

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

Dissertação de Mestrado

Estudo do estado de dispersão das partículas
em polpa de minério sulfetado de chumbo-zinco

Autor: Marcelo Oliveira Silvestre

Orientador: Professor Antônio Eduardo Clark Peres

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Junho/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Marcelo Oliveira Silvestre

ESTUDO DO ESTADO DE DISPERSÃO DAS PARTÍCULAS EM POLPA DE MINÉRIO
SULFETADO DE CHUMBO-ZINCO

Dissertação de Mestrado

apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Professor Antônio Eduardo Clark Peres

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

À Lidiane, meu amor;
Aos meus filhos Vitor Hugo e Larissa, minha vida.

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Antônio Eduardo Clark Peres pela orientação objetiva e precisa, essencial para o direcionamento e desenvolvimento da dissertação;
- Ao Engenheiro Carlos Magno de Lima Leonel, por sua obstinação na disseminação do conhecimento, ao qual o autor deve a sedimentação do embasamento técnico e profissional;
- Aos Professores Carlos Alberto Pereira, Roberto Galéry e ao Engenheiro Carlos Magno de Lima Leonel, pelas sugestões que vieram engrandecer esta dissertação;
- Ao Professor Carlos Alberto Pereira, pelo empréstimo de equipamento para realização da parte experimental;
- Ao Técnico Francisco Aparecido Pereira e a Uênio Fernandes Chaves pelo apoio na realização dos testes experimentais;
- Ao Técnico Francisco Aparecido Pereira e ao Engenheiro Thiago Vitali Pignaton pelo apoio na discussão dos resultados dos testes experimentais;
- Ao Geólogo Eldrick Lemos Esper pelo apoio nas amostras de minerais.
- À Votorantim Metais Zinco unidades de Vazante e Morro Agudo, pelo suporte financeiro, disponibilização de tempo e ao apoio irrestrito na realização deste trabalho de dissertação;
- A todos que colaboraram para que esta dissertação fosse realizada, que porventura tenha me esquecido de citar.

RESUMO

A Votorantim Metais Zinco, empresa de capital nacional integrante do Grupo Votorantim, é a única produtora de zinco e chumbo do País. Suas unidades industriais estão localizadas no Estado de Minas Gerais sendo dois empreendimentos mineiros, em Vazante e Paracatu, e duas usinas metalúrgicas, em Três Marias e Juiz de Fora.

No depósito de zinco e chumbo de Paracatu o minério é sulfetado, sendo a esfalerita e a galena os minerais-minério principais. O minério é retirado da mina subterrânea e enviado ao concentrador onde é submetido às etapas de britagem, moagem, flotação de chumbo, flotação de zinco e filtragem.

O trabalho foi realizado com amostras provenientes do depósito sulfetado de Paracatu visando verificar a influência da dispersão na flotação de chumbo e de zinco. Os testes foram realizados com o minério e com os minerais esfalerita, galena, pirita e dolomita. Foram utilizados nos testes 9 tipos de dispersantes e 6 misturas entre eles.

Foram escolhidos três reagentes dispersantes para realizar os testes de flotação de chumbo e três para flotação de zinco. Os critérios utilizados para a escolha dos reagentes foram alto índice de dispersão para a galena e baixo para os demais, alto índice de dispersão para a esfalerita e baixo para os demais, baixo índice de dispersão para a pirita e alto para os demais e alto índice de dispersão para todos.

Os testes de flotação de chumbo foram realizados em três condições para verificar a influência do dispersante, do pH e do carbonato de sódio. O teste de flotação de zinco foi realizado na condição de pH = 10,5 modulado com o reagente cal.

A utilização de reagentes dispersantes na flotação de chumbo não contribuiu para melhoria de eficiência total do circuito pois, apesar de melhorar a recuperação metalúrgica de chumbo, intensifica significativamente as perdas de zinco no concentrado de chumbo.

O reagente carbonato de sódio apresentou um baixo índice de dispersão e não modificou os resultados na flotação de chumbo quando comparados com os resultados da flotação em pH natural e pH = 9,8 modificado somente com cal.

De todos os reagentes dispersantes testados na flotação de zinco dois apresentaram resultados satisfatórios, o dispersante 3223 com substância ativa poliacrilato de sódio e o dispersante hexametáfosfato de sódio. Esses reagentes contribuíram para o aumento significativo de recuperação de zinco sem prejudicar a qualidade do concentrado.

ABSTRACT

Votorantim Metais Zinco, a fully Brazilian company, belonging to the Votorantim group, is the only producer of zinc and lead in the country. The industrial operations are located in the state of Minas Gerais, divided in two mining enterprises, in Vazante and Paracatu, and two metallurgical plants, in Três Marias and Juiz de Fora.

The ore from the Paracatu deposit contains lead and zinc sulphides, galena and sphalerite, respectively. The ore is extracted from an underground mine and sent to the concentrator to be processed in a sequence that involves crushing, grinding, lead flotation, zinc flotation and filtration.

This investigation was performed with samples from the Paracatu deposit aiming at studying the influence of the dispersion of the particles in the pulp on lead and zinc flotation. Samples of ore and also of the minerals sphalerite, galena, pyrite, and dolomite were selected for the experiments. Nine types of dispersing agents and six combinations among them were employed.

A set of three dispersing agents was selected for the flotation of lead and another set of three was chosen for zinc flotation. The criteria for the selection of reagents were: high dispersion degree for galena and low for the other species, high dispersion degree for sphalerite and low for the other species, low dispersion degree for pyrite and high for the other species and high dispersion degree for all species.

Lead flotation experiments were performed under three conditions aiming at verifying the influence of the dispersing agent, of the pH, and of sodium carbonate. The zinc flotation test was carried out at pH = 10.5 modulated with lime.

The use of dispersing agents in lead flotation did not improve the overall efficiency of the circuit for, despite improving the lead metallurgical recovery, they increase significantly the zinc losses in the lead concentrate.

Sodium carbonate presented a low dispersion degree and did not affect the lead flotation results when compared with those achieved at natural pH and at pH = 9.8 modulated with lime.

Two dispersing agents were particularly effective in zinc flotation: dispersant 3223 sodium polyacrylate and sodium hexametaphosphate. Both reagents significantly enhanced zinc recovery without impairing the quality of the concentrate.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
SUMÁRIO.....	vii
LISTA DE FIGURA.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS.....	18
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 Considerações gerais sobre dispersão.....	19
3.2 Teoria DLVO	19
3.3 Agentes dispersantes/depressores.....	23
3.4 Dispersão em polpas de não-sulfetos.....	26
3.5 Dispersão em polpas de sulfetos.....	34
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA.....	39
4.1 – Aparelhagem.....	39
4.1.1 - Teste de dispersão.....	39
4.1.2 - Testes de flotação.....	40
4.2 - Reagentes.....	41
4.2.1 - Reagentes comerciais.....	41
4.2.2 - Reagentes de pureza analítica.....	42
4.3 – Teste de dispersão.....	43
4.4 – Testes de flotação.....	47
4.5 – Amostras.....	51
4.5.1 - Mineral Esfalerita.....	51
4.5.2 - Mineral Galena.....	51
4.5.3 - Mineral Pirita.....	52

4.5.4 - Mineral Dolomita.....	53
4.5.5 - Minério utilizado nos testes de dispersão.....	53
4.6 - Fluxograma de desenvolvimento da parte experimental.....	54
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 - Testes de dispersão.....	55
5.1.1 - Erros nos testes de dispersão em duplicata.....	55
5.1.2 - Resultado dos testes de dispersão no minério.....	56
5.1.3 - Resultado dos testes de dispersão no mineral esfalerita.....	58
5.1.4 - Resultado dos testes de dispersão no mineral galena.....	60
5.1.5 - Resultado dos testes de dispersão no mineral pirita.....	61
5.1.6 - Resultado dos testes de dispersão no mineral dolomita.....	63
5.1.7 - Reagentes dispersantes para a realização dos testes de flotação de chumbo e zinco.....	65
5.1.8 - Planejamento dos testes de flotação de chumbo.....	69
5.1.9 - Planejamento dos testes de flotação de zinco.....	71
5.2 - Resultado dos testes de flotação.....	72
5.2.1 - Testes de flotação de chumbo.....	72
5.2.1.1 - Flotação de chumbo com dispersante hexametáfosfato de sódio.....	72
5.2.1.2 - Flotação de chumbo com dispersante silicato de sódio.....	74
5.2.1.3 - Flotação de chumbo com dispersante 3223.....	76
5.2.2 - Testes de flotação de zinco.....	78
5.2.2.1 - Flotação de zinco com a mistura de reagentes dispersantes silicato de sódio + meta silicato de sódio.....	78
5.2.2.2 - Flotação de zinco com o reagente dispersante hexametáfosfato de sódio.....	80
5.2.2.3 - Flotação de zinco com o reagente dispersante 3223.....	82
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	84
CAPÍTULO 7 - SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	86
CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxograma do processo de concentração de chumbo e zinco da Votorantim Metais Zinco - unidade de Morro Agudo.....	17
Figura 3.1 - Teoria DLVO clássica: curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas. (MP = mínimo primário, BE = barreira de energia, MS = mínimo secundário) (LINS e ADAMIAN, 2000).....	21
Figura 3.2 - Curvas de energia de interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita: teoria DLVO e teoria X-DLVO (LINS e ADAMIAN, 2000).....	23
Figura 3.3 – Tubo de dispersão (GALÉRY, 1995).....	28
Figura 4.1 - Influência do pH no grau de dispersão.....	45
Figura 4.2- Fluxograma de realização dos testes experimentais e análise de resultados.....	54
Figura 5.1 - Histograma de frequência dos erros dos testes de dispersão em duplicata.....	56
Figura 5.2 - Gráfico dos dispersantes que provocam altos índices de dispersão no minério.....	57
Figura 5.3 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixos índices de dispersão no minério.....	58
Figura 5.4 - Gráfico dos dispersantes que provocam alto índice de dispersão no mineral esfalerita.....	59
Figura 5.5 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral esfalerita.....	59
Figura 5.6 - Gráfico dos dispersantes que provocam alto índice de dispersão no mineral galena.....	60
Figura 5.7 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral galena.....	61
Figura 5.8 - Gráfico dos dispersantes que provocam maior índice de dispersão no mineral Pirita.....	62
Figura 5.9 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral pirita.....	63

Figura 5.10 - Gráfico dos dispersantes que provocam alto índice de dispersão no mineral dolomita.....	64
Figura 5.11 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral dolomita.....	64
Figura 5.12 - Gráfico da recuperação de chumbo em função da dosagem de HMF Sódio...72	
Figura 5.13 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante hexametáfosfato de sódio.....	73
Figura 5.14 - Gráfico da perda de zinco no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante hexametáfosfato de sódio.	73
Figura 5.15 - Gráfico da recuperação de chumbo em função da dosagem de silicato de sódio.....	74
Figura 5.16 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante silicato de sódio.....	75
Figura 5.17 - Gráfico da perda de zinco no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante silicato de sódio.....	75
Figura 5.18 - Gráfico da recuperação de chumbo em função da dosagem de dispersante 3223.....	76
Figura 5.19 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante 3223.....	77
Figura 5.20 - Gráfico da perda de zinco no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante 3223.....	77
Figura 5.21 - Gráfico da recuperação de zinco em função da dosagem da mistura de dispersantes (g/t).....	78
Figura 5.22 - Gráfico do teor de zinco no concentrado em função da dosagem da mistura de dispersantes (g/t).....	79
Figura 5.23 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado de zinco em função da dosagem da mistura de dispersantes.....	79
Figura 5.24 - Gráfico do teor de ferro no concentrado de zinco em função da dosagem da mistura de reagentes dispersantes.....	80
Figura 5.25 - Gráfico da recuperação de zinco em função da dosagem de hexametáfosfato de sódio (g/t).....	80

Figura 5.26 - Gráfico de teor de zinco no concentrado em função da dosagem de hexametáfosfato de sódio (g/t).....	81
Figura 5.27 - Gráfico do teor de ferro no concentrado de zinco em função da dosagem de hexametáfosfato de sódio.....	81
Figura 5.28 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado de zinco em função da dosagem de hexametáfosfato de sódio.....	81
Figura 5.29 - Gráfico recuperação de zinco em função dosagem dispersante 3223 (g/t).....	82
Figura 5.30 - Gráfico do teor de zinco no concentrado em função da dosagem do dispersante 3223.....	82
Figura 5.31 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado em função da dosagem do dispersante 3223.....	83
Figura 5.32 - Gráfico do teor de ferro no concentrado em função da dosagem do dispersante 3223.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Agentes dispersantes empregados em tratamento minérios (RABELO, 1994).....	25
Tabela III. 2 – Evolução do nível de contaminantes no concentrado de cobre da Caraíba (PEREIRA, 1985).....	35
Tabela IV.1 - Simbologia utilizada no cálculo das recuperações de massa e metalúrgica.....	49
Tabela IV.2 - Análise química por faixas granulométricas da amostra do mineral esfalerita.	51
Tabela IV.3 - Análise química por faixas granulométricas da amostra do mineral galena.....	52
Tabela IV.4 - Análise química por faixas granulométricas da amostra do mineral pirita.....	52
Tabela IV.5 - Análise química por faixas granulométricas da amostra do mineral dolomita.....	53
Tabela IV.6 - Análise química por faixas granulométricas do minério sulfetado de Pb e Zn.....	53
Tabela V.1 - Resultado dos testes de dispersão com o dispersante Silicato de Sódio.....	66
Tabela V.2 - Resultado dos testes de dispersão com a mistura Silicato + Sódio Meta.....	67
Tabela V.3 - Resultado dos testes de dispersão com o reagente dispersante 3223.....	68
Tabela V.4 - Resultado dos testes de dispersão com o reagente dispersante HMF de sódio.....	69
Tabela V.5 - Planejamento dos testes de flotação de chumbo.....	70
Tabela V.6 - Planejamento dos testes de flotação de zinco.....	71

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A principal aplicação do zinco - cerca de 50% do consumo mundial - é na galvanização do aço ou ferro para protegê-los da corrosão. O zinco é usado como anodo de sacrifício. O zinco também é utilizado na forma de óxido nas indústrias alimentícia, farmacêutica e de pneus.

