesel não emulsificado em comparação com o STD.

Tabela 22. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Cu na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética K (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação EXT-ODn em comparação com o STD.

Ensaio	Recuperação de Cu, %		Teor de Cu, %			K (Klimpel) min^{-1}	Grau de arraste Cu
	metalúrgica	real	A	C	R		
STD	84,6	63,3	1,06	12,5	0,18	3,1	1,3
ODn-90	85,3	64,8	1,00	11,9	0,16	2,6	1,2

A Figura 4.19 mostra a recuperação metalúrgica de cobre em função do tempo de flotação em comparação com o STD. Na Figura 4.20 é mostrada a recuperação metalúrgica de cobre ao final da flotação e na Figura 4.21 é mostrado o efeito da adição de óleo Diesel não emulsificado na constante cinética de flotação de Cu.

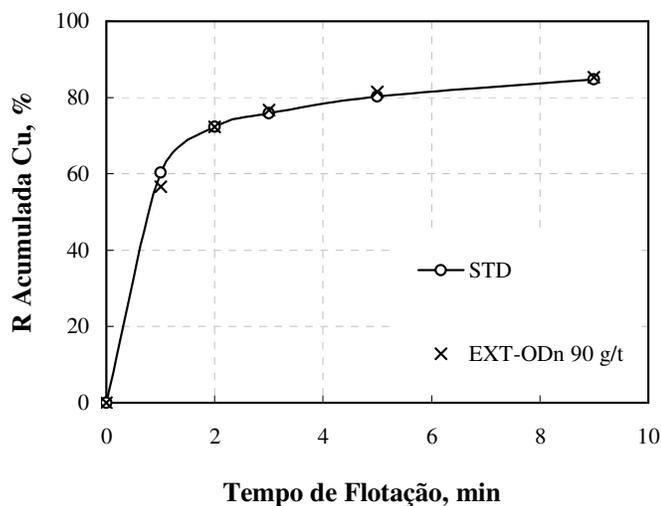


Figura 4.19. Recuperação acumulada de cobre em função do tempo da flotação. Comparação entre EXT-ODn e STD. [Óleo Diesel não emulsificado] = 90 g.t^{-1} .

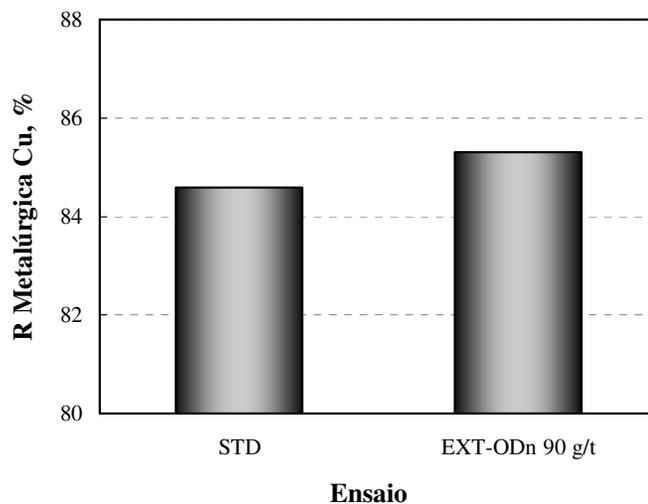


Figura 4.20. Efeito da injeção de óleo Diesel não emulsificado na recuperação metalúrgica de cobre no nono minuto de flotação. [Óleo Diesel não emulsificado] = 90 g.t⁻¹.

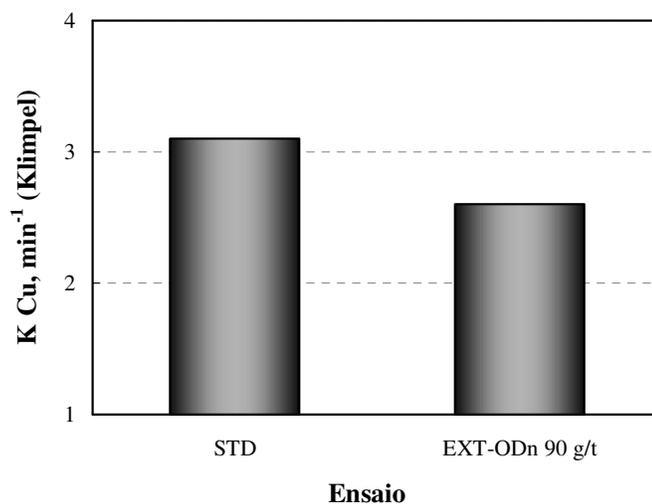


Figura 4.21. Efeito da adição de óleo Diesel não emulsificado na constante cinética de flotação de cobre (Modelo Klimpel). [óleo Diesel] = 90 g.t⁻¹.

As tabelas e figuras mostram que os estudos com adição de óleo Diesel não emulsificado não apresentaram vantagens significativas sobre o STD. É observado um pequeno ganho na recuperação metalúrgica e real de cobre (menor que 1%), mas com uma perda expressiva na cinética de flotação que reduziu de 3,1 no STD para 2,6 min⁻¹. As reduções são maiores ainda quando comparados com os estudos realizados com o mesmo óleo emulsificado. Os demais parâmetros de separação avaliados não sofreram alterações.

4.3.2. Flotação de sulfetos de molibdênio

A Tabela 23 mostra os resultados de recuperação metalúrgica de Mo, recuperação real (*true flotation*), teor de Mo no rejeito, grau de arraste e constante cinética de flotação (modelo Klimpel) para os estudos de flotação extensora com injeção de óleo Diesel não emulsificado em comparação com o STD.

Tabela 23. Resultados de recuperação metalúrgica, recuperação real, teor de Mo na alimentação (calculada), concentrado e rejeito, constante cinética K (modelo Klimpel) e grau de arraste para os estudos de flotação EXT-ODn em comparação com o STD.

Ensaio	Recuperação de Mo %		Teor de Mo, %			K (Klimpel) min^{-1}	Grau de arraste Mo
	metalúrgica	real	A	C	R		
STD	72,6	44,1	0,05	0,47	0,014	2,2	1,7
ODn-90	72,9	64,9	0,04	0,44	0,012	2,1	1,2

A Figura 4.22 mostra a recuperação metalúrgica de molibdênio em função do tempo de flotação em comparação com o STD. Na Figura 4.23 é mostrada a recuperação metalúrgica de Mo ao final da flotação e na Figura 4.24 é mostrado o efeito da adição de óleo Diesel não emulsificado na constante cinética de flotação de Mo.

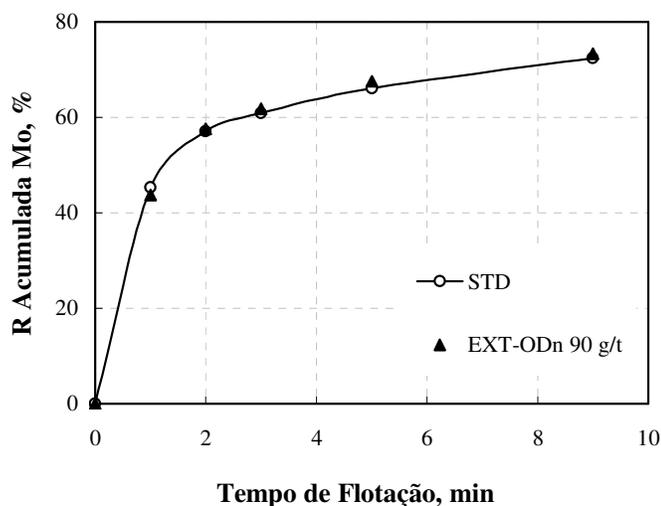


Figura 4.22. Recuperação acumulada de molibdênio em função do tempo da flotação. Comparação entre EXT-ODn e STD. [Óleo Diesel não emulsificado] = 90 g.t^{-1} .