Peças de latão, ligas metálicas de zinco, datadas de 1.000-1.400 a.C. foram encontradas na Palestina. Outros objetos com até 87% de zinco foram achados na antiga região da Transilvânia (MONTANER e SIMÓN,1898).

As reservas de minérios de zinco estão distribuídas por cerca de quarenta países e são da ordem de 460 milhões de toneladas. Apenas Austrália, China, Estados Unidos, Cazaquistão e Canadá detêm mais de 70% das reservas mundiais. No Brasil, as principais ocorrências de zinco estão localizadas nos Estados da Bahia, Minas Gerais, Mato Grosso, Pará e Rio Grande do Sul, segundo NEVES (2006).

A produção mundial de concentrado de zinco, em termos de metal contido, atingiu 10,1 milhões de toneladas em 2005. Os maiores produtores mundiais são: China (22,8%), Austrália (13,9%), Peru (12,9%), Canadá (7,7%) e Estados Unidos (7,5%). Esses cinco países respondem por 64,8% da produção mundial. A produção brasileira de concentrado de zinco, em termos de metal contido, distribuída pela fração silicatada (78,3%) e sulfetada (21,7%), atingiu 171 mil toneladas em 2005, representando 1,7% da produção mundial segundo NEVES (2006).

O chumbo está sendo usado pelos humanos por, pelo menos, 7.000 anos, porque era (e continua sendo) muito difundido na natureza e de fácil extração. Também é fácil de ser trabalhado por ser altamente maleável, dúctil e de baixo ponto de fusão. A peça mais antiga de chumbo descoberta pelos arqueólogos data de 3.800 a.C. e está guardada no Museu Britânico. Há evidências de que os Chineses já produziam esse metal por volta de 3.000 a.C., segundo KEISCH (1968).

A mais ampla utilização do chumbo é na fabricação de acumuladores (baterias). Outras aplicações importantes são na fabricação de forros para cabos, elementos de construção civil, pigmentos, soldas suaves e munições, segundo KEISCH (1968).

As reservas mundiais (medidas e indicadas) atingiram 140 milhões de toneladas, em 2004. Ao serem confrontadas com as brasileiras, que somam 300 mil de toneladas, tendo no Brasil 0,2% das reservas mundiais. A produção mundial de minério de chumbo primário (*mine production*), em 2004, alcançou 3,31 milhões de toneladas do metal contido, segundo SILVA (2006).

Os principais produtores mundiais de chumbo primário são os países detentores das maiores reservas do mundo. São eles, em ordem decrescente das reservas básicas: China 36 milhões de toneladas, Austrália 28 milhões de toneladas, Estados Unidos da América 20 milhões de toneladas e Canadá 9 milhões de toneladas, representando 66% do total mundial, segundo SILVA (2006).

A participação brasileira na produção de concentrado de chumbo foi de 24 mil toneladas e de metal contido 16 mil toneladas. Quando comparada com a produção mundial, representa 0,5%. A produção global do chumbo metálico, em 2005, somou 7,6 milhões de toneladas, segundo SILVA (2006).

A Votorantim Metais Zinco S.A., empresa de capital nacional integrante do Grupo Votorantim, é a única produtora de zinco e chumbo do País. Foi fundada em 1956 e iniciou a produção em 1969. Suas unidades industriais estão localizadas no Estado de Minas Gerais sendo dois empreendimentos mineiros, em Vazante e Paracatu, e duas usinas metalúrgicas, em Três Maria e Juiz de Fora. Possui também uma usina metalúrgica na cidade de Lima no Peru.

Em Vazante (MG) encontra-se a mais importante jazida de zinco do Brasil. O minério é da forma silicatada e os minerais que participam preponderantemente da mineralização são a willemita e a calamina. O minério calamínico é retirado da mina a céu aberto e o willemítico da mina subterrânea. No concentrador são submetidos às etapas de britagem, moagem, deslamagem (no caso da calamina), flotação, espessamento e filtração.

No depósito de zinco e chumbo de Paracatu (MG) o minério é sulfetado, sendo a esfalerita e a galena os minerais principais. O minério é retirado da mina subterrânea e enviado ao concentrador onde é submetido às etapas de britagem, moagem, flotação de chumbo, flotação de zinco e filtração. Na unidade de Morro Agudo em 2006 a mina subterrânea produziu 990.000 t de ROM com teor de zinco de 4,30% e teor de chumbo de 2,03%.

O processo de britagem reduz a granulometria do minério de 500 mm para 8 mm, sendo o mesmo realizado em três britadores sendo um de mandíbulas e dois cônicos e uma etapa de peneiramento. O *undersize* do peneiramento é enviado para uma pilha de homogeneização. A britagem tem capacidade de produção de 160 t/h.

A pilha de homogeneização alimenta o circuito de moagem. O processo de moagem é realizado em dois moinhos paralelos sendo que o moinho 1 responde por 70% da massa de alimentação e o moinho 2 por 30%. Ambos funcionam com corpos moedores tipo bolas forjadas e em circuito fechado com ciclones. O circuito da moagem 1 tem bateria de 12 ciclones de 10" e o circuito da moagem 2 possui 8 ciclones de 10".

O circuito de moagem tem capacidade de alimentação de 125 t/h. O *overflow* do processo de moagem, com 30% de sólidos, apresenta 77% passante em 44 µm ou 325 mesh Tyler. No *overflow* da moagem, a análise granulométrica é realizada *on line* através de um medidor de partículas.

O processo de flotação é realizado separando dois metais em série, sendo o primeiro estágio a flotação de chumbo e o segundo estágio a flotação de zinco. A flotação de chumbo é realizada em circuito onde se utilizam colunas para a flotação *rougher* e *cleaner* e células convencionais para a flotação *scavenger*. No processo de flotação de chumbo utilizam-se dois tipos de modificadores de pH, um espumante e um coletor de chumbo. A flotação de chumbo é realizada em pH 9,8. O rejeito das células *scavenger* de chumbo alimenta o circuito de zinco.

A flotação de zinco é realizada em circuito onde utilizam-se colunas para a flotação *rougher* e *cleaner* e células convencionais para a flotação *scavenger* e *re-cleaner*. Para os mistos da flotação que são o rejeito *cleaner* e o concentrado *scavenger* é realizada uma remoagem em dois moinhos em série que utiliza bolas fundidas de 15 mm melhorando o grau de liberação do mineral esfalerita. No processo de flotação de zinco utilizam-se um modificador de pH, um espumante, um ativador de zinco e um coletor de zinco. A flotação de zinco é realizada em pH 10,5.

No ano de 2006 o teor do concentrado de chumbo foi de 62% com uma recuperação de 82,5%, com uma produção de 26.000 t de concentrado. O teor do concentrado de zinco foi de 45,5% com uma recuperação de 89%, com uma produção de 83.000 t. O fluxograma do processo de concentração da unidade de Morro Agudo encontra-se na figura 1.1.

A etapa de flotação é uma das técnicas convencionais de concentração que se baseia na diferença de propriedades de superfície entre as várias espécies presentes no minério, sendo realizada em meio aquoso (polpas). Nessa etapa o principal indicador de eficiência é a recuperação metalúrgica, por estar diretamente ligada à quantidade de produto metálico por unidade de produto metálico alimentado, com impacto direto na lucratividade da empresa.

A maximização da recuperação metalúrgica é o desafio constante dos profissionais dedicados ao tratamento de minérios, apesar das características dos minérios estarem mais desfavoráveis em função da liberação mais fina, dos menores teores de minerais úteis no ROM (*Run of Mine*) e das rígidas especificações dos produtos por parte dos clientes. Uma das características básicas do processo de flotação para uma concentração seletiva e eficiente é a dispersão dos minerais presentes na polpa. Portanto, entender o comportamento do estado de dispersão na flotação de chumbo e zinco do minério de Paracatu (MG) é condição para o aumento de recuperação nos circuitos de flotação.

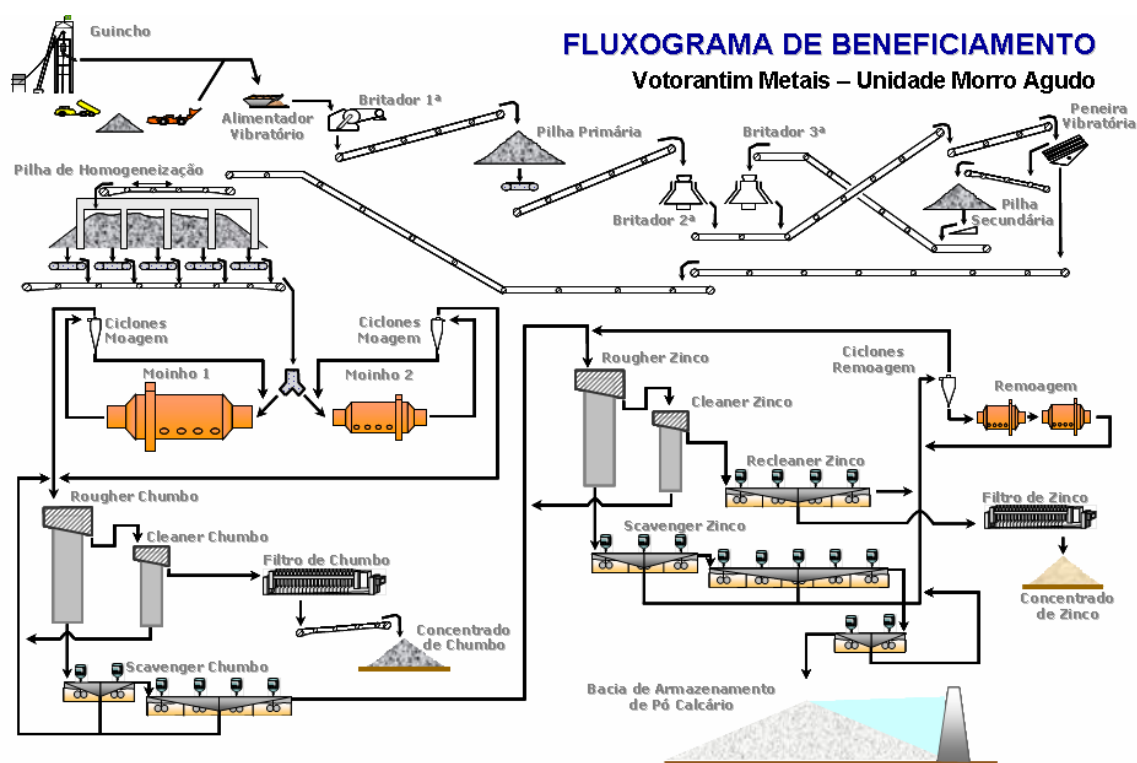


Figura 1.1 - Fluxograma do processo de concentração de chumbo e zinco da Votorantim Metais Zinco - unidade de Morro Agudo.

CAPITULO 2 – OBJETIVOS

Determinar o índice de dispersão das partículas na polpa do minério sulfetado de galena e esfalerita de Morro Agudo, realizando ensaios com diferentes tipos de reagentes dispersantes.

Verificar a influência do índice de dispersão das partículas na polpa do minério sulfetado de galena e esfalerita de Morro Agudo na flotação, realizando ensaios de flotação com as melhores condições obtidas nos ensaios de dispersão e comparando com o teste padrão sem dispersante.

CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações gerais sobre dispersão

A deslamagem antecedendo a flotação é prática industrial estabelecida há mais de 50 anos, introduzida na flotação catiônica reversa de minérios de ferro com o processo USBM (CLEMMER, 1947). Um elevado grau de dispersão das partículas na polpa é essencial para uma deslamagem eficiente, que, por sua vez, é requisito para seletividade na flotação em sistemas envolvendo não-sulfetos.

A prática industrial de flotação de sulfetos, por outro lado, não incorpora deslamagens. Investigações sobre o efeito do estado de dispersão das partículas em polpas desses sistemas são mais raras, divulgadas, na maioria dos casos, em publicações recentes.

Neste capítulo serão discutidos a teoria DLVO, os agentes dispersantes, a dispersão em sistemas de flotação de não-sulfetos que, por estar melhor consolidada, servirá de base para a abordagem do tema essencial à investigação, a dispersão em polpas de sulfetos.

3.2 Teoria DLVO

Os fundamentos teóricos da agregação e dispersão de partículas ultrafinas ($< 10 \mu\text{m}$) em polpas minerais são descritos na teoria DLVO, desenvolvida independentemente pelas duplas de cientistas Derjaguin-Landau (russos) e Verwey-Overbeek (holandeses) na década de 1940. Após 50 anos de existência, a teoria DLVO “clássica” foi revista com a incorporação de forças estruturais, sugeridas anteriormente por um de seus precursores (CHURAEV e DERJAGUIN, 1985), resultando na teoria DLVO estendida (*extended DLVO theory* ou X-DLVO).

As teorias DLVO “clássica” e X-DLVO foram revistas por LINS e ADAMIAN (2000).

A teoria DLVO “clássica” considera que as energias de interação que influenciam na agregação e dispersão têm origem nas forças de van der Waals e nas forças entre as duplas camadas elétricas das partículas. As forças de van der Waals para duas partículas de mesma natureza, em meio aquoso, são sempre atrativas. A interação entre as duplas camadas elétricas de partículas com cargas superficiais idênticas é repulsiva, com intensidade dependente da distância entre as partículas e da magnitude da carga ou potencial de superfície. A figura 3.1 ilustra a energia de interação quando duas partículas se aproximam, segundo a teoria DLVO. A expressão analítica é:

$$V_T = V_W + V_E$$

V_T é a energia total de interação, V_W a energia devida às forças de van der Waals e V_E a energia devida às forças elétricas repulsivas. V_W depende da constante de Hamaker, parâmetro característico do material e da geometria do sistema. Quanto maior seu valor, maior será a atração entre dois corpos de mesma natureza por forças de London-van der Waals. O termo V_E depende do potencial zeta (ψ_ξ) e da espessura da parte difusa da dupla camada elétrica (κ^{-1}) das partículas. O mínimo apresentado pela curva V_T da figura 3.1, a uma distância muito pequena entre as partículas, é denominado mínimo primário. Nessa condição o sistema é dito instável, assim que as partículas se aproximam suficientemente elas se agregam. A profundidade do mínimo primário é determinada pela condição em que as nuvens eletrônicas das partículas virtualmente se tocam. Pode ocorrer também um mínimo secundário caracterizando agregação (atração) mais fraca, facilmente desfeita por agitação moderada, com redispersão do sistema. O mínimo secundário ocorre geralmente em soluções eletrolíticas concentradas e/ou com partículas mais grossas.

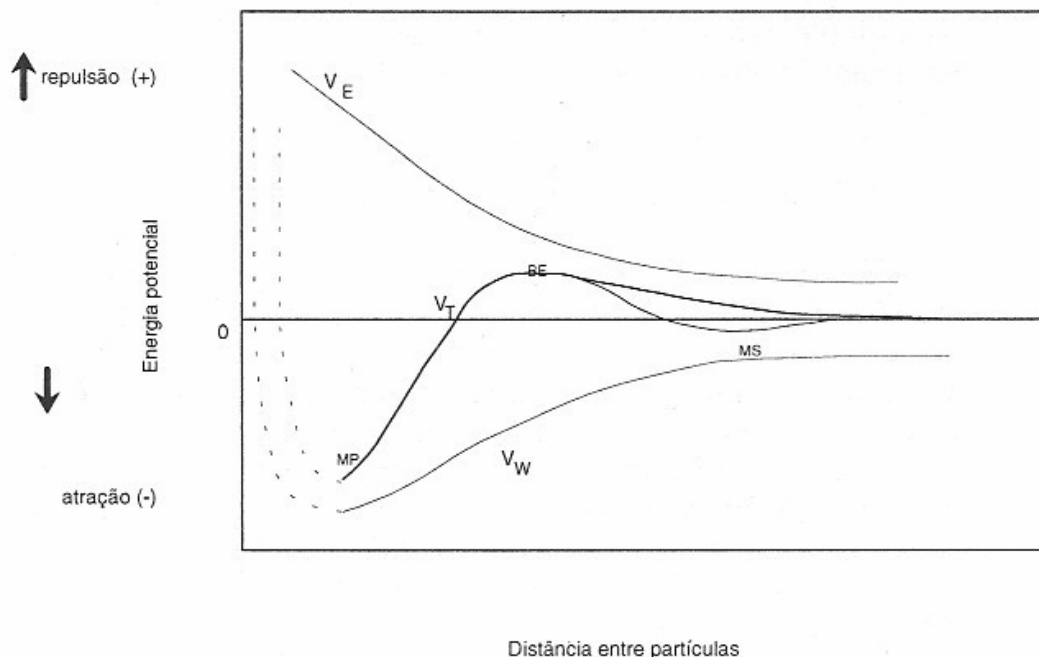


Figura 3.1 - Teoria DLVO clássica: curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas. (MP = mínimo primário, BE = barreira de energia, MS = mínimo secundário) (LINS e ADAMIAN, 2000).

Estudos experimentais sugeriram a possibilidade de existência de forças adicionais às da teoria DLVO “clássica”, a saber: hidratação (repulsiva) e hidrofóbica (atrativa). Essas forças passaram a ser designadas forças estruturais, em alusão à estrutura, ordenamento das moléculas de água na interface sólido-líquido, resultando na teoria X-DLVO.

Os conceitos da teoria X-DLVO se aplicam ao processo de flotação (YOON, 1991). A flotação pode ser vista como a interação entre duas “partículas”: mineral e bolha (LASKOWSKI, 1992). A expressão da energia total de interação ganha outro termos:

$$V_T = [V_W + V_E] = V_S + A_{Ass} + V_M + V_{Est} + \dots$$

V_S é o componente estrutural e pode ser devido a forças repulsivas de hidratação (V_{S+} , positiva) ou forças atrativas hidrofóbicas (V_{S-} , negativa). V_{S+} resulta de mudanças na

estrutura da água, induzidas por superfícies hidrofílicas hidratadas ou por íons hidratados na vizinhança da superfície das partículas e V_S . decorre da aquo-repelência, que induz partículas hidrofóbicas a se agregarem, devido à estruturação diferenciada da água na vizinhança das partículas (ISRAELACHVILI, 1991). V_{Ass} se refere à associação hidrofóbica das cadeias hidrocarbônicas dos coletores adsorvidos nas partículas. V_M expressa a interação originada de forças magnéticas entre as partículas. V_{Est} resulta do efeito estérico de repulsão, decorrente da interação entre as partes externas dos polímeros adsorvidos. Outros efeitos que poderiam ser considerados são a ligação de polímeros às partículas por mecanismo de ponte e o efeito da ação de forças capilares.

Um exemplo do efeito da interação hidrofóbica total é apresentado na Figura 3.2, para a interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita, hidrofobizadas com oleato de sódio. Os resultados foram assim explicados: se V_S – e V_{Ass} não forem considerados nos cálculos, a interação resultante de V_W e V_E (= V_{DLVO}) levaria a uma repulsão das partículas. Se aqueles componentes forem levados em conta, a interação total começa a decrescer a uma distância de separação de 8 nm, onde há uma barreira de energia. Com energia cinética suficiente para sobreporem à barreira, as partículas se aproximam mutuamente e os agregados hidrofóbicos são formados, em concordância com os resultados experimentais.

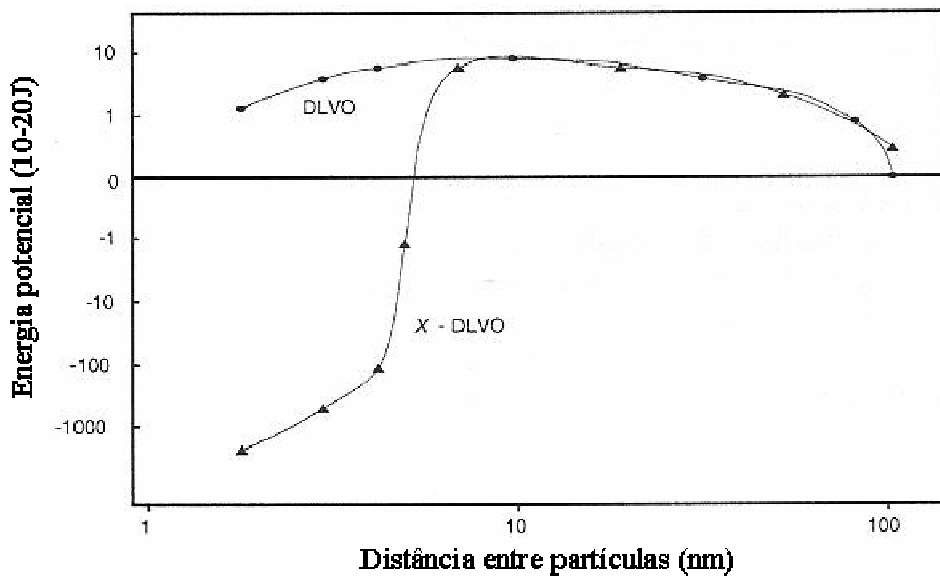


Figura 3.2 - Curvas de energia de interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita: teoria DLVO e teoria X-DLVO (LINS e ADAMIAN, 2000).

PAZHIANUR e YOON (2003) desenvolveram modelo sugerindo que a força hidrofóbica é devida à interação entre dipolos de grande magnitude criados por surfatantes adsorvidos em áreas localizadas (domínios) das superfícies minerais.

3.3 Agentes dispersantes/depressores

Existe uma nítida interdependência entre as ações de dispersão e depressão em sistemas envolvendo polpas minerais, fato que será salientado em diversos pontos desta revisão.

RABELO (1994) apresentou interessante quadro ilustrando as diferentes classes de agentes dispersantes empregados em tratamento de minérios (tabela III.1).

Entre os agentes dispersantes/depressores inorgânicos merecem destaque especial os polifosfatos e entre os orgânicos os polímeros acrilato de baixo peso molecular (esta classe será discutida ao longo da revisão).

RASHCHI e FINCH (2000) publicaram extensa revisão sobre a química e aplicações de polifosfatos, salientando que a formação de complexos íon metálico – polifosfato pode controlar a interferência de íons no processo de flotação, evitando possíveis efeitos de ativação ou depressão inadvertida. Esta ação foi corroborada por CHANGGEN e YONGXIN (1983) que, investigando a flotação de calcita com oleato de sódio, sugerem que ciclohexafosfato $(\text{NaPO}_3)_6$ e difosfato $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ não se adsorvem sobre calcita, sendo sua ação depressora devida à complexação de íons cálcio em solução, causando mais dissolução e reduzindo o número de “sítios” cálcio na superfície mineral.

PARSONAGE et al. (1984) mostraram que o trifosfato de sódio $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ deprime a flotação de calcita, apatita e dolomita com oleato de sódio. A ação foi atribuída à adsorção em “sítios” catiônicos, aumentando o valor negativo do potencial zeta do mineral. Observou-se ainda que dosagens elevadas de trifosfato ativam a flotação de calcita e dolomita, efeito que os autores não conseguiram explicar.

Tabela III.1 – Agentes dispersantes empregados em tratamento minérios (RABELO, 1994)

Classes	Principais Tipos	Exemplos (observações)
inorgânicos	fosfatos de sódio	hexametáfosfato
		tripolifosfato
		pirofosfato
		ortofosfato
	silicatos de sódio	relação SiO ₂ /Na ₂ O variando de 1,5 a 3,5
	outros sais sódicos (alcalinos)	bórax (Na ₂ B ₄ O ₇)
		aluminato (NaAlO ₂)
		carbonato (Na ₂ CO ₃)
		fluoreto (NaF)
		hidróxido* (NaOH)
	diaminas	H ₂ N-(CN ₂) _n -NH ₂ (n=3 a 6)
	amino-alcoóis	CH ₃ CH-NH ₂ -OH
	fenóis múltiplos	catecol
		pirogalol
	ácidos policarboxílicos	ácido oxálico
		ácido hemimelítico
ácido piromelítico		
ácidos aminocarboxílicos	EDTA	
ácidos hidroxicarboxílicos	ácido cítrico	
	ácido tartárico	
	ácido gálico	
orgânicos poliméricos	poliacrilatos de sódio	(CH ₂ =CH-COOH)Na (1.000 a 10.000 dalton)
	lignossulfonatos	derivados do álcool coniferílico
	polissacarídeos	dextrina
		carboximetilcelulose
	surfatantes etoxilados e propoxilados	(OC ₂ H ₄) _n
		(OC ₃ H ₆) _n
	outros polímeros	gelatina
		caseína
goma arábica		
taninos		

3.4 Dispersão em polpas de não-sulfetos

A geração de finos, e conseqüentemente o estado de dispersão desses finos nas polpas de sistemas minerais, é fortemente afetada pela ação de intemperismo, que depende da localização geográfica do depósito. A grande maioria dos depósitos minerais brasileiros localiza-se entre o Equador e o Trópico de Capricórnio, diferenciando-os em relação à maior parte das principais províncias minerais do resto do mundo. Pelo exposto, esta revisão será centrada em estudos de dispersão de polpas de minérios brasileiros.

Desde 1981 dissertações defendidas no CPGEM têm focalizado o tema dispersão. VIANA (1981) estudou a flotabilidade da dolomita com amina primária de 10 a 12 átomos de carbono na cadeia. Depressão praticamente total da dolomita foi alcançada com adição de polímero acrilato de baixo peso molecular (CATAFLOT-P40, produto da Pierrefitte-Auby, França). A flotabilidade da dolomita não foi afetada pela presença de sulfeto de sódio, bem como dos produtos de dissolução do CO₂. No trabalho ficou nítida a interdependência das ações de dispersão e depressão. Essa investigação, voltada para esclarecer aspectos da flotação de minérios oxidados de zinco, foi motivada pelo estudo de van Lierde (1967), discutido a seguir.

A ação de polímeros acrilato na flotação de minérios oxidados de cobre, chumbo e zinco com ganga calcária ou dolomítica foi extensivamente investigada por van Lierde (1967). O grau de polimerização é variável de fundamental importância, bem como a dosagem de polímero e a seqüência de adição de reagentes na polpa. Polímeros de baixo peso molecular (<10.000 dalton), portanto de menor viscosidade, apresentam acentuada ação depressora em relação aos minerais de ganga, relacionada à sua ação dispersante. O mecanismo de adsorção do polímero mostra forte interação química com formação de carboxilatos de cálcio e/ou magnésio. Em sistemas com sulfetização o polímero deve ser adicionado após o sulfetizante. O pH do sistema controla a configuração espacial do polímero: valores mais baixos de pH fazem com que o polímero se enrole, valores maiores o distendem, devido à repulsão entre grupos COO⁻. A dispersão da dolomita deve ser investigada criteriosamente,

pois as partículas podem passar de condição dispersa para floculada em estreita faixa de pH.

SALUM (1983) estudou a flotação de minerais silicatados de zinco com amina em sistema sulfetizados. A investigação não abordou explicitamente a dispersão como fator influente na flotabilidade, mas demonstrou que o sulfeto de sódio é mais efetivo quando adicionado na pré-sulfetização que como modulador do pH de flotação. Como o reagente introduz cargas negativas na interface sólido-líquido, é plausível que um de seus efeitos seja aumentar o grau de dispersão das partículas na polpa.

GALÉRY (1985) investigou a influência do estado de dispersão na flotabilidade do sistema willemita/dolomita. Esse trabalho representa um marco no tratamento de minérios no Brasil pela introdução do procedimento experimental conhecido como teste de dispersão. A aparelhagem original proposta, ilustrada na figura 3.3, consiste em um tubo de sedimentação de acrílico, apoiado em agitador magnético, com capacidade de polpa de 200 ml. O tubo é provido de orifício para descarga da fase dispersa. O controle de pH é feito acoplado-se o eletrodo na parte superior do tubo, permitindo leituras e modulação de pH imediatas. O procedimento adotado era condicionamento na presença de reagentes durante 5 min, seguido de sedimentação da polpa durante outros 5 min e coleta do material em suspensão. A percentagem de material disperso, D, é calculada pela expressão:

$$\%D = (M_{st=5'}) / (M_{st=0'}) \times 100$$

sendo $M_{st=5'}$ material em dispersão após 5 min de sedimentação e $M_{st=0'}$ material em dispersão no tempo zero.