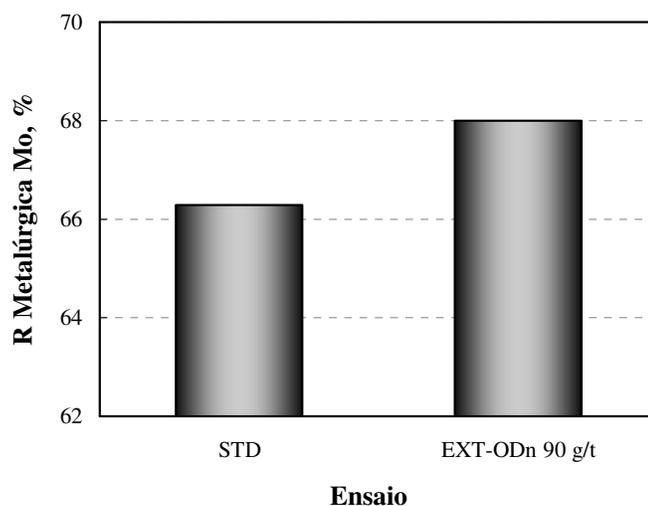


Figura 4.23. Efeito da injeção de óleo Diesel não emulsificado na recuperação metalúrgica de molibdênio no nono minuto de flotação. [Óleo Diesel não emulsificado] = 90 g.t^{-1} .

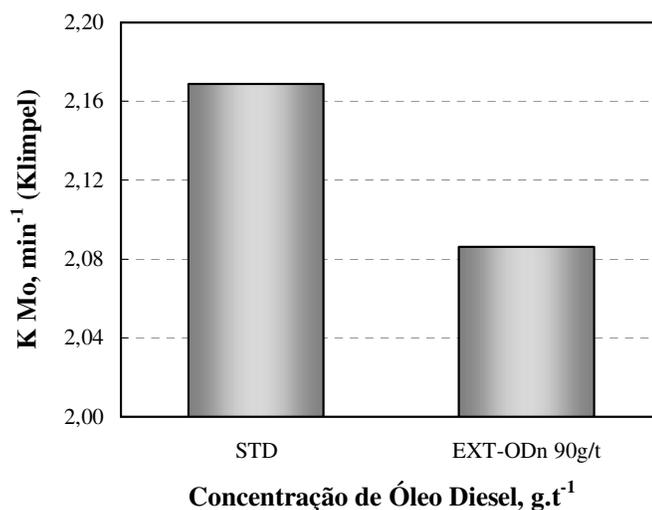


Figura 4.24. Efeito da adição de óleo Diesel não emulsificado na constante cinética de flotação de molibdênio (Modelo Klimpel). [óleo Diesel] = 90 g.t^{-1} .

Como nos estudos anteriores a flotação de Molibdenita com adição de óleo Diesel não emulsificado apresentou comportamento semelhante aos resultados obtidos com sulfetos de Cu, sem grandes ganhos em todos os parâmetros analisados em relação aos estudos utilizando o mesmo óleo de maneira emulsificada e perda na constante cinética de flotação ocasionada

pele efeito do óleo que não reagiu com a superfície dos sulfetos nas características estruturais da camada de espuma

4.4. Avaliação dos resultados nas frações finas e ultrafinas

Para avaliação dos resultados nas frações de interesse (F-UF) foram comparados os ensaios EXT-OD 90 (melhores resultados de flotação extensora) com o ensaio STD. Resultados obtidos por faixa granulométrica, comprovam o efeito positivo da adição de óleo Diesel emulsificado na recuperação das frações F-UF (Rubio et al, 2003; 2004; Matiolo et al., 2004). A Tabela 24 e a Figura 4.25 mostram as recuperações metalúrgicas de Cu e Mo nos concentrados ao final da flotação, por faixa granulométrica nas frações F e UF (separadas em micropeneiras nas malhas de 40, 15 e 5 μm) para os estudos STD em comparação com o EXT-OD 90.

Tabela 24. Recuperações metalúrgicas de Cu e Mo nos concentrados ao final da flotação, por faixa granulométrica nas frações F e UF.

Faixa granulométrica, μm		Recuperação, %			
		STD		EXT-OD 90	
		Cu	Mo	Cu	Mo
Concentrado final	-5	67,7	71,2	81,3	81,6
	5	86,6	85,3	91,8	92,5
	15	95,0	92,4	98,0	94,5
	40	81,9	60,1	85,6	62,5

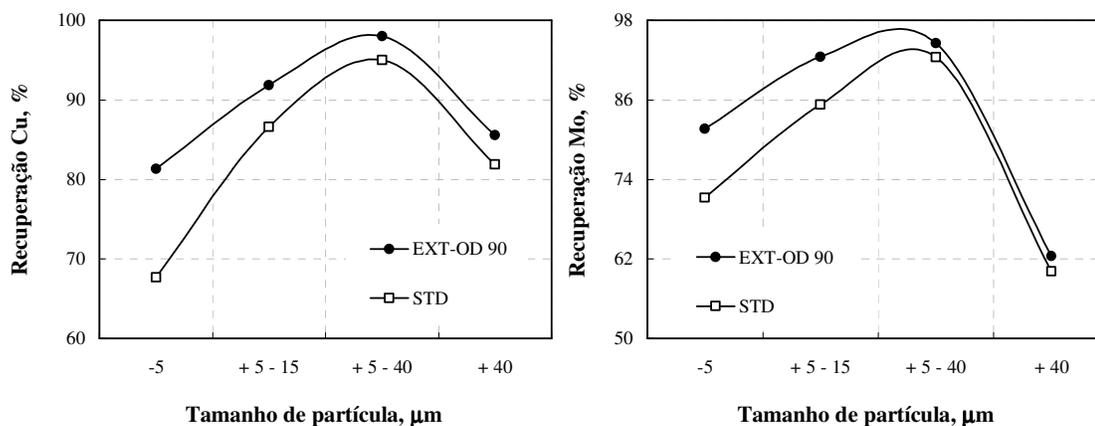


Figura 4.25. Recuperações metalúrgicas de Cu e Mo nos concentrados ao final da flotação, por faixa granulométrica nas frações F e UF (separadas em micropeneiras).

Os maiores ganhos em termos de recuperação foram observados na fração $< 5 \mu\text{m}$, onde a recuperação de Cu passou de 67% no STD para 81% e na fração entre 5-15 μm com recuperações metalúrgicas de Cu passando de 86% aproximadamente no STD para 91%. Nos estudos de flotação de sulfetos de molibdênio também foram observados incrementos na recuperação metalúrgica desse metal nas frações finas e ultrafinas. Na fração $< 5 \mu\text{m}$ a recuperação de Mo no STD foi de 71%, enquanto nos estudos EXT-OD 90 foi superior a 81%, na fração entre 5-15 μm os valores foram de 74 % para STD e 92% para flotação extensora.

Os resultados comprovam a eficiência da técnica de flotação extensora com adição de óleos emulsificados juntamente com coletores. Tanto o óleo Diesel quanto o querosene emulsificados mostraram ganhos de recuperação metalúrgica, real e cinética, sem perdas significativas na qualidade dos concentrados. Os resultados são interpretados pela interação das gotas de óleos com as partículas causando um aumento da hidrofobicidade das partículas portadoras de Cu e Mo, otimizando assim a adesão das partículas com as bolhas. O aumento da hidrofobicidade aumenta a interação das partículas em função da “adsorção” do coletor e o óleo “extensor” especialmente na etapa de adesão. Este tipo de interação óleo/partícula pode também restabelecer a hidrofobicidade superficial das partículas que sofrem oxidação parcial. São esses mecanismos que explicam também, o menor grau de arraste das partículas sulfetadas e a maior flotação real, via adesão as bolhas.

Outro importante fenômeno é a interação entre os grupos naftênicos do óleo diesel e os sítios hidrofóbicos dos sulfetos. Seitz e Kawatra (1986), citados por Bos e Quast (2000) sugerem que óleos apolares podem recobrir superfícies de sulfetos de baixa hidrofobicidade (ex. calcopirita) aumentando assim as forças de adesão entre as partículas e as bolhas de ar. A maior eficiência da adição do óleo é função do grau de emulsificação do óleo (geração de gotículas) e dispersão na polpa, a cinética de interação das partículas e as gotas de óleo e recobrimento das partículas pelo óleo.

Assim, a emulsificação em água de coletores insolúveis (óleo combustível, por exemplo) é muito importante dado ao fato de que a emulsificação e a estabilidade das gotas de óleo afetam consideravelmente os resultados de flotação. Aumentando a dispersão do óleo na água através da geração de gotículas de óleo, aumenta o número de colisões entre as partículas e as gotas, o que por sua vez, aumenta a recuperação (Sis e Chander, 2003). Rubio et al. (2003, 2004), Matiolo et al. (2004) avaliaram o efeito da adição de óleo diesel emulsificado na flotação finos e ultrafinos de sulfetos de cobre. Seitz e Kawatra (1986), citados por Bos e Quast (2000) sugerem que óleos apolares podem recobrir superfícies de sulfetos de baixa

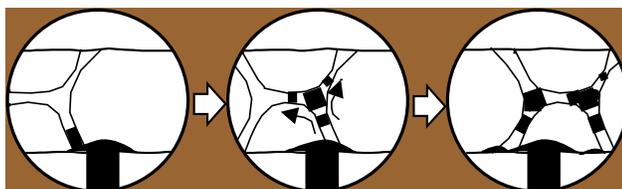
hidrofobicidade (ex. calcopirita) aumentando assim as forças de adesão entre as partículas e as bolhas de ar.

As maiores recuperações de Mo em relação ao Cu contido podem ser explicados pelo fato de que este mineral já possui certo grau de hidrofobicidade natural e flota muito bem com hidrocarbonetos como reagentes coletores (Smit e Bhasin, 1985; Hoover e Malhotra, 1976). Da mesma forma que a flotação de carvão, se tem constatado que os hidrocarbonetos lineares (saturados) de cadeia longa, não são os melhores coletores de Molibdenita. Isto, de acordo com vários autores, está associado a menor solubilidade e a maior viscosidade de hidrocarbonetos de cadeia longa. Como na prática industrial estes óleos ou petróleos nem sempre são adicionados na forma emulsificada, sua dispersão e diluição necessária para difundir-se na polpa e interagir com as partículas de Molibdenita é muito menor.

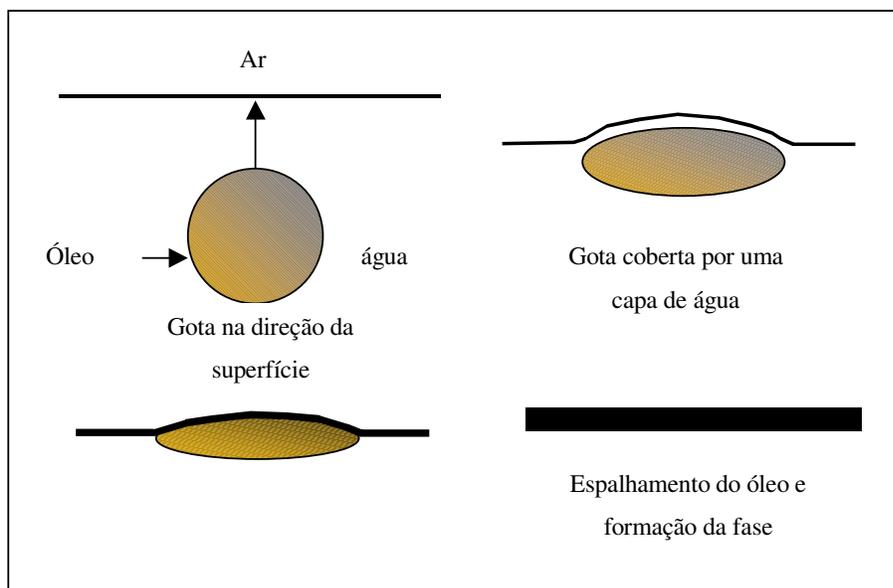
No caso da Molibdenita, por exemplo, se tem reportado que hidrocarbonetos comuns apresentam eficiências muito variadas (Smit e Bhasin, 1985) provavelmente devido às diferenças de viscosidade. Por outro lado, uma mistura de hidrocarbonetos com frações naftênicas de alto peso molecular e óleo combustível aumenta, significativamente, sua recuperação por flotação.

Um dos problemas derivados do uso de óleos na flotação é a diminuição da altura da camada de espuma e sua estrutura. A formação da camada de espuma em soluções aquosas de surfactantes pode ser reduzida pela presença de gotículas de óleo insolúveis em água, e também por partículas sólidas hidrofóbicas (com dimensões comparáveis as lamelas da espuma, entre 1-10 μm) e (mais efetivo) pela combinação do óleo e partículas em conjunto (Aveyard et al., 1993).

A Figura 4.26 mostra um desenho esquemático do efeito do óleo na estrutura da espuma. As gotas de óleo que chegam até a espuma penetram nas “lamelas” das bolhas e movimentando-se para os espaços vazios, causando ruptura do filme líquido e colapso da camada de espuma.



(a)



(b)

Figura 4.26. Efeito do óleo na estrutura da espuma. (a) penetração de gotas de óleo nas “lamelas” das bolhas na espuma; (b) Movimento da gota nos espaços vazios das lamelas e transferência à interface ar/água.