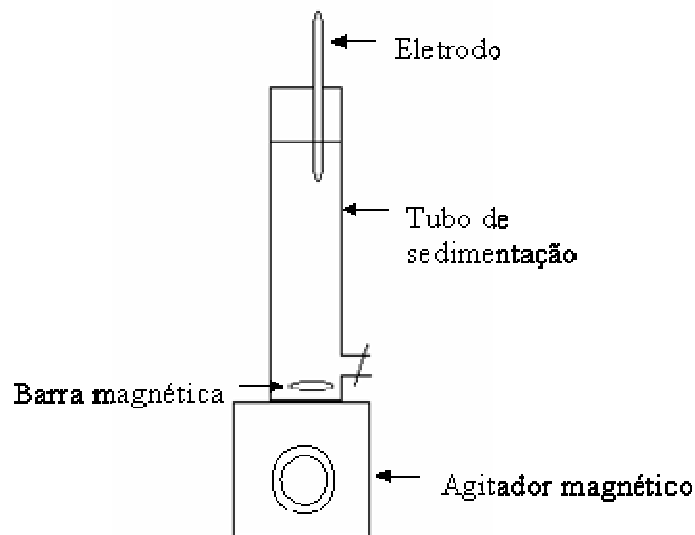


Figura 3.3 – Tubo de dispersão (GALÉRY, 1985).

Os reagentes empregados na investigação foram sulfeto, hidróxido, silicato e hexametáfosfato todos de cátion sódio e polímero acrilato de baixo peso molecular (CATAFLOT-P40). Dispersão aceitável foi obtida através de uma combinação de sulfeto de sódio tanto com hexametáfosfato de sódio quanto com o polímero acrilato. Para a willemita observou-se uma correlação entre máximos de dispersão e de flotabilidade. Observou-se também que as máximas depressão e dispersão da dolomita se verificam nas mesmas condições, favorecendo a seletividade do processo.

FURTADO (1985) desenvolveu processo, na época inovador, para recuperação de finos do minério fósforo-uranífero de Itataia. O procedimento padrão da Usina Piloto de Beneficiamento Físico do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da Nuclebrás (hoje da Comissão Nacional de Energia Nuclear) descartava como lamas a fração abaixo de $10\ \mu\text{m}$, acarretando elevadas perdas do mineral-minério nessa etapa. O *underflow* da ciclonagem alimentava um circuito de flotação de máquinas mecânicas. A introdução de uma segunda deslamagem, tratando a fração $< 10\ \mu\text{m}$ em ciclone de 20 mm (d_{50} em torno

de 2,0 μm), propiciou o tratamento do *underflow* da segunda deslamagem em coluna de flotação, com ganhos de recuperação de P_2O_5 e U_3O_8 de 4,5%. Além do benefício advindo do emprego de uma técnica de flotação inovadora (primeira utilização da flotação em coluna em escala piloto no Brasil), criterioso estudo das condições de dispersão das partículas na polpa contribuiu significativamente para o sucesso do estudo. Foram realizados ensaios de dispersão com minerais puros e com o minério (empregando-se o tubo de sedimentação descrito por GALÉRY, 1985). Nos ensaios com minerais puros foram empregados os dispersantes silicato de sódio, hexametáfosfato de sódio e polímero acrilato de baixo peso molecular. A partir dos resultados desses ensaios foi descartado o uso de hexa metáfosfato de sódio que, nos ensaios com minério, foi substituído por mistura 1:1 hexametáfosfato de sódio e pirofosfato de sódio (similar ao produto de marca comercial Calgon). Um silicato de sódio com relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,0$ foi também incluído entre os dispersantes sob investigação, levando a elevados graus de dispersão, comparáveis aos obtidos com a mistura hexametáfosfato e pirofosfato de sódio.

Investigações versando sobre o efeito do estado de dispersão das partículas na polpa na flotação de minérios fosfáticos foram desenvolvidos por LUZ (1988) e MARCIANO NETO (1989).

A investigação de LUZ (1988) abrangeu a utilização dos minerais puros calcita, dolomita e apatita e de misturas binárias calcita/dolomita e dolomita/apatita. O grau de agregação dos minerais em polpa foi determinado pelos métodos de pipeta de Andreasen e tubo de sedimentação. As curvas de microflotação em tubo de Hallimond modificado e de agregação mostraram correlação direta entre flotação e agregação no caso dos minerais isolados, na ausência de modificadores que não moduladores de pH. O cenário se alterou nos ensaios com misturas binárias, situação em que não se observou correlação entre os dois parâmetros. O estudo deixou clara a relevância de se focar a análise da dispersão em minérios e não em minerais puros.

A investigação de MARCIANO NETO (1989) envolveu a microflotação de apatitas de Monteiro, PB, e obtida do minério sedimentar de Patos de Minas. Silicatos de sódio e de

potássio mostraram-se efetivos na depressão de apatitas e quartzo ativado por cátions cálcio, não se mostrando capazes de atuar seletivamente no sistema. Um aspecto importante ressaltado nesse trabalho é a diferente capacidade depressora, em relação à fase fosfática de Patos de Minas, de silicatos de sódio com diferentes módulos. Considerando a composição química de um silicato de sódio expressa por $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$, o módulo m é definido como o número de moléculas de sílica por molécula de Na_2O . Não existe concordância na literatura em relação à faixa de variação do módulo de silicatos de sódio usados em flotação, mas com segurança pode-se dizer que m varia entre 2,0 e 3,5. Quanto maior o módulo, mais intensa é a ação depressora sobre quartzo e silicatos. Outro fator relevante é a polimerização dos silicatos de sódio, mais intensa na faixa de pH de 8 a 10, acentuando a ação dispersante/depressora do reagente nessa região.

O tubo de sedimentação foi também a base experimental da investigação efetuada por BORGES (1993) sobre a influência do estado de dispersão na flotabilidade de minério oxidado de zinco, utilizando-se amostras de minério calamínico da MASA, respectivamente, coletada na barragem de rejeitos (12 a 13% Zn) e representativa de minério de baixo teor (7 a 8% Zn). O objetivo do trabalho foi estabelecer correlações entre estado de dispersão das partículas na polpa, deslamagem e flotação. Dispersão adequada da polpa não foi suficiente para um bom desempenho da flotação, sendo necessária à combinação de deslamagem e dispersão. A percentagem de sólidos na polpa afetou significativamente a dispersão.

O primeiro estudo sistemático sobre estado de agregação de suspensões de minério de ferro desenvolvido no Brasil foi de autoria de SILVA (1994) e representou importante marco no cenário da flotação de minério de ferro. A partir daí todas as empresas atuantes em flotação de minérios de ferro passaram a dar atenção especial a seus circuitos de deslamagem e buscaram conhecer melhor a condição de dispersão das partículas em suas polpas. Muitos circuitos de deslamagem foram totalmente reformulados. Mais uma vez foi utilizado como ferramenta experimental o tubo de sedimentação desenvolvido por GALÉRY (1985). Amostra proveniente da Samarco Mineração SA foi submetida a ensaios de sedimentação sob diferentes condições de pH e concentrações de reagentes na polpa. Foram utilizados

modificadores de pH, eletrólitos inorgânicos, polímeros e misturas de eletrólitos inorgânicos com polímeros, em diferentes concentrações, visando identificar condições propícias para dispersão ou agregação das partículas nas suspensões. Foram utilizados silicatos de sódio (módulos 1,00; 2,15; 3,25), hexametáfosfato de sódio, bórax, cloreto férrico, sulfato de alumínio, ácido cítrico, ácido policarboxílico aniônico, CATAFLOT P-40, floculantes aniônicos fabricados por Nalco, Basf, Cyanamid (hoje CYTEC) e amido de milho de alto grau de pureza. Os reagentes mostram-se mais efetivos na faixa alcalina de pH, destacando-se o hexametáfosfato de sódio como dispersante e o amido de milho como floculante.

LIMA (2001) selecionou amostras representativas de nove tipologias de minérios de ferro dos complexos de Alegria e Fábrica Nova (CVRD Alegria) para avaliação de desempenho frente aos processos de deslamagem e flotação. A primeira etapa do procedimento experimental foi a execução de ensaios de dispersão com as lamas de cada uma das amostras. A fração abaixo de 150 µm foi diluída a 20% de sólidos em peso em uma proveta de vidro de 2 L de volume, que foi agitada manualmente e deixada em repouso por 2 min. Após esse tempo de sedimentação o *overflow* era coletado até a interface, repetindo-se essa operação mais duas vezes, sendo o sobrenadante, lama, utilizado nos ensaios de dispersão, no tubo de sedimentação semelhante ao descrito anteriormente. Essa lama era adicionada no tubo contendo 2,5% de sólidos em peso, seguindo-se adição do agente dispersante, soda cáustica, até atingir-se o nível de pH desejado. A polpa era então agitada com auxílio de bastão magnético durante 5 min, a agitação era retirada e a sedimentação ocorria por 1 min. O sobrenadante era coletado de orifício situado a 1/5 da base do tubo. *Underflow* e *overflow* eram secados e pesados, visando a determinação do grau de dispersão.

A avaliação da influência da presença de lamas na performance da flotação era efetuada a partir de ensaios que passaram a ser designados em concentradores de minérios de ferro como testes de “*by-pass* de lamas”. Esses testes simulam diferentes eficiências de deslamagem, considerando-se que zero, 1, 2, 3 ou 4 deslamagens corresponderiam aproximadamente a níveis de *by-pass* de, respectivamente, 33%, 10%, 4%, 1% e 0,4%. O minério (polpa a 50% de sólidos em peso) era adicionado a cuba de PVC de 4,0 L. A polpa

era homogeneizada por agitação manual e deixada em regime de sedimentação durante 5 min. O sobrenadante era coletado acima da marca de 1,6 L, simulando a deslamagem da polpa. O *by-pass*, BP, era calculado pela expressão:

$$BP = [(1,6 - V_{\min}) / (4,0 - V_{\min})]^n$$

sendo V_{\min} = volume de minério na cuba de PVC; n = número de etapas de deslamagem.

A maioria das amostras apresentaram aumento no grau de dispersão com a adição de soda cáustica, sendo a máxima dispersão obtida entre pH 7,5 e 8,5. Apenas uma amostra apresentou grau de dispersão estável em toda a faixa de pH estudada (5,5 a 10,5). O percentual de lama presente na etapa de flotação (*by-pass*) afeta de maneira distinta a seletividade de cada uma das amostras estudadas, sendo, em geral, observada melhor seletividade para níveis de *by-pass* inferiores a 4%. Uma amostra somente respondeu bem à flotação após a quarta deslamagem e outra manteve seu desempenho deficiente mesmo após esse último estágio de deslamagem.

CASTRO (2002) investigou os efeitos da granulometria e da mineralogia de finos na flotação de 8 tipologias de minérios da mina do Pico (MBR). Ensaios executados segundo planejamento fatorial levaram em conta os parâmetros de eficiência teor de sílica no concentrado, razão de concentração, índice de seletividade e recuperação metálica de ferro. O teor de sílica no concentrado, a razão de concentração e o índice de seletividade são mais influenciados por partículas na faixa entre 106 μm e 32 μm . Partículas na faixa <95 μm afetaram de forma significativa a recuperação metalúrgica de ferro. A distribuição de alumina na alimentação é o fator de maior influência sobre o desempenho da flotação, afetando o teor de sílica no concentrado, a razão de concentração e o índice de seletividade. A recuperação metalúrgica de ferro é afetada pela presença de fósforo. As fases mineralógicas gibbsita e caulinita são facilmente removíveis na deslamagem. O índice de seletividade é prejudicado pela presença de goethita.

QUEIROZ (2003) deu continuidade aos estudos de LIMA (2001), investigando os efeitos de mineralogia e dispersão/deslamagem na flotabilidade de diferentes tipologias de minérios da CVRD Alegria. Conclui-se que minérios especularíticos com cristais lisos, em textura especular em lamelas granulares e sinuosas, resultantes de ambientes com predominância de eventos tectônicos respondem bem à deslamagem e apresentam bom desempenho na flotação. Minérios martíticos apresentam dois tipos de comportamento: i. aqueles com predominância de microporosidade localizada entre a estrutura em treliça, com pouca conexão entre os poros e pouco material terroso associado a poros e interstícios respondem bem a deslamagem e flotação; ii. aqueles em que os poros são preenchidos exibem resposta inferior a deslamagem e flotação. Minérios goethíticos também podem ser sub-divididos em duas classes: i. a classe com predominância de goethita é favorável a deslamagem e flotação; aquela com predominância de goethita terrosa apresenta comportamento oposto. Minérios com partículas policristalinas, provenientes de regiões que sofreram ação intensa de intemperismo, apresentam alto nível de porosidade entre os cristais e material terroso consistindo de caolinita e gibbsita associado aos poros, requerendo atenção especial no que tange à deslamagem.

Uma análise das conclusões dos trabalhos de CASTRO (2002) e QUEIROZ (2003) ressalta a importância de se estudar as características de dispersão de cada tipo de minério, pois o mesmo mineral pode apresentar diferentes comportamentos quando presente em minérios distintos.

CARVALHO (2003), estudando a interferência de cátions Ca^{2+} nas etapas de deslamagem e flotação de minério de ferro, observou que acima de pH 10,5 esses cátions atuam como coagulantes das partículas na polpa, prejudicando o desempenho da flotação.

PEREIRA (2004) investigou correlações entre dispersão e flotação de minério de zinco calamínico. Nos ensaios de dispersão, executados no tubo de sedimentação desenvolvido por GALÉRY (1985), com o auxílio de planejamento fatorial, foram selecionadas as variáveis sulfeto de sódio, pH, dispersante (hexametáfosfato de sódio, poliácrlato, carboximetilcelulose e Calgon) e ordem de adição (sulfeto de sódio/dispersante ou

dispersante/sulfeto de sódio). Todos os dispersantes testados mostraram-se efetivos na dispersão do minério sob investigação, tendo o hexametáfosfato apresentado ação mais significativa. A ordem de adição mostrou-se significativa no caso do poliacrilato e da carboximetil celulose, a adição do sulfeto de sódio devendo preceder a do dispersante. A adição de sulfeto de sódio mostrou-se essencial para dispersão e flotação do minério calamínico não deslamado, sugerindo-se dosagem entre 3.000 g/t e 5.000 g/t.

Esta etapa da revisão mostra que os estudos sobre dispersão de minérios brasileiros focalizaram especialmente minérios oxidados de zinco e minérios de ferro. Em ambos os sistemas de flotação o coletor pertence à família das aminas. O mecanismo eletrostático (não específico) de adsorção das aminas torna essa classe de coletores particularmente sensível à ação de lamas. No caso o minério de zinco calamínico, a possibilidade de se eliminar a deslamagem antecedendo a flotação, desde que se consiga um grau de dispersão adequado das partículas na polpa, constitui-se em conquista da maior relevância no campo da flotação de oxi-minerais.

3.5 Dispersão em polpas de sulfetos

O único relato encontrado na literatura brasileira versando sobre efeito da dispersão em polpa de sulfetos na seletividade da flotação foi publicado por PEREIRA (1985). A investigação visou a redução do teor de magnésio e de silício do concentrado de sulfetos de cobre (calcopirita e bornita) produzido nos primeiros anos de operação do concentrador de Jaguarari, da Caraíba. Estudo mineralógico mostrou que a fonte de contaminação do concentrado era o mineral hiperstênio, um silicato de ferro e magnésio, com grau de liberação superior a 50%, indicando interação com o coletor dos sulfetos de cobre. Determinações de potencial zeta e ensaios de microflotação, na presença e ausência de cátions metálicos com possibilidade de interferência nas propriedades interfaciais do hiperstênio, além de ensaios com enstatita (silicato de magnésio, podendo ser considerado “hiperstênio sem ferro”) sugeriram que a ativação inadvertida seria devida à presença de Fe^{2+} , proveniente tanto do retículo cristalino do mineral quanto do desgaste de corpos moedores e revestimento de moinhos, já que condições redutoras prevalecem na moagem

de sulfetos. A primeira tentativa de depressão do hiperstênio com o tipo de amido de alto peso molecular, empregado na flotação catiônica reversa de minérios de ferro, foi desastrosa, pois a floculação das partículas na polpa eliminou totalmente a seletividade. A busca por um depressor com ação dispersante levou à escolha de uma dextrina (amido modificado solúvel em água em temperatura ambiente) com peso molecular em torno de 7000 dalton. Os resultados são apresentados na tabela III.2.

Tabela III. 2 – Evolução do nível de contaminantes no concentrado de cobre da Caraíba (PEREIRA, 1985)

Condição↙/ Contaminante→	MgO%	SiO ₂ %
Primeiros anos de operação	7,5	20,0
Especificação	4,5	12,8
Após dextrina	3,3	10,0

Na literatura internacional merece destaque a revisão realizada por BULATOVIC (1999) sobre o uso de polímeros orgânicos na flotação de minérios polimetálicos. O autor salienta que muitos polímeros orgânicos são usados na indústria mineral como agentes de flotação com funções específicas como depressores, dispersantes ou floculantes, sendo empregados “principalmente na flotação seletiva de óxidos, silicatos, minério de ferro e fosfatos”. A expressão entre aspas apresenta um pleonasma, pois a flotação de minérios de ferro não deixa de ser flotação de óxidos. São discutidos aspectos da química dos polímeros usados em flotação, salientando-se que, além da complexidade, existem incertezas sobre a composição dos mesmos (amidos, dextrinas, lignossulfonatos modificados e quebracho). Referências antigas da literatura russa mencionam que a limitada utilização de polímeros na flotação de sulfetos se deve à adsorção não seletiva (DUDENHOV & SHUBOV, 1969; GORLOVSKII, 1956).

A maioria das investigações versando sobre o uso de polímeros orgânicos na flotação de sulfetos abordam a depressão de minerais de ganga hidrofóbicos (não sulfetos). Uma aplicação clássica de polímeros não iônicos (amidos e dextrinas) é a depressão de galena na

separação chumbo-cobre a partir de concentrados *bulk* (BULATOVIC, 1999). O tipo de amido afeta significativamente a intensidade da ação depressora. O mesmo autor menciona ainda a potencialidade do emprego de quebracho e outros derivados do ácido tânico na depressão de pirita, esfalerita e galena, sendo o quebracho modificado cationicamente (tratado com amina) o mais efetivo na depressão de pirita, em estreita faixa de pH, em torno da condição neutra.

PUGH (1989) menciona que macromoléculas orgânicas (goma de guar polissulfonatada, carboximetil guar, goma de guar, amido de milho, polímero polissulfonato de viscosidade reduzida) agem como depressores de galena na separação de sulfetos de cobre com xantato. O artigo não menciona se os polímeros apresentam graus de polimerização característicos de floculantes ou dispersantes, mas pelo menos no caso de um deles a viscosidade reduzida denota sua ação dispersante. A ação depressora sobre galena é indesejável para o escopo da presente investigação. Este autor também salienta que o principal papel de polímeros em flotação de sulfetos é a depressão de espécies naturalmente hidrofóbicas.

Outro estudo sobre depressão de galena de concentrado *bulk* com calcopirita foi desenvolvido por LIU e ZHANG (2000). Na depressão de galena com dextrina o pH deve ser ajustado com NaOH. No caso da utilização de cal, a presença de cátions cálcio restaura a flotabilidade da galena e deprime a calcopirita. A adição de ácido cítrico elimina a ação nociva dos cátions cálcio e restaura a seletividade na presença de dextrina.

VERGOUW et al. (1998) estudaram a aglomeração dos minerais pirita e galena correlacionando potencial zeta e taxa de sedimentação. A taxa de sedimentação foi medida por técnica baseada em condutividade, com aquisição automática de dados. Para os minerais individuais, o pH de máxima taxa de sedimentação corresponde ao ponto isoelétrico. Os efeitos dos cátions cálcio e chumbo sobre a taxa de sedimentação foram pouco significativos se comparados com aquele do cátion ferroso, que reduz acentuadamente a taxa de sedimentação de ambos os minerais, possivelmente pela ação repulsiva de espécies hidroxiladas de ferro hidrofílicas.

Investigações realizadas com minérios sulfetados de cobre-níquel, da região de Sudbury, Canadá (concentrador de Strathcona), mostraram que a presença de EDTA melhora a recuperação tanto de níquel quanto de cobre no concentrado *bulk* (BULATOVIC,1999).

WAKAMATSU et al. (1979) investigaram o efeito de glicina, β -anilina e ácido γ -amino butírico na flotação de minérios de chumbo-zinco, concluindo que esses amino-ácidos de cadeia curta melhoram a adsorção de xantato na galena, particularmente na faixa de pH de existência de íon dipolar em água.

BARBUCCI et al. (1984) investigaram a dispersão/floculação de calcosita pela ação de polímeros sintéticos com estrutura poli-(amido-amino) contendo grupos carboxílico e sulfônico. Polímeros capazes de formar complexos estáveis e seletivos com Cu^{2+} agem como dispersantes da calcosita. Aqueles que não formam esses complexos apresentam forte ação floculante. A dispersão é explicada por repulsão eletrostática entre partículas recobertas pelo complexo Cu polímero e o complexo em solução. A floculação é explicada pela blindagem da carga mineral por adsorção do polímero em estrutura helicoidal compacta. Não são apresentados detalhes sobre as características químicas dos polímeros que são designados apenas por letras e índices. O desenvolvimento de polímeros com afinidade específica por cátions chumbo seria, em princípio, viável.

A equipe do Ian Wark Research Institute tem se dedicado a estudos envolvendo a dispersão/depressão de sulfetos (LANGE et al., 1997; WIGHTMAN et al., 2000; BANDINI et al., 2001; BOULTON et al., 2001; BOULTON et al., 2001a).

LANGE et al. observaram que a flotação, em pH 5, de esfalerita fina (<20 μm) pode ser melhorada pela agregação com partículas mais grossas (até 100 μm) no condicionamento com xantato. Mesmo antes da adição de reagentes a aglomeração pode ser notada. Em pH 8,5 a formação de hidróxidos superficiais inibe a flotação.

WIGHTMAN et al. (2000) mostraram que a flotabilidade de galena ultrafina ($<5 \mu\text{m}$) pode ser melhorada pela agregação seletiva em galena grossa previamente condicionada com um polímero. A eficiência da técnica foi testada na separação por flotação de uma mistura artificial galena-quartzo. Ressalte-se que o artigo não apresenta informações sobre o polímero utilizado. A galena grossa e o quartzo eram espécies minerais, enquanto a galena fina era precipitada em laboratório.

BOULTON et al. (2001 e 2001a) estudaram a depressão de sulfetos de ferro na flotação de esfalerita. Poliacrilamidas de baixo peso molecular modificadas pela presença de grupos funcionais carboxila, sulfonato, hidroxila ou tiouréia mostraram-se eficientes na depressão de pirita. A seqüência de depressão foi: hidroxila $>$ carboxila \geq tiouréia $>$ sulfonato. A seletividade seguiu a seqüência: carboxila \geq sulfonato $>$ hidroxila \gg tiouréia. A ação depressora manifesta-se mais fortemente sobre partículas grossas e as poliacrilamidas devem ser adicionadas antes do coletor. A depressão pode ser também conseguida por condicionamento com oxigênio gasoso e com o emprego de coletores específicos para cobre na flotação de esfalerita ativada com cátions cúprico.

BANDINI et al. (2001) investigaram a ação deletéria de recobrimento por lamas (*slimes coating*) de óxidos de ferro na flotação de galena. Sugere-se para a remoção dessas lamas uma combinação de condicionamento cisalhante (*shear conditioning*) e controle de pH, bem como o emprego de reagentes aniônicos (carboximetil celulose e polifosfatos).

Esta revisão evidencia que, apesar da inexistência de registros sobre deslamagem antecedendo a flotação em concentradores tratando minérios sulfetados, o conhecimento do estado de dispersão das partículas nessas polpas é relevante na busca de um melhor desempenho da flotação.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

4.1 – Aparelhagem

4.1.1 - Teste de dispersão

Os principais equipamentos utilizados no desenvolvimento dos testes de dispersão foram:

- Tubo de dispersão padrão composto por agitador magnético da marca Marconi (Equipamento e Calibração para Laboratório) e modelo – MA 089 V.220, com uma barra magnética para realização dos testes de sedimentação.
- Bécher e balões de 200 ml da marca Pirex e modelo da forma baixa, para preparação das amostras.
- Balança analítica – Utilizada para pesagem com precisão, marca Gehaka modelo AG 200.
- Estufa – Utilizada para secagem de amostras, marca Fanem modelo 320E.
- Filtro a vácuo – Utilizado com papel de filtro para secagem das amostras, marca Bocerwards modelo XDS 10C.
- Pêra e pipetas – Utilizada para dar precisão nas dosagens de reagentes, marca BRAND.
- Cronômetro – Utilizado para medir o tempo padrão do teste.
- Materiais auxiliares - Baldes, bandejas, planilha de acompanhamento.

4.1.2 - Testes de flotação

Os principais equipamentos utilizados no desenvolvimento dos testes de flotação foram:

- Moinho de bolas utilizado para adequar a granulometria ao padrão.
- Peneiras da série Tyler utilizadas para verificar a distribuição granulométrica.
- Célula de flotação – Utilizada na flotação das amostras, marca CDC, modelo GFB – 1000 EEPN.
- Cuba – fabricante CDC de 3,5 L.
- Cronômetro – Utilizado para medir o tempo padrão do teste.
- pHmetro – Utilizado para medir o pH da polpa, marca Digimed, modelo DM 20.
- Filtro a vácuo – Utilizado com papel de filtro para secagem das amostras, marca Bokedwards, modelo XDS 10C.
- Estufa - Utilizada para secagem de amostras, marca Fanem modelo 320E.
Pêra e pipetas – Utilizada para dar precisão nas dosagens de reagentes, marca BRAND.
- Balança - Utilizada para pesagem com precisão, marca Gehaka modelo AG 200.
- Materiais auxiliares - Baldes, bandejas, seringa, saco plástico, planilha de acompanhamento.

4.2 - Reagentes

4.2.1 - Reagentes comerciais

- HEXA METAFOSFATO DE SÓDIO (HMF Sódio) – fabricante Nuclear, usado como dispersante.
- SILICATO DE SÓDIO (Na_2SiO_3) - fabricante VETEC Química Fina Ltda., usado como dispersante. Relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 3,27 (neutro).
- SILICATO DE SÓDIO - Pureza Analítica (Na_2SiO_3 - PA) - fabricante VETEC Química Fina Ltda., usado como dispersante.
- META SILICATO DE SÓDIO (Sódio Meta) – fabricante Nuclear, usado como dispersante.
- DISPERSOL – Substância Ativa POLIACRILATO DE SÓDIO fabricante Nalco Brasil Ltda., usado como dispersante.
- 7220 NALCO – Substância Ativa POLIACRILATO DE SÓDIO fabricante NALCO Brasil Ltda., usado como dispersante.
- NAOH – fabricante Merck S.A. Indústrias Químicas, usado como dispersante.
- 3223 – Substância Ativa POLIACRILATO DE SÓDIO fabricante CYTEC, usado como dispersante.
- Carbonato de sódio (Na_2CO_3) – fabricante Companhia Nacional de Álcalis, usado como modulador de pH / dispersante.

- Cal – fabricante Cia. de Cimento Portland Itaú, usada como modulador de pH.
- Isopropil xantato de potássio – fabricante Cytec, usado como coletor na flotação de galena.
- Sulfato de cobre – fabricante Votorantim, usado como ativador de esfalerita.
- Isobutil xantato de potássio – fabricante Cytec, usado como coletor na flotação de esfalerita.
- Metil amil álcool – fabricante Foothills Ind&Co Ltda., usado como espumante para flotação.

4.2.2 - Reagentes de pureza analítica

- ÁCIDO CLORÍDRICO
- ÁCIDO NÍTRICO
- ACETATO DE AMÔNIO 50%
- CLORETO DE AMÔNIO
- HIDRÓXIDO DE AMÔNIO
- PERSULFATO DE AMÔNIO
- ÁCIDO SULFÚRICO 10%

- ACETATO DE SÓDIO 25%
- ALARANJADO XILENOL
- EDTA 0,1 MOLAR

Todos os reagentes acima são da marca Merck S.A. Indústrias Químicas, sendo utilizados para análises químicas.