Finch e Dobby (1990) e Aveyard et al. (1993; 1994) explicam que partículas sólidas influenciam a estabilidade da espuma em função de seu tamanho e hidrofobicidade. Essas partículas, altamente hidrofóbicas e com um ângulo de contato superior a 90° , desestabilizam a espuma e as partículas hidrofílicas com ângulo de contato igual a 0° promovem a estabilidade da espuma. Este fato pode explicar a necessidade de adição de uma quantidade extra de espumante no caso de espumas formadas por sólidos altamente hidrofóbicos.

Este fenômeno explica a redução na eficiência de flotação nos ensaios EXT-OD 120 onde ocorre um excesso de óleo Diesel, as gotas livres que não interagiram com a superfície dos sulfetos metálicos são “flotadas” e levadas até a superfície provocando desestabilização da zona de espuma. Este problema se agrava nos ensaios EXT-ODn, na flotação com adição de óleo não emulsificado a dispersão e diluição necessária para o óleo difundir-se na polpa e interagir com as partículas minerais sulfetadas é muito menor.

A Figura 4.27 apresenta um desenho esquemático da situação de espuma para as diferentes situações analisadas. A altura da camada de espuma na flotação EXT-ODn foi cerca de 50 % inferior à observada nos estudos STD. Para os estudos EXT-OD 120 a altura da zona

de espuma foi levemente inferior ao ensaio STD, apresentando baixos problemas de fluidez e retardo do transbordo.

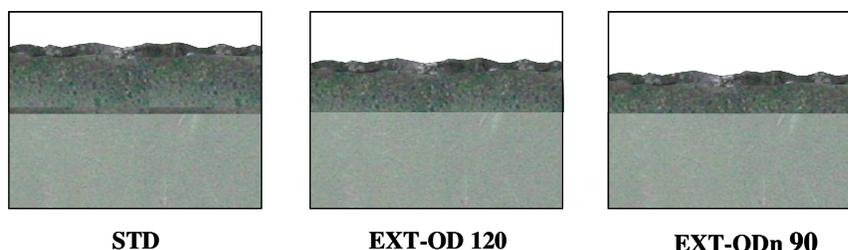


Figura 4.27. Desenho esquemático da zona de espuma para os estudos de flotação STD, EXT-OD 120 e EXT-ODn 90.

4.5. Considerações Finais

Estes estudos foram feitos dentro do “Proyecto Flotación de Finos y Ultrafinos” realizados em uma parceria LTM, CODELCO e IM2 (“Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia”) com o objetivo de aumentar a recuperação metalúrgica das plantas concentradoras da Divisão Codelco Norte / Mina Chuquicamata - Chile, mediante a redução das perdas de cobre e molibdênio nas frações F-UF. O projeto, utilizando várias técnicas de flotação não convencionais, previa as etapas de estudo em escala de laboratório, estudos piloto dos melhores resultados e posterior implementação em escala industrial.

Em função da qualidade dos dados obtidos, e devido a facilidade de implantação do sistema de geração de emulsões, o grupo LTM-CODELCO-IM2 optou por realizar as duas últimas etapas (piloto e industrial) em paralelo. Atualmente o projeto está na etapa de dimensionamento do sistema de geração de emulsões O/A que será testado em uma das linhas da usina de Chuquicamata (90.000 t.dia⁻¹). A etapa piloto, que terá seu início após a industrial, servirá para avaliar parâmetros como tipo(s), concentração e grau de emulsificação dos óleos, efeitos na camada de espuma, espessamento e filtragem.

Como a flotação primária da usina de Chuquicamata já possui adição de óleo Diesel (não emulsificado na concentração de 5 g.t⁻¹) junto aos demais reagentes, será necessário

apenas a implantação do sistema de emulsificação que é possível com modificações simples no circuito de adição dos reagentes. A Figura 4.28 apresenta um fluxograma simplificado para implantação da técnica de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado na etapa Rougher da usina de Chuquicamata-Chile e a Tabela 25 mostra os ganhos de recuperação de cobre esperados nas frações F-UF (considerando as quatro linhas de flotação existentes atualmente na usina de Chuquicamata). O Apêndice IV mostra, de maneira resumida, os materiais e custos gerais envolvidos.

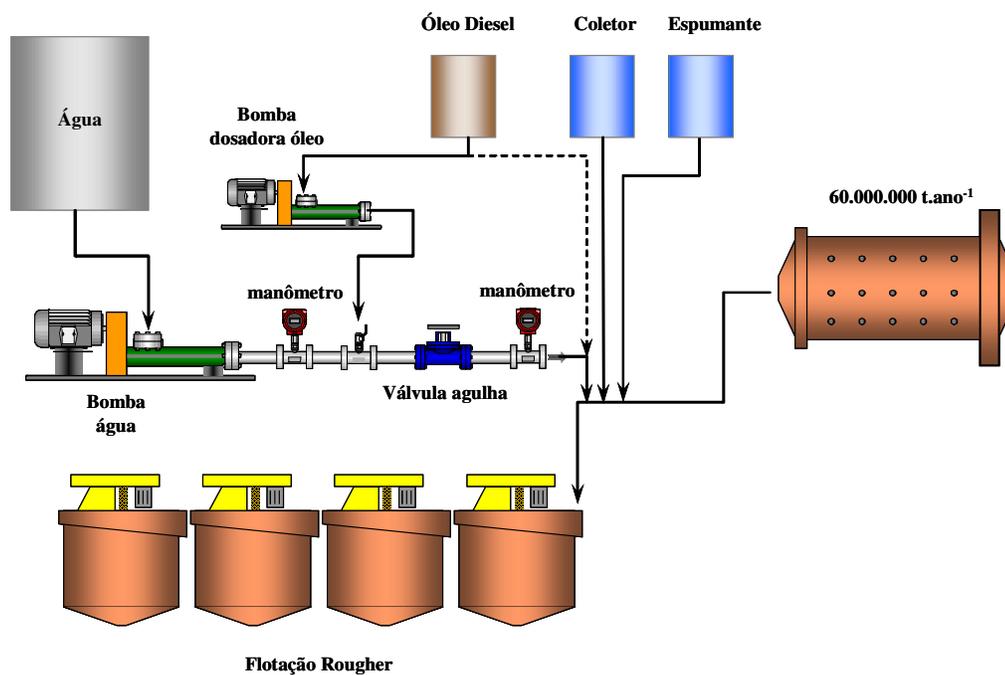


Figura 4.28. Fluxograma simplificado para implantação da técnica de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado na etapa Rougher da usina de Chuquicamata.

A Tabela 25 mostra os ganhos de recuperação de cobre esperados nas frações F-UF, utilizando a técnica de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado nas quatro linhas de flotação existentes na usina de Chuquicamata.

Tabela 25. Ganhos esperados de recuperação de cobre nas frações F-UF utilizando a técnica de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado na usina de Chuquicamata.

Tamanho de partícula, μm	Produção* t Cu.ano ⁻¹	Ganho com a recuperação extensora	
		%	t Cu.ano ⁻¹
+ 53	302.680	-	-
40	163.899	4	6.556
15	52.901	3	1.587
5	25.244	5	1.262
-5	22.274	13	2.896
Incremento de recuperação global		2,2%	12.301 t Cu.ano⁻¹

* Valores médios do período de janeiro a maio de 2001, fornecidos pela "Superintendência Metalúrgica de Chuquicamata".