4.3 – Teste de dispersão

Considerando que a literatura mostra a importância de um maior grau de dispersão dos finos de minério para obtenção de melhores condições de flotação, foram realizados ensaios de dispersão com diferentes tipos de reagentes. Foram avaliados os efeitos das dosagens dos reagentes dispersantes nos minerais e na polpa mineral.

Os testes de dispersão com o minério de Morro Agudo foram realizados segundo os seguintes passos:

- Coletar amostra do *overflow* do ciclone na alimentação da usina e amostras dos minerais de esfalerita, galena, pirita e dolomita. Massa mínima de 500 g, o suficiente para realizar 100 ensaios. Britar, moer, filtrar, secar, desagregar em malha de 150 μm (100 mesh Tyler), homogeneizar e quarterar em alíquotas de 100 g.
- Homogeneizar e quarterar a alíquota de 100 g em 20 frações de 5 g cada.
- Adicionar 5 g de minério sulfetado no tubo de sedimentação.

- Adicionar 13,5 mL de água com o pH ajustado em 10,0 utilizando Na_2CO_3 .
- Adicionar o dispersante na concentração de 0,5% com a dosagem predefinida e condicionar por 3 minutos.
 - Os testes foram realizados nas dosagens de 500 g/t, 1.500 g/t e 3.000 g/t.
 - Os dispersantes puros e compostos 50% / 50% que foram utilizados nos testes são:
 - 3223;
 - Na_2SiO_3 ;
 - Dispersol;
 - Na_2CO_3 ;
 - NaOH;
 - HMF Sódio;
 - Sódio Meta;
 - Dispersante 7220;
 - Na_2SiO_3 - PA;
 - 50% Na_2SiO_3 - PA + 50% Dispersol;
 - 50% Dispersol + 50% 3223;
 - 50% Dispersol + 50% HMF Sódio;
 - 50% Dispersol + 50 % Sódio Meta;
 - 50% Silicato + 50% HMF Sódio.
 - 50% Silicato + 50 % Sódio Meta;
- Após 3 min de condicionamento do dispersante, completar o volume do tubo para 200 mL e ajustar o pH para 10,0 utilizando água preparada com Na_2CO_3 e deixar condicionar por mais 3 min. O pH 10 foi escolhido para realizar os testes de dispersão por se tratar de um processo onde a flotação é realizada em meio básico e o efeito da variação do pH no

resultado do índice de dispersão entre pH 3 e pH 10 foi pequeno, ficando todos os dados entre 3,5 e 4,5. O índice geral de dispersão em relação a influência do pH pode ser visto na figura 4.1.

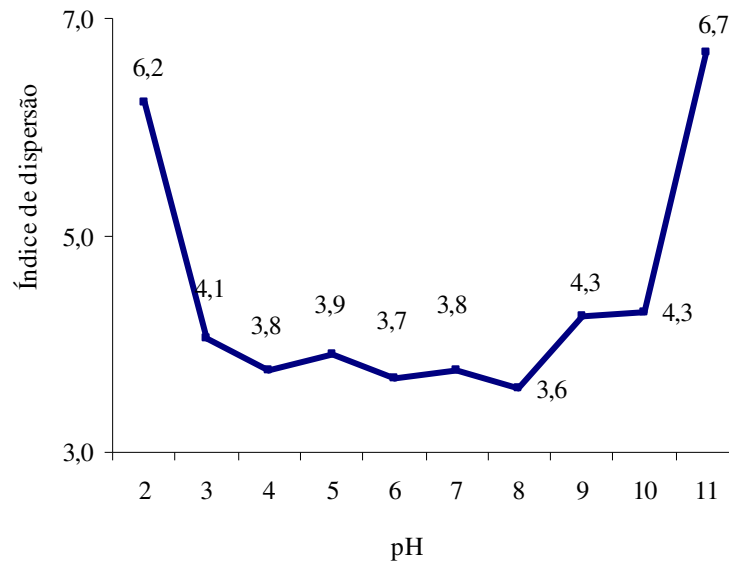


Figura 4.1 - Influência do pH no grau de dispersão.

- Desligar o agitador, aguardar 5 minutos de sedimentação e coletar separadamente as frações dispersa e afundada.
- Colocar as frações para secarem em estufa a 100°C.
- Pesar os produtos e anotar pesos na planilha de acompanhamento de testes.
- Calcular o índice de dispersão.
- Para avaliação do efeito das variáveis estudadas será calculado o índice de dispersão (ID) conforme definido a seguir:

$$ID (\%) = [\text{Massa } overflow / (\text{Massa } overflow + \text{Massa } underflow)] \times 100$$

Onde: *Massa overflow* – fração da amostra em suspensão após 5 min de sedimentação.

Massa underflow – fração da amostra afundada após 5 min de sedimentação.

- O condicionamento dos reagentes e os ensaios de sedimentação foram realizados no aparelho padrão denominado tubo de sedimentação. Esse aparelho consta de um tubo de vidro de 4,5 cm de diâmetro e 16,3 cm de altura, com uma saída (0,5 cm de diâmetro) para o sobrenadante a 1,5 cm do fundo do tubo. O tubo é instalado sobre um agitador magnético que realiza a agitação da polpa mediante uma barra magnética.
- Todos os testes foram realizados em duplicata, para atestar que os resultados são representativos e não apresentam desvios de procedimento acima do permitido.
- Foi utilizada para validar os testes a seguinte expressão:
 - $(\text{valor maior} - \text{valor menor}) / (\text{valor maior})$;
 - Resultado da equação - se $< 10\%$, retira-se a média dos dois números e considera-se este como o valor do teste.
 - Resultado da equação - se $> 10\%$ repete-se o teste em duplicata.

4.4 – Testes de flotação

Visando verificar a influência do grau de dispersão das partículas na polpa do minério sulfetado de galena e esfalerita de Morro Agudo na flotação, foram realizados testes de flotação em bancada com as condições mais representativas obtidas nos ensaios de dispersão e os resultados serão comparados com aqueles do teste padrão. O processo de flotação é composto por dois circuitos em série, onde primeiramente realiza-se a flotação de galena e depois a flotação de esfalerita.

Os testes de flotação em bancada foram realizados segundo os seguintes passos:

- Coletar amostra da alimentação da moagem (< 8 mm), massa mínima 25 kg. Britar a amostra 100% passante em 3,35 mm (6 mesh Tyler), homogeneizar e quarterar em alíquotas de 1400 g.
- Adicionar 1400 g de minério e 467 mL de água no moinho e moer durante 1 hora.
- Após moagem, colocar a polpa moída na cuba de flotação e adicionar água até a marca da cuba correspondente a 3.500 mL.
- Iniciar o processo de flotação, onde primeiramente faz-se a flotação de galena.
- Levar a cuba até a célula de flotação e ligá-la em 1.500 RPM.
- Condicionar a polpa a 1.500 RPM durante 1 minuto.
- Antes de iniciar-se a flotação, coletar uma pequena alíquota da polpa (100 mL), filtrar, secar, pesar e enviar para análise química.

- Após coleta da amostra e mantendo a rotação da célula de flotação em 1.500 RPM, adicionar carbonato de sódio (10% p/v) até modular o pH em 9,8, 70 g/t ROM de isopropil xantato de potássio (5% p/v) como coletor de galena e 14 gotas de mibcol (espumante). Não é necessário condicionamento.
- Após adição dos reagentes reduzir a rotação da célula de flotação para 1100 RPM, abrir o ar e ajustar a vazão do mesmo no rotâmetro para 8 NL/min e ligar os raspadores da cuba.
- Efetuar a flotação da galena durante 20 minutos.
- Filtrar, secar, pesar e enviar para análise química a galena flotada.
- Coletar uma pequena alíquota do rejeito de flotação da galena (100 mL), filtrar, secar, pesar e enviar para análise química.
- Com a mesma polpa do rejeito da flotação do circuito da galena iniciar a flotação da esfalerita.
- Condicionar novamente a polpa a 1500 RPM, modulando o pH para 10,5 com cal (100%).
- Adicionar 300 g/t ROM de sulfato de cobre (10% p/v) com ativador de esfalerita, condicionando por 5 minutos.
- Adicionar 150 g/t ROM de isobutil xantato de potássio (5% p/v) como coletor de esfalerita. Não é necessário tempo de condicionamento.
- Efetuar a flotação da esfalerita durante 20 minutos.

- Filtrar, secar, pesar e enviar para análise química a esfalerita flotada.
- Coletar uma pequena alíquota do rejeito final (100mL), filtrar, secar, pesar e enviar para análise química.
- Todas as alíquotas que foram separadas: alimentação da flotação, concentrado da flotação de galena, rejeito da flotação de galena, concentrado da flotação de esfalerita e rejeito final da flotação são filtradas, secadas, pesadas e enviados para análises químicas para determinação dos teores de zinco, chumbo, cádmio e ferro.
- Filtrar e secar a polpa restante na cuba e anotar a massa de rejeito.
- Todos os resultados das análises químicas e massas são lançados em uma planilha onde são calculadas as recuperações de massa e metalúrgica de acordo com a fórmula de DAY (2002) descrita abaixo. A simbologia utilizada no cálculo das recuperações de massa e metalúrgica foi descrita na tabela IV.1.

Tabela IV.1 - Simbologia utilizada no cálculo das recuperações de massa e metalúrgica

Produto	Massas (%)	Teores Pb (%)	Teores Zn (%)	Resultado
Alimentação	F	c ₁	z ₁	
Concentrado Chumbo (Pb)	C	c ₂	z ₂	
Concentrado Zinco (Zn)	Z	c ₃	z ₃	
Rejeito	T	c ₄	z ₄	
Relação de Concentração				K _{Zn} e K _{Pb}
Recuperação				R _{Zn} e R _{Pb}

A **Relação de Concentração** pode ser definida como o número de toneladas de alimentação requerido para produzir 1 tonelada de concentrado, K_{Zn} e K_{Pb}, respectivamente

para zinco e chumbo, com R_{Zn} e R_{Pb} (percentagem de recuperação de metais nos correspondentes concentrados).

$$C = F \times \frac{(c_1 - c_4)(z_3 - z_4) - (z_1 - z_4)(c_3 - c_4)}{(c_2 - c_4)(z_3 - z_4) - (z_2 - z_4)(c_3 - c_4)} \rightarrow \text{zinco no concentrado (t)}$$

$$Z = F \times \frac{(c_2 - c_4)(z_1 - z_4) - (c_1 - c_4)(z_2 - z_4)}{(c_2 - c_4)(z_3 - z_4) - (z_2 - z_4)(c_3 - c_4)} \rightarrow \text{chumbo no concentrado (t)}$$

Recuperação de Pb: $R_{Pb} = \frac{C \times c_2}{F \times c_1} \times 100 \text{ (\%)}$

Recuperação de Zn: $R_{Zn} = \frac{Z \times z_3}{F \times z_1} \times 100 \text{ (\%)}$

Relação de concentração: $K_{Pb} = \frac{F}{C}$

$$K_{Zn} = \frac{F}{Z}$$

4.5 – Amostras

As amostras que foram utilizadas nos testes de dispersão e flotação são provenientes da mina subterrânea da unidade da Votorantim Metais Zinco unidade de Morro Agudo.

Para os testes de dispersão foram utilizadas quatro amostras de minerais esfalerita, galena, pirita e dolomita e uma amostra de minério que alimenta a usina. As amostras dos minerais e as amostras de minério foram caracterizadas granulometricamente.

4.5.1 - Mineral Esfalerita

A amostra do mineral esfalerita utilizada para os testes de dispersão apresenta teores de Zn 59,99%, Pb 1,7% e Fe 2,04%. A análise química da amostra por faixas granulométricas é mostrada na tabela IV.2.

Tabela IV.2 - Análise química por faixas granulométricas da amostra do mineral esfalerita

ESFALERITA (ZnS)									
ABERTURA MALHA			PESO Gramas	% RETIDA		PASSANTE (%)	TEOR (%)		
Mesh Tyler	mm	µm		Simples	Acumulada		Zn	Pb	Fe
150	0,105	105	0,00	0,00	0,00	100,00			
200	0,074	74	0,70	0,70	0,70	99,30	59,030	1,450	2,540
270	0,053	53	2,60	2,60	3,30	96,70	59,450	1,180	2,320
325	0,045	45	4,70	4,70	8,00	92,00	59,670	1,150	2,540
400	0,037	37	5,20	5,20	13,20	86,80	59,880	0,986	2,580
<400	<0,037	<37	86,80	86,80	100,00	0,00	60,040	1,830	1,970
AMOSTRA DE CABEÇA CALCULADA							59,992	1,735	2,042
AMOSTRA DE CABEÇA ANALISADA							60,120	1,758	2,059

4.5.2 - Mineral Galena

A amostra do mineral galena utilizada para os testes de dispersão apresenta teores de Zn 0,75%, Pb 81,98% e Fe 0,33%. A análise química da amostra por faixas granulométricas é mostrada na tabela IV.3.

Tabela IV.3 - Análise química por faixas granulométricas da amostra do mineral galena

GALENA (PbS)									
ABERTURA MALHA			PESO Gramas	% RETIDA		PASSANTE (%)	TEOR (%)		
Mesh Tyler	mm	µm		Simples	Acumulada		Zn	Pb	Fe
150	0,105	105	10,70	10,70	10,70	89,3	1,260	81,170	0,607
200	0,074	74	11,70	11,70	22,40	77,6	0,920	81,970	0,379
270	0,053	53	8,50	8,50	30,90	69,1	0,906	82,370	0,418
325	0,045	45	7,40	7,40	38,30	61,7	0,836	82,330	0,418
400	0,037	37	5,30	5,30	43,60	56,4	0,834	82,350	0,418
<400	<0,037	<37	56,40	56,40	100,00	0	0,586	81,990	0,228
AMOSTRA DE CABEÇA CALCULADA							0,756	81,976	0,327
AMOSTRA DE CABEÇA ANALISADA							0,768	82,000	0,329

4.5.3 - Mineral Pirita

A amostra do mineral pirita utilizada para os testes de dispersão apresenta teores de Zn 0,15%, Pb 0,21% e Fe 26,49%. A análise química da amostra por faixas granulométricas é mostrada na tabela IV.4.