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo é possível estabelecer as seguintes conclusões:

1. Os resultados dos estudos de flotação STD apresentam um baixo desvio padrão (<1%) em termos de recuperação metalúrgica e teores de Cu e Mo, validando assim a metodologia (sistemática experimental) empregada;
2. Os estudos mostram que a flotação de sulfetos de cobre e molibdênio com a adição de óleo Diesel ou querosene emulsificados juntamente com os coletores tradicionais, aumenta a recuperação metalúrgica de Cu e Mo, a constante cinética de flotação e a flotação real, diminui o grau de arraste hidrodinâmico, sem declínio significativo nos teores desses metais nos concentrados de flotação extensora. Esses últimos parâmetros permitem comprovar os mecanismos baseados na agregação das partículas de sulfetos;
3. Os melhores resultados cinéticos e metalúrgicos foram obtidos com adição de óleo Diesel emulsificado (OD) na concentração de $90 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ alcançando recuperações de Cu superior a 89 % (84,6 % no STD) e ganho de 4,6 % na recuperação real. Os sulfetos de molibdênio apresentaram comportamento semelhante com ganhos na recuperação metalúrgica próximos de 6 %;
4. Nos estudos com adição de querosene emulsificado os melhores resultados também foram obtidos com adição de $90 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$, porém com ganhos menores na recuperação metalúrgica de Cu de 86,2%. Os menores ganhos, em relação ao OD, podem ser explicados pela interação existente entre os grupos naftênicos do óleo Diesel e os sítios hidrofóbicos dos sulfetos;
5. As concentrações de óleo necessárias para o efeito de “flotação extensora” (espalhamento e agregação), com o minério de cobre e molibdênio de Chuquicamata-Chile, foram da ordem de 60 a $90 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ de mineral. Estas concentrações são bem maiores que as empregadas atualmente em algumas operações industriais (3-10 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$);

6. A flotação com adição de óleo Diesel não emulsificado apresentou zona de espuma mais espessa (densa e menor) em comparação com os estudos STD e EXT com o mesmo óleo emulsificado, principalmente no primeiro minuto, impedindo o início do transbordo do concentrado e diminuindo significativamente a cinética de flotação;

7. Em função da qualidade dos dados obtidos, conclui-se que a flotação extensora com adição de óleos emulsificados apresenta um grande potencial na recuperação de finos de minérios sulfetados de cobre e molibdênio. O baixo custo (relativo) do óleo Diesel (quando comparados, com os coletores tipo xantatos) e a simplicidade para instalação de um sistema de emulsificação aumentam o potencial para aplicação industrial desta técnica.

TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste estudo devem ser estendidos para a realização dos seguintes estudos futuros:

1. Avaliação do efeito da flotação extensora na recuperação de F e UF de minérios sulfetados de cobre e molibdênio com adição de óleos combustíveis e lubrificantes na forma de emulsão usados nos diversos equipamentos da usina de concentração em Chuquicamata;
2. Avaliação destas técnicas para outros sistemas minerais;
3. Estudos em escala piloto para validação dos resultados;
4. Aplicação da técnica em escala industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSON, A. W., **Physical Chemistry of Surfaces**. 3ª edição, Jhon Wiley & Sons, New York, 1976.
- ANDRADE, D. G., REZENDE, F. E. O., SILVA, P. A. M., Instalação da célula flash na Mineração Caraíba. In: **XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa** – Recife, Pernambuco, v. 1, pp. 259-265, 2002.
- AVEYARD, R., COOPER, P., FLETCHER, P. D. I., RUTHEFORD, C. Y., Foam breakdow by hydrophobic particles and nonpolar Oil. **Langmuir**, v. 9, pp 604-613, 1993.
- AVEYARD, R., BINKS, B. P., FLETCHER, P. D. I., PECK, T. G., RUTHEFORD, C. Y., Aspects of aqueous foam stability in the presence of hydrocarbon oils and solid particles. **Advances in Colloid and Interface Science**. v. 48, p 93, 1994.
- ANFRUNS, J. P., The flotation of small particles. Ph.D. Thesis, **Imperial College of Science and Technology**, London, 1976.
- BEEBY, J. P., NICOL, S. K., Concentration of oil-in-water emulsion using the air-sparged hydrocyclone. **Filtration & Separation**, pp 141-146, March/April 1993.
- BEHIE, L.A., VAN HAM, C.J.M., BERK, D., An experimental investigation into the induced air flotation of fine oil in water emulsions, presented at the 17th Canadian Symposium on Water Pollution Research, C.C.I.W., Burlington, Ontario, March 1982 and published in **Water Pollution Research in Canada**, v. 17, 1982.
- BOS, J. L. Y., QUAST, K. B., Effects of oils e Lubricants on the flotation of Copper Sulphide Minerals. **Minerals Engineering**, v. 13, p 1623, 2000.
- BULATOVIC, S. M., SALTER, R. S., High intensity conditioning: a new approach to improve flotation of mineral slimes. In: **Conference of Metallurgists**, Halifax, Canada, Proceedings, pp 182-197, 1989.
- BULATOVIC, S. M., High intensity conditioning at Minnova's Winston Lake Concentrator results in improved zinc concentrate grade and reduced reagent consumption. Technical notes, Lakefield Research Publications, Canada, v. 5, n. 1, February, 1993.
- COLLINS, D. N., READ, A. D., The treatment of slimes. **Mineral Science and Engineering**, Randburg - África do Sul, v. 3, pp 19-31, 1971.
- DMTRIEVA, G. M., SOLNYSHKIN, V. I., SHMIDT, O. V. The influence of certain nonpolar reagentes on the flotation of chalcopyrite, in **Flotation Agents and Effects**, ed. Solnyshkin, G. M., Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, pp. 25-32, 1970.
- DRZYMALA, J., MARKUZEWSKI, R., WHEELOCK, T. D., Influence of Air on Oil Agglomeration of Carbonaceous Solids in Aqueous Suspension, 1986.
- DUONG, C., CHOUNG, J., XU, Z. Y., SZYMANSKI, J., A novel process for recovering clean coal and water from coal tailings. **Minerals Engineering**, v. 13, n. 2, pp 173-181, 2000.