Tabela IV.4 - Análise química por faixas granulométricas da amostra do mineral pirita

PIRITA (Fe₂S)									
ABERTURA MALHA			PESO Gramas	% RETIDA		PASSANTE (%)	TEOR (%)		
Mesh Tyler	mm	µm		Simples	Acumulada		Zn	Pb	Fé
150	0,105	105	12,70	12,70	12,70	87,30	0,120	0,210	24,300
200	0,074	74	13,90	13,90	26,60	73,40	0,138	0,197	26,350
270	0,053	53	9,10	9,10	35,70	64,30	0,133	0,193	26,960
325	0,045	45	7,20	7,20	42,90	57,10	0,138	0,189	26,350
400	0,037	37	6,60	6,60	49,50	50,50	0,139	0,176	27,420
<400	<0,037	<37	50,50	50,50	100,00	0,00	0,176	0,234	26,890
AMOSTRA DE CABEÇA CALCULADA							0,155	0,215	26,488
AMOSTRA DE CABEÇA ANALISADA							0,161	0,212	26,520

4.5.4 - Mineral Dolomita

A amostra do mineral dolomita utilizada para os testes de dispersão apresenta teores de Zn 0,34%, Pb 0,13% e Fe 2,80%. A análise química da amostra por faixas granulométricas é mostrada na tabela IV.5.

Tabela IV.5 - Análise química por faixas granulométricas da amostra do mineral dolomita

TESTE DE DISPERSÃO - QUÍMICA POR FAIXA - DOLOMITA									
ABERTURA MALHA			PESO Gramas	% RETIDA		PASSANTE (%)	TEOR (%)		
Mesh Tyler	mm	µm		Simples	Acumulada		Zn	Pb	Fé
150	0,105	105	6,10	6,10	6,10	93,90	0,748	0,114	2,430
200	0,074	74	6,70	6,70	12,80	87,20	0,623	0,160	2,750
270	0,053	53	6,30	6,30	19,10	80,90	0,614	0,139	2,530
325	0,045	45	5,70	5,70	24,80	75,20	0,559	0,131	2,610
400	0,037	37	3,60	3,60	28,40	71,60	0,506	0,130	2,890
<400	<0,037	<37	71,60	71,60	100,00	0,00	0,228	0,129	2,870
AMOSTRA DE CABEÇA CALCULADA							0,339	0,131	2,800
AMOSTRA DE CABEÇA ANALISADA							0,352	0,130	2,850

4.5.5 - Minério utilizado nos testes de dispersão

A amostra do minério utilizada para os testes de dispersão apresenta teores de Zn 4,36%, Pb 1,82% e Fe 4,10%. A análise química da amostra realizada por faixas granulométricas é mostrada na tabela IV.6.

Tabela IV.6 - Análise química por faixas granulométricas do minério sulfetado de Pb e Zn

MINÉRIO SULFETADO DE ZINCO E CHUMBO									
ABERTURA MALHA			PESO Gramas	% RETIDA		PASSANTE (%)	TEOR (%)		
Mesh Tyler	mm	µm		Simples	Acumulada		Zn	Pb	Fe
150	0,105	105	2,3	2,3	2,3	97,7	1,67	0,198	2,97
200	0,074	74	5,2	5,2	7,5	92,5	2,07	0,198	3,17
270	0,053	53	6,3	6,3	13,8	86,2	2,88	0,274	3,43
325	0,045	45	6	6	19,8	80,2	4,11	0,535	4,16
400	0,037	37	5,4	5,4	25,2	74,8	4,23	0,541	4,22
<400	<0,037	<37	74,8	74,8	100	0	4,76	2,31	4,24
AMOSTRA DE CABEÇA CALCULADA							4,363	1,821	4,098
AMOSTRA DE CABEÇA ANALISADA							4,425	1,925	4,065

4.6 - Fluxograma de desenvolvimento da parte experimental

Para o desenvolvimento dos testes de dispersão e flotação foi seguido o fluxograma descrito na figura 4.2.

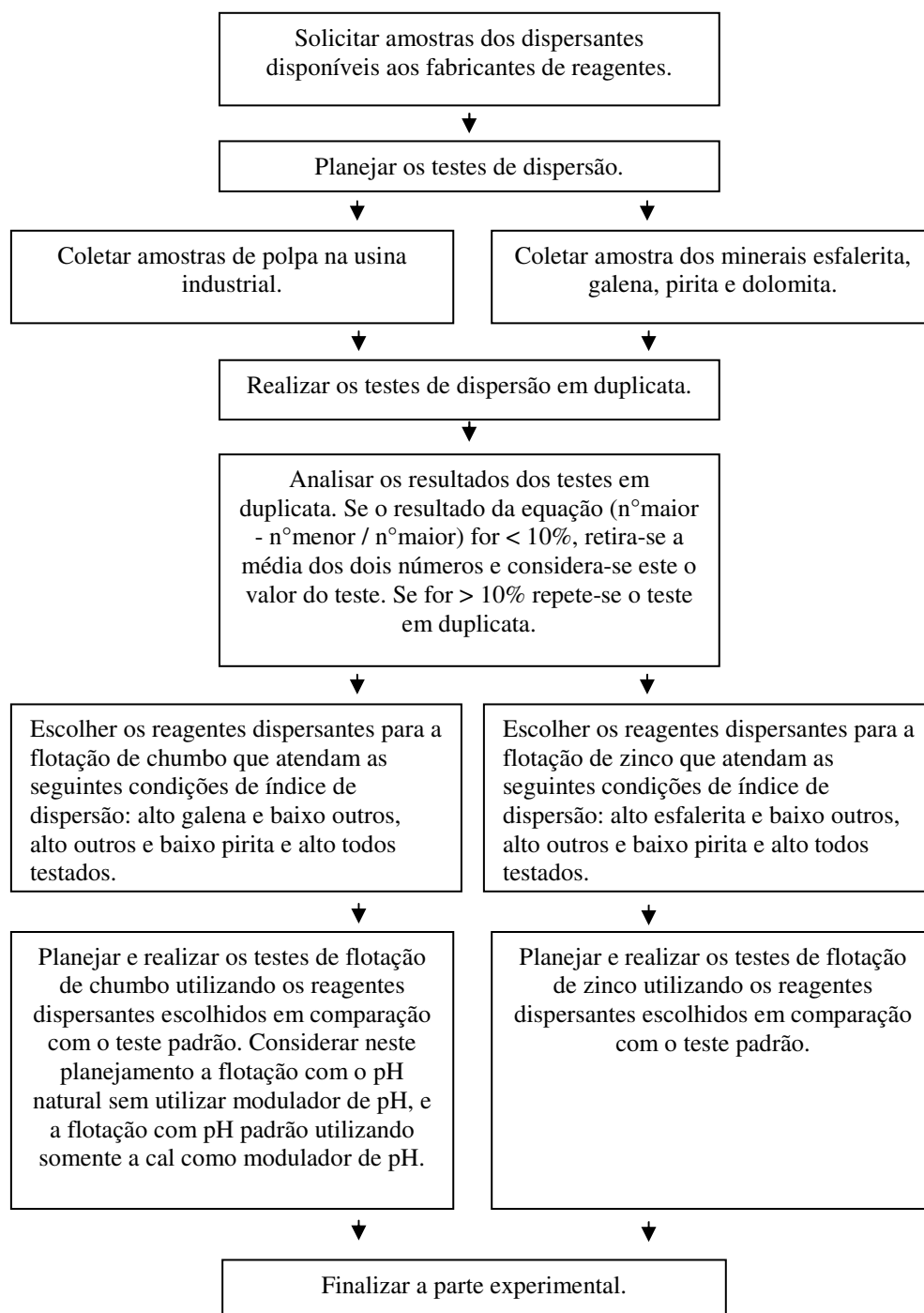


Figura 4.2 - Fluxograma de realização dos testes experimentais e análise de resultados.

CAPITULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Testes de dispersão

Os testes de dispersão foram realizados, em bancada, no tubo de sedimentação com 9 tipos de dispersantes e 6 misturas entre os dispersantes, na proporção de 50%/50%.

Para a realização dos testes foram utilizadas 3 dosagens diferentes do dispersante 500 g/t, 1.500 g/t e 3.000 g/t.

Os testes foram realizados com o minério da alimentação da usina e com os minerais esfalerita, galena, pirita e dolomita. No total foram realizados 450 testes de dispersão como todos os testes foram feitos em duplicata, gerou 225 valores de índice de dispersão.

Foram escolhidos três reagentes dispersantes para realizar os testes de flotação de zinco e três reagentes dispersantes para realizar os testes de flotação de chumbo entre os reagentes dispersantes puros e misturas testadas nos testes de dispersão em bancada.

A tabela completa apresentando todos os resultados dos testes de dispersão em duplicata, com seus respectivos erros, pode ser visualizada no anexo 1.

Foram considerados para o desenvolvimento deste projeto três níveis de dispersão, sendo dispersão baixa quando o índice de dispersão está entre 0 e 15%, dispersão média quando o índice de dispersão está entre 15 e 30% e dispersão alta quando o índice de dispersão está acima de 30%.

5.1.1 - Erros nos testes de dispersão em duplicata

O percentual de erro que foi o estabelecido para o aceite dos testes em duplicata foi de 10%. Este percentual é calculado subtraindo o maior valor do teste pelo menor valor e dividindo pelo maior valor e multiplicando o resultado por 100.

O percentual de erro foi estabelecido pelo tipo de teste realizado que gera apenas dois dados (teste em duplicata). Não foi encontrada nenhuma ferramenta estatística para tratar somente esses dois dados. Como os resultados dos índices de dispersão dos testes variam de 2 a 45%, o percentual de erro de 10% não representa modificação no resultado relativo entre os testes de dispersão com os tipos de reagentes, misturas e dosagens testadas.

Os erros médios obtidos nos testes em duplicata realizados ficaram em 1,6% sendo que todos os dados ficaram abaixo de 10%, conforme observado no histograma de frequência na figura 5.1.



Figura 5.1 - Histograma de frequência dos erros dos testes de dispersão em duplicata.

5.1.2 - Resultado dos testes de dispersão no minério

Os resultados dos índices de dispersão dos testes realizados no minério têm uma média de 21,06% que pode ser considerado uma dispersão mediana.

Os reagentes dispersantes que provocam um alto índice de dispersão no minério são: 3223, Dispersol, HMF Sódio e a mistura Dispersol + HMF Sódio. O reagente dispersante 3223 provoca o maior índice de dispersão no minério nas três dosagens testadas. A figura 5.2 mostra o gráfico com o índice de dispersão de acordo com a dosagem de reagente dispersante que provoca alto índice de dispersão no minério.

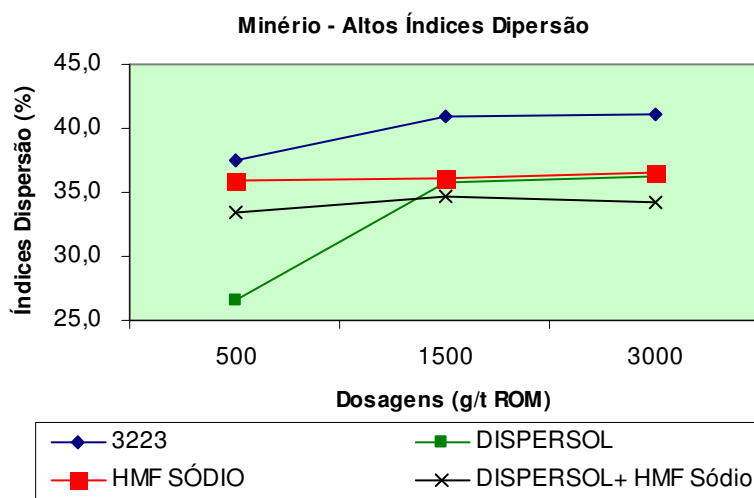


Figura 5.2 - Gráfico dos dispersantes que provocam altos índices de dispersão no minério.

Os reagentes dispersantes que provocam um baixo índice de dispersão no minério são: NaOH, Na₂SiO₃, a mistura silicato + sódio meta e o carbonato de sódio. O NaOH apresenta o menor índice de dispersão para o minério nas três dosagens em que foram realizados os testes. Vale ressaltar que o carbonato de sódio, utilizado no processo de flotação de Morro Agudo, ao contrario do que se imaginava, não é considerado um bom dispersante, tendo a função única de modulador de pH . A figura 5.3 mostra o gráfico dos reagentes dispersantes em função da dosagem que provocam os menores índices de dispersão no minério.

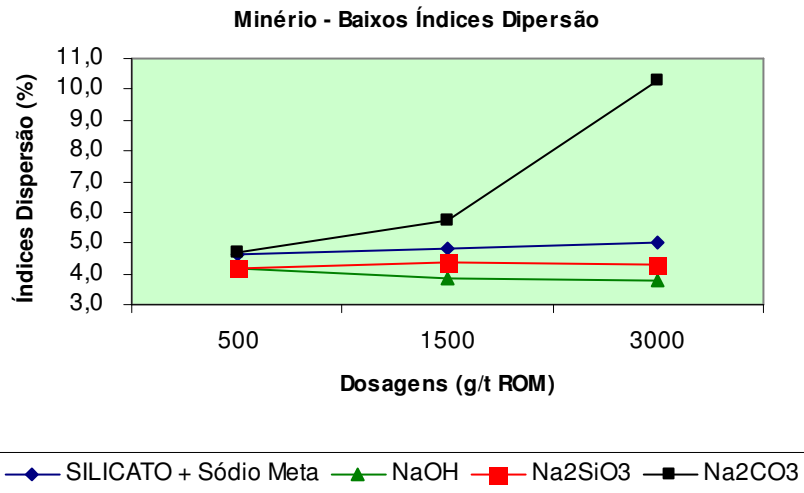


Figura 5.3 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixos índices de dispersão no minério.

5.1.3 - Resultado dos testes de dispersão no mineral esfalerita

Os resultados dos índices de dispersão dos testes realizados no mineral esfalerita têm uma média de 30,34% que pode ser considerado uma dispersão alta.

Os dispersantes e misturas de dispersantes que provocam um alto índice de dispersão na esfalerita são: 3223, dispersol, HMF Sódio e Silicato + Sódio Meta. O reagente que provoca o maior índice de dispersão em todas as três dosagens no mineral esfalerita é o HMF Sódio. A mistura silicato + Sódio Meta na dosagem de 500 g/t ROM provoca um índice de dispersão mediano. A figura 5.4 mostra o índice de dispersão em função da dosagem de reagentes dispersantes e suas misturas no mineral esfalerita.