- EL-SHALL, H., ABDEL-KHALEK, N.A., SVORONOS, S., Collector-frother interaction in column flotation of Florida phosphate. **International Journal of Mineral Processing**, 20, pp 187-199, 2000.
- FINCH, J.A., DOBBY, G.S. Column flotation. Pergamon Press, 179p, 1990.
- FORDEDAL, H., NODLAND, E., SJÖBLUM, J., KVALHEIM, O. M., A multivariate analysis of w/o emulsions in high external electric fields as studied by means of dielectric time domain spectroscopy. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 173, n. 2, pp 396-405, 1995.
- FUERSTENAU, D. W., CHANDER, S., ABOUZEID, A. M., The recovery of fine particles by physical separation methods. In: Beneficiation of mineral fines: problems and research needs, Sterling Forest, New York, **Workshop Report**, Ann Arbor, AIME, pp 3-59, 1979.
- FUERSTENAU, D.W., LI, C., HANSON, J.S., Shear-flocculation and carrier flotation of fine hematite. **In Proceedings of Symposium on the Production and Processing of fine particles**. Ottawa, Canadá. Canadian Institute of Mining and Metallurgical, vol. 17, pp 32-335, 1988.
- FUERSTENAU, D. W., LI, C., HANSON, J. S., Enhancement of fine hematite flotation by shear flocculation and carrier flotation. **In Proceedings of XVII International Mineral Processing Congress**, Dresden, Alemanha, Vol. 2, pp 169-180, 1991.
- GORODETSKII, M. I., YASCHENCO, N. N., PLAKSA, N. Y., MEKLER, L. I. e GOL'MAN, A. M., Increase in flotation recovery of porphyry copper ores at the Balkhash concentrator. **Tenth International Mineral Processing Congress**, p. 689-705, 1973.
- GRATTONI, C., MOOSAI, R., DAWE, R. A., Photographic observations showing spreading and nonspreading of oil on gas bubbles of relevance to gas flotation for oily wastewater cleanup. **Colloids and Surfaces**, pp 151 – 155, 2003.
- GUERRA, E. A., Estudos de beneficiamento de ultrafinos de carvão de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado, 188p., Escola de Engenharia, **Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais da UFRGS**, Porto Alegre, 1985.
- HOOVER, R. M., MALHOTRA, D., Emulsion Flotation of Molybdenite. **Flotation A M. Gaudin Memorial Volume**, v. 1, pp 485-505, 1976.
- HOUSE, C. I., VEAL, C. J., Selective Recovery of Chalcopyrite by Spherical Agglomeration. **Minerals Engineering**, v. 12, n. 2, pp 171-184, 1989.
- KLASSEN, V. I., MOKROUSOV, V. A., **An introduction to the theory of flotation**, Butterworths, London, 1963.
- KUSAKA, E., ARIMOTO, Y., NAKAHIRO, Y., WAKAMATSU, T., Collectorless liquid-liquid extraction of fine mineral particles using various organic liquids as the oil phase, **Minerals Engineering**, v. 7, n. 1, pp 39-48, 1994.
- LASKOWSKI, J. S., Oil assisted fine particle processing. En: Fuerstenau D.W. (advisory editor). **Developments in Mineral Processing**, v. 12: Laskowski, J. S. e Ralston, J. (Eds.) **Colloid Chemistry in Mineral Processing**. Elsevier, pp 361-394, 1992.
- LASKOWSKI, J. S. e DAI, Q., Collector-extender flotation in the processing of coarse fractions of potash ores. **Proc. XVIII International Mineral Processing Congress**, p. 1045, 1993.

- LASKOWSKI, J. S., Aqueous composition useful in ore floatation containing aliphatic amine, extender oil, and emulsifier . Patente USA-5,507,394, Abril 16, 1996.
- LASKOWSKI, J. S. e WANG, Q., Amine containing oils as extenders in the flotation of sylvinitic ores. Proc. **XX International Mineral Processing Congress**. v. 3, p 605, 1997.
- LELINSKI, D., ASH flotation of dispersed oil droplets – A model system for betumem flotation from tar sand, M. Sc. Thesis, University of Utah, 125 p., 1993.
- LINS, F. A. F., ADAMIAN, R., Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais, **Série Tecnologia Mineral**, Rio de Janeiro, – CETEM/MCT, 29 p., 2000.
- LIU, J., MAK, T., ZHOU, Z., XU, Z., Fundamental study of reactive oily-bubble flotation. **Minerals Engineering**, v. 15, pp 667-676, 2002.
- MACKINNON, S., YAN, D., DUNNE, R., The interaction of flash flotation with closed circuit grinding. **Minerals Engineering**, 16, pp 1149-1160, 2003.
- MATHUR, S., SINGH, P., MOUDGIL, B. M., Advances in selective flocculation technology for solid-solid separations. **International Journal of Mineral Processing**, v.58, pp 201-222, 2000.
- MATIOLO, E., CAPPONI, F., RUBIO, J., Técnicas para recuperar minério de cobre. **Brasil Mineral**, No. 229, pp 144-150, 2004.
- MCCULLOCH, W.E., Flash flotation for improved gold recovery at Freeport, Indonesia. **Minerals & Metallurgical Processing**, v. 7, n. 3, pp 144-148, 1990.
- MOOSAI, R., DAWE, R. A., Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup. Separation and Purification Technology (article in press), 2003.
- NETTO, A. J. M., Manual de Hidráulica. Editora Edgard Blücher Ltda, **Universidade de São Paulo**, 4ª Edição, cap. 18, pp 331-400, 1966.
- PASCOE, R.D., DOHERTY, E., Shear flocculation and flotation of hematite using sodium oleate. **International Journal of Mineral Processing**. 51, pp 269-282, 1997.
- RODRIGUES, R.T. Tratamento de águas oleosas de plataformas marítimas por flotação por ar dissolvido, Dissertação de Mestrado, 100p., Escola de Engenharia, **Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS**, Porto Alegre, 1999.
- RODRIGUES, R. T., RUBIO, J., New basis for measuring bubble size distribution. **Minerals Engineering**. v. 16, pp 757-765, 2003.
- ROSA, J. J., O Condicionamento em alta intensidade e a recuperação de finos de minérios por flotação. Dissertação de Mestrado. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – UFRGS**, 78 p, 1997.
- ROSA, J. J., O Tratamento de efluentes oleosos por floculação pneumática em linha e separação por flotação - Processo FF. Tese de Doutorado. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – UFRGS**, 145 p, 2002.
- ROSA, J. J., RODRIGUES R. T., RUBIO, J., Condicionamento em alta intensidade para aumentar a recuperação de finos de minérios por flotação. **Anais XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa e I Seminário de Química de Colóides aplicada à Tecnologia Mineral**. Águas de São Pedro, SP-Brasil. v. 2, pp 521-542, 1998.

- ROSAS, J. E., POLING, G. W., Proc. **11° International Mineral Processing Congress**, Cagliari-Italia, pp 73-78, 1975.
- RUBIO, J., **Carvão mineral – Caracterização e Beneficiamento**. Porto Alegre, v. 1, 240 p, 1988.
- RUBIO, J., Unconventional flocculation and flotation techniques. In: Ralston, J., Miller, J and Rubio, J (Eds), **Flotation and flocculation: From Fundamentals to Applications, Proceedings from Strategic Conference and Workshop**, Hawaii, pp 17-32, 2002
- RUBIO, J., SOUZA, M. L., SMITH, R. W., Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Mineral Engineering**, v. 15, pp 139-155, 2002.
- RUBIO, J. CAPPONI, F., MATIOLO, E., NUNES, D. GUERRERO, C. P., BERKOWITZ, G., Advances in flotation of mineral fines. In: **Proceedings XXII International Mineral Processing Congress**, Cape-Town, África do Sul, pp 1014-1002, 2003.
- RUBIO, J., CAPPONI, F., MATIOLO, E., ROSA, J., Avanços na flotação de finos de minérios sulfetados de cobre e molibdênio. **Anais XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Florianópolis-SC, Brasil, v. 2, pp 69-77, 2004.
- SANTANDER, M., Separação de óleos emulsificados por flotação não convencional, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, **Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS**, Porto Alegre, 123 p., 1998.
- SEITZ, R. A. e KAWATRA. S. K., The role of nonpolar oils as flotation reagent. **Chemical Reagents in the Mineral Processing Industry**, ed. D Malhotra and. W. F. Riggs, SME/AIME, pp. 171-180, 1986.
- SEPULVEDA, J. E., GUTIERREZ, L., Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática. **Centro de Investigación Minera y Metalúrgica**, Santiago - Chile, 1986.
- SHAW, D. J. **Introduction to colloid and surface chemistry**, Butterworths, London, 1975.
- SIVAMOCHAN, R., CASES, J. M., Dependence of shear flocculation on surface coverage and zeta potential. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v. 28, pp 161-172, 1990.
- SIS, H., CHANDER, S., Reagent used in the flotation of phosphate ores: a critical review. **Minerals Engineering**, 16, pp 577-585, 2003.
- SMIT, F. J., BHASIN, A. K., Relationship of petroleum hydrocarbon characteristics and molybdenite flotation. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v. 15, p. 19-40, 1985.
- SONG, S., LU, S., Hydrophobic aggregation flotation of rutile particles. **Advances in Fine Particles Processing**, J. Hanna y Y.A. Attia (eds.), Elsevier, New York, p. 279-283, 1990.
- SONG, S., LU, S., Hydrophobic flocculation of fine hematite, siderite and rhodochrosite particles in aqueous solution. **Journal Colloid Interface Science**, 166, p. 35-42, 1994.
- SONG, S. Y LU, S., Theory and applications of hydrophobic flocculation technology, Proceedings of the **XXI International Mineral Processing Congress**. Rome, Italy, August, p. C5(31)-C5(38), 2000.

- SONG, S. LOPEZ-VALDIVIESO, A., Hydrophobic flocculation for beneficiating fine coal and mineral. **Separation Science and Technology**, 33, p. 1195-1212, 1998.
- SONG, S., VALDIVIESO, A. L., DING, Y., Effects of nonpolar oil on hydrophobic flocculation of hematite and rhodochrosite fines. **Powder Technology**, v. 101, pp 73-80, 1999.
- SONG, S., VALDIVIESO, A. L., BAHENA, J. L. R., PEREZ, H. I. B., TRASS, O., Hydrophobic Flocculation of Galena Fines in Aqueous Suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 227, pp 272-281, 2000.
- SPENCE, J.R., MASLIYAH, J.H., The effects of clay fines on oil in water dispersions. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 67, n. 6, dezembro 1989.
- SUBRAHMANYAN, T. V., FOSSBERG, E. F. S., Fine particle processing: Shear flocculation and carrier flotation - A review. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v. 30, pp 265-286, 1990.
- TRAHAR, W. J., A rational interpretation of role of particle size in flotation. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v.2, pp. 289-327, 1981.
- TRAHAR, W. J., WARREN, L. J., The flotability of very fine particles – A review. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v.3, pp 103-131, 1976.
- VALDERRAMA, L., PAVEZ, O., PEREZ, C., RUBIO, J., High intensity conditioning to improve flotation of gold fine particles. **Proceedings International Mineral Processing Congress**, San Francisco-EUA. Vol. 4, pp 27-30, 1995.
- VALDERRAMA, L. C., Estudos de flotação não convencional para o tratamento de rejeitos de ouro. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, **Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS**, 124 p, 1997.
- VALDERRAMA, L., RUBIO J., High intensity conditioning and the carrier flotation of gold fine particles. **International Journal of Mineral Processing**. v. 52, pp 273 – 285, 1998.
- WARREN, L. J., Determination of the contributions of true flotation and entrainment in batch flotation tests. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v. 14, pp 33-44, 1985.
- WEISSENBORN, P. K., WARREN, L. J., DUNN, J. G., Optimisation of selective flocculation of ultrafine iron ore. **International Journal of Mineral Processing**, v.42, pp 191-213, 1994.

APÊNDICES

Apêndice I. Procedimento dos ensaios STD para os estudos de flotação com minério de Chuquicamata-Chile.

Materiais:

1. Balança Sartorius QS64B;
2. Balança analítica Marte;
3. Estufa;
4. Filtro à vácuo Denver;
5. Máquina de flotação Darma;
6. pHmetro calibrado;
7. 1 cronômetro;
8. 3 pipetas de 5ml;
9. 5 bandejas limpas e secas;
10. 3 pissetas;
11. 1 célula de 2,7L com raspador;
12. 5L de água com pH ajustado em 10,5;
13. 1350g de minério de cobre;
14. 2 Provetas de 100ml;
15. Papel filtro;

Reagentes:

1. SF-113 25 g/t
2. SF-506 8g/t
3. Espumante 20 g/t
4. Cal (pH 10,5)

Procedimento:

1. Pesar 5 bandejas limpas e secas, identificar C₁, C₂, C₃, C₄ e C₅, anotar os valores na folha de trabalho e colocá-las em ordem e de acesso fácil com C₁ já na posição;
2. Encher 2 pissetas com água e 1 com água a pH 10,5;
3. Pesar as pissetas e anotar os valores na folha de trabalho;
4. Tarar o peso da célula vazia, anotar na folha de trabalho e deixar o peso registrado na balança grande;
5. Ajustar a célula à máquina de flotação e encaixar a correia do raspador;
6. Pesar 2.2L de água com pH 10 ajustado com cal;
7. Despejar 1000mL da água com pH ajustado (do item 6);
8. Adicionar 1350g de minério e ligar a máquina de por flotação por 10 segundos;
9. Despejar 1200mL de água com pH ajustado (o restante da água pesada no item 6);

10. Ligar a máquina de flotação por 10seg e ajustar o pH da polpa em 10,5 com cal;
11. Ligar a máquina de flotação com rotação ajustada em 1000RPM (34,4Hz);
12. Adicionar os reagentes de flotação com as pipetas na seguinte sequência: 5mL de SF113, 5mL de SF506 e 5mL de Espumante e em seguida disparar o cronômetro;
13. Deixar a polpa condicionando por 1min;
14. Ao final do condicionamento dá-se o início da flotação com a abertura da válvula do ar com o rotâmetro 2.5L/min, ligar o raspador e seguir a seguinte sequência:

Sequência de trabalho da flotação Standard

Tempo (use Cronômetro), min	SEQUÊNCIA DE TRABALHO – FLOTAÇÃO STANDART LTM-CHUQUICAMATA
0	Início do condicionamento;
1	Início da flotação: ar=2.5 L/min;
2	Ar=3.5 L/min;
3	Limpar a calha de escoamento com água e trocar a badeja C ₁ por C ₂ , pesar a pisseta de limpeza e anotar o valor na folha trabalho; Ar=4.5 L/min;
4	Limpar a calha de escoamento com água e trocar a badeja C ₂ por C ₃ , pesar a pisseta de limpeza e anotar o valor na folha de trabalho; Ar=6 L/min;
5	Ar=7 L/min;
6	Limpar a calha de escoamento com água e trocar a badeja C ₃ por C ₄ , pesar a pisseta de limpeza e anotar o valor na folha de trabalho; Adicionar 100mL de água com o pH10,5; Ar=4.5 L/min;
7	Ar=6 L/min;
8	Ar=7 L/min;
8'30"	Limpar a calha de escoamento com água e trocar a badeja C ₄ por C ₅ e, ao final, deve-se adicionar 100mL de água com o pH ajustado em 10,5, pesar a pisseta de limpeza; Ar=6 L/min;
9	Ar=7 L/min;
10	Encerrar a flotação fechando a válvula do ar, desligando a máquina e o raspador.

- ❖ Observação: Manter as paredes da célula limpas utilizando a pisseta com água a pH 10.5. Utilizar somente poucos ml.

15. Erguer o estator e limpá-lo bem com a segunda pisseta de água previamente pesada;
16. Pesar a célula na balança grande com seu peso tarado;

17. Pesar as bandejas dos concentrados e as pissetas usadas;
18. Filtrar os concentrados e o rejeito que permaneceu na célula identificando o filtro com o número do ensaio e do concentrado ou rejeito;
19. Secar as amostras em estufa a 100°C por 24h;
20. Pesar as amostras secas;
21. Desagregar e homogeneizar as amostras armazenando-as em local adequado e devidamente identificado.

Apêndice II. Técnica utilizada na digestão das amostras utilizadas nos estudos de flotação

Preparo da amostra:

- Seque as amostras na estufa, a 50°C durante, no mínimo 2h.
- Pese em um bécker, em balança analítica, com precisão, 0,1g de amostra, se for concentrado, e 1g sendo rejeito.
- Adicione, com auxílio de frasco lavador, um pouco de água.
- Acrescente 20mL de mistura ácida e aqueça a 180°C até redução parcial do volume e deixe esfriar.
- Adicione 10mL de ácido nítrico a 50% e 10mL de água deionizada e aqueça novamente, reduzindo o volume até que fique uma pasta no fundo do becker e deixe esfriar.
- Filtre com auxílio de funil, e papel de filtro, e frasco lavador, sempre lavando muito bem, a fim de retirar toda a amostra contida no becker.
- Adicione 1mL de sulfato de sódio a 10%.
- Complete o volume, em balão de 250mL, com água deionizada.
- Armazene em frascos limpos de 250mL.

Preparo das soluções:

HNO₃ 50%: dilua 50mL de HNO₃ concentrado com 50mL de água deionizada.

Na₂SO₄ 10%: pese 10g de Na₂SO₄ em Becker e dissolva com água deionizada, diluindo em balão de 100mL, completando até a marca.

Mistura ácida: na proporção de 2:1:1 misture, respectivamente: ácido nítrico; ácido perclórico e ácido sulfúrico. Exemplo: 10ml, 5 e 5mL de cada respectivo ácido.

Apêndice III: Procedimentos analíticos para avaliação metalúrgica

Preparação das amostras de concentrados e rejeitos dos estudos de flotação para digestão ácida. Os concentrados e rejeitos dos estudos de flotação foram secos em estufa a uma temperatura máxima de 100 °C (12 h para os concentrados e 24 h para os rejeitos). Depois de secos e novamente pesados os concentrados foram novamente homogeneizados em um cadinho com auxílio de um bastão de porcelana e os rejeitos foram cominuídos em moinho de bolas com corpos moedores de cerâmica por uma hora. Toda a massa dos concentrados foi enviada ao laboratório para digestão ácida e para os rejeitos uma massa de 30g, que foi retirada diretamente do moinho.

No laboratório de digestão, as amostras foram homogeneizadas novamente em moinho de porcelana e secas a 60 °C por uma hora em cápsulas de alumínio antes da pesagem. Para os concentrados a massa utilizada foi de 0,1 g do material e para os rejeitos 1 g. Todas as digestões foram realizadas em duplicata.

Determinação da concentração de íons Cu e Mo nas amostras por absorção atômica:

- Tempo de leitura = 15 s (integração do sinal de três medições em 15 segundos). O sistema detecta sinais a cada 5 segundos e ao final fornece a concentração média de três leituras;

- Intervalo de medição para Cu = 0-10 mg·L⁻¹;

- Concentração das soluções padrão para calibração para Cu = 0; 2,5; 5; 7,5 e 10 mg·L⁻¹;

- Intervalo de medição para Mo = 0-50 mg·L⁻¹;

- A diluição das amostras quando necessário e feita automaticamente pelo equipamento.

A confiabilidade dos resultados está apoiada nos valores de desvio padrão calculados nos estudos de flotação. Abaixo são demonstrados os valores (teores de Cu e Mo) obtidos nos estudos de flotação Standard (4 ensaios e duas vias de análise) para o teor de Cu e Mo na alimentação (calculada); teores nos concentrados e nos rejeitos e a recuperação metalúrgica acumulada até o minuto 9 de flotação.

Apêndice IV. Materiais e custos gerais envolvidos para teste industrial de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado na usina de Chuquicamata

A potência requerida para o motor de uma bomba é dado pela seguinte equação (Neto, 1966)

$$P = \frac{Q \times \rho \times H}{C1 \times \varepsilon}$$

onde:

P = Potência do motor da bomba (HP),

Q = Fluxo do fluido a ser bombeado (L.min⁻¹),

ρ = Densidade do fluido (kg.L⁻¹),

H = Altura manométrica (m),

C1 = Constante de ajuste de unidades (4560 kg/min.HP),

ε = Eficiência global do sistema de bombeio (0,7).

Dados gerais do projeto de implantação da flotação extensora na usina de Chuquicamata-Chile

Dados do Projeto	
Alimentação de minério, t.dia ⁻¹	90.000
Concentração de óleo Diesel, g.t ⁻¹	60-90
Concentração da emulsão, g.t ⁻¹	25.000
Consumo de Diesel, m ³ .dia ⁻¹	6,7 a 10
Vazão da bomba de água, m ³ .h ⁻¹	9 a 13,5
Potência da bomba de água, kW	7,4
Vazão da bomba dosadora para injeção de óleo, L.h ⁻¹	250 -380
Potência da bomba dosadora para injeção de óleo, kW	0,74
Densidade do fluido t.m ⁻³	1
Pressão de geração das emulsões, kgf.cm ⁻²	12
Altura manométrica total, kgf.cm ⁻²	15

Custos envolvidos no projeto de implantação da flotação extensora na usina de Chuquicamata-Chile.

Custos Gerais	
Custo do Diesel* (90 g.t ⁻¹), US\$.m ⁻³	169,00
Custo de Energia*, US\$.KWh ⁻¹	0,056
Custo do Diesel, US\$.dia ⁻¹	1690,00
Custo de Energia, US\$.KW.dia ⁻¹	10,94

*Valores de 2003 fornecidos pela Codelco-IM2 (Superintendencia Metalúrgica de Chuquicamata)

Os custos de implantação ainda estão em fase de cálculo, mas estima-se valores inferiores a US\$ 300.000,00.

Ganhos de recuperação de cobre esperados utilizando a técnica de flotação extensora com adição de óleo Diesel emulsificado na usina de Chuquicamata.

Tamanho de partícula, µm	Produção* t Cu.ano ⁻¹	Ganho com a recuperação extensora	
		%	t Cu.ano ⁻¹
+ 53	302.680	-	-
40	163.899	4	6.556
15	52.901	3	1.587
5	25.244	5	1.262
-5	22.274	13	2.896
Incremento de recuperação global		2,2%	12.301 t Cu.ano⁻¹