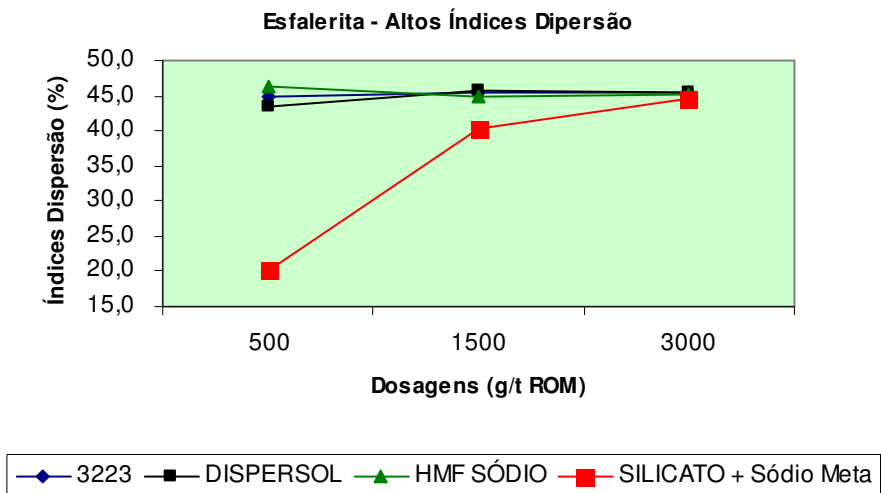


Figura 5.4 - Gráfico dos dispersantes que provocam alto índice de dispersão no mineral esfalerita.

Os dispersantes e misturas de dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral esfalerita são: Na_2SiO_3 , $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{PA}$, NaOH e o carbonato de sódio. O reagente dispersante que provoca menor índice de dispersão em todas as dosagens é o Na_2SiO_3 . A figura 5.5 mostra o gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral esfalerita nas dosagens de 500, 1.500 e 3.000 g/t ROM.

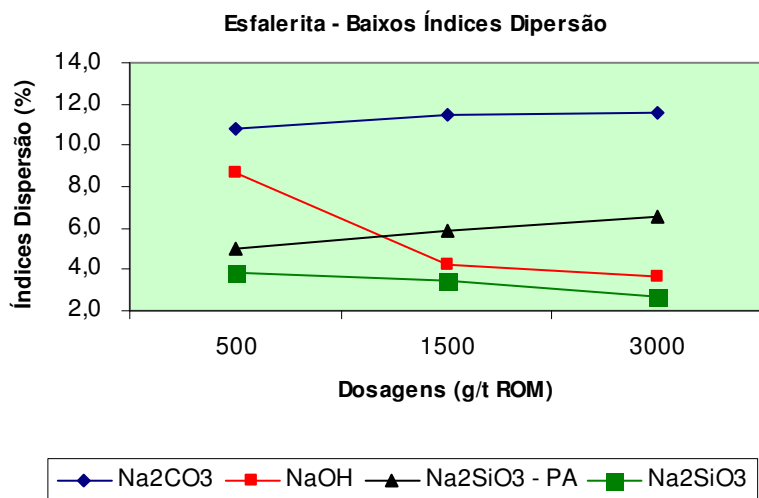


Figura 5.5 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral esfalerita.

5.1.4 - Resultado dos testes de dispersão no mineral galena

Os resultados dos índices de dispersão dos testes realizados no mineral galena têm uma média de 24,28% que pode ser considerado uma dispersão mediana.

Os dispersantes e misturas de dispersantes que provocam um alto índice de dispersão na galena são: 3223, Na_2SiO_3 , HMF sódio e a mistura dispersol + HMF sódio. O reagente que provoca o maior índice de dispersão nas dosagens de 500 e 1.500 g/t ROM no mineral galena é o reagente dispersante 3223 e na dosagem de 3.000 g/t é a mistura dispersol + HMF sódio . O reagente dispersante Na_2SiO_3 na dosagem de 500g/t ROM provoca um índice de dispersão baixo e apenas mediano nas dosagens de 1.500 e 3.000 g/t ROM. A figura 5.6 mostra o índice de dispersão em função da dosagem de reagentes dispersantes e suas misturas no mineral galena.

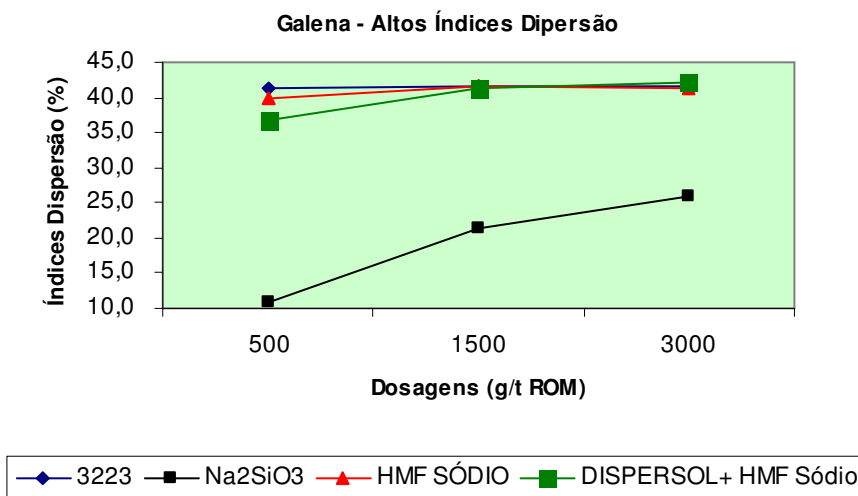


Figura 5.6 - Gráfico dos dispersantes que provocam alto índice de dispersão no mineral galena.

Os dispersantes e misturas de dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral galena são: Na_2SiO_3 – PA, NaOH, carbonato de sódio e a mistura silicato + sódio meta. O reagente dispersante que provoca menor índice de dispersão nas dosagens de 500 e 3.000 g/t ROM é o Na_2SiO_3 -PA, já na dosagem de 1.500 g/t ROM é o NaOH. A figura 5.7

mostra o gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral galena nas dosagens de 500, 1.500 e 3.000 g/t ROM.

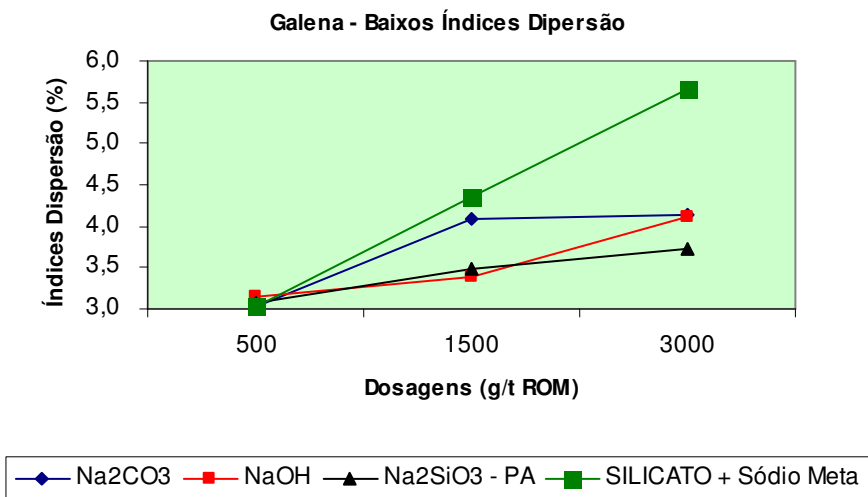


Figura 5.7 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral galena.

5.1.5 - Resultado dos testes de dispersão no mineral pirita

Os resultados dos índices de dispersão dos testes realizados no mineral pirita têm uma média de 11,97% que pode ser considerado uma dispersão baixa.

Os dispersantes e misturas de dispersantes que provocam um maior índice de dispersão na pirita são: dispersol e HMF sódio e as mistura dispersol + HMF sódio e Na₂SiO₃-PA + dispersol. O reagente que provoca o maior índice de dispersão nas dosagens de 500 e 1.500 g/t ROM no mineral pirita é a mistura dispersol + HMF sódio e na dosagem de 3.000 g/t é a mistura Na₂SiO₃-PA + dispersol.. A figura 5.8 mostra o índice de dispersão em função da dosagem de reagentes dispersantes e suas misturas no mineral pirita.

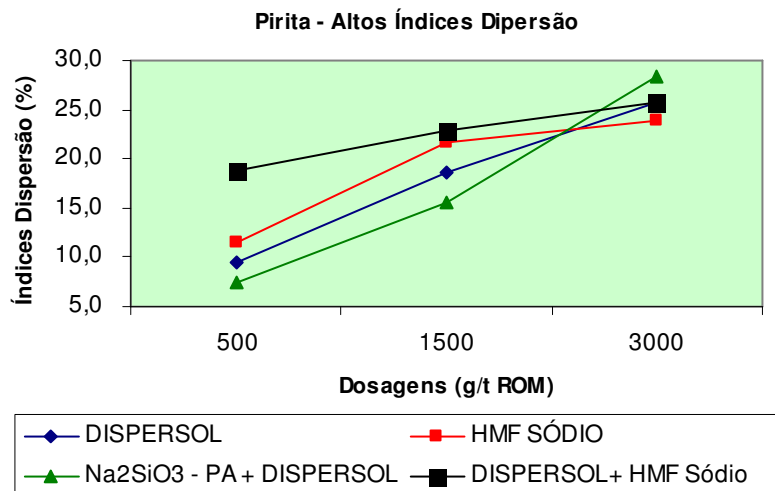


Figura 5.8 - Gráfico dos dispersantes que provocam maior índice de dispersão no mineral pirita.

Os dispersantes e misturas de dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral pirita são: Na₂SiO₃ – PA, NaOH, 3223 e o disp 7220. O reagente dispersante que provoca menor índice de dispersão na dosagem de 500 g/t ROM é o 3223, na dosagem de 1.500 g/t ROM é o disp 7220 e na dosagem de 3000 g/t é o NaOH. É importante frisar que no caso do 3223, com uma dosagem de 500 g/t ROM, o índice de dispersão dos minerais minério, galena e esfalerita, foi alto (figuras 5.4 e 5.8), e o da pirita que é um mineral contaminante nos concentrados de Morro Agudo, foi baixo, o que o coloca como um grande potencial de estudo industrial. A figura 5.9 mostra o gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral pirita nas dosagens de 500, 1.500 e 3.000 g/t ROM.

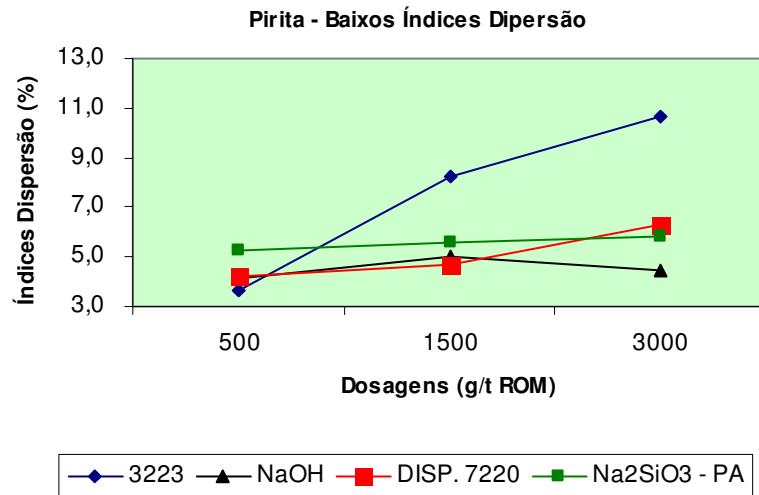


Figura 5.9 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral pirita.

5.1.6 - Resultado dos testes de dispersão no mineral dolomita

Os resultados dos índices de dispersão dos testes realizados no mineral dolomita têm uma média de 26,47% que pode ser considerado uma dispersão mediana.

Os dispersantes e misturas de dispersantes que provocam um maior índice de dispersão na dolomita são: dispersol, HMF sódio, 3223 e disp 7220. O reagente que provoca o maior índice de dispersão em todas as dosagens testadas no mineral dolomita é o 3223. A figura 5.10 mostra o índice de dispersão em função da dosagem de reagentes dispersantes e suas misturas no mineral dolomita.

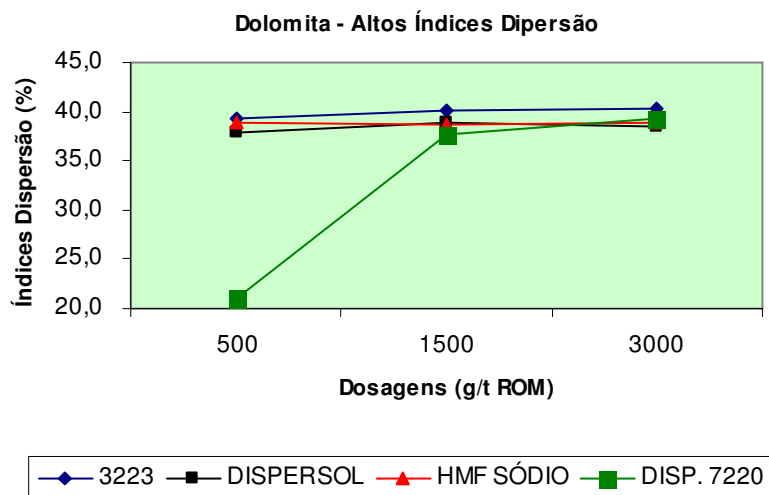


Figura 5.10 - Gráfico dos dispersantes que provocam alto índice de dispersão no mineral dolomita.

Os dispersantes e misturas de dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral dolomita são: Na_2SiO_3 – PA, NaOH, carbonato de sódio e o sódio meta. O reagente dispersante que provoca menor índice de dispersão na dosagem de 500 g/t ROM é o NaOH, nas dosagem de 1.500 e 3.000 g/t ROM é o carbonato de sódio. A figura 5.11 mostra o gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral dolomita nas dosagens de 500, 1.500 e 3.000 g/t ROM.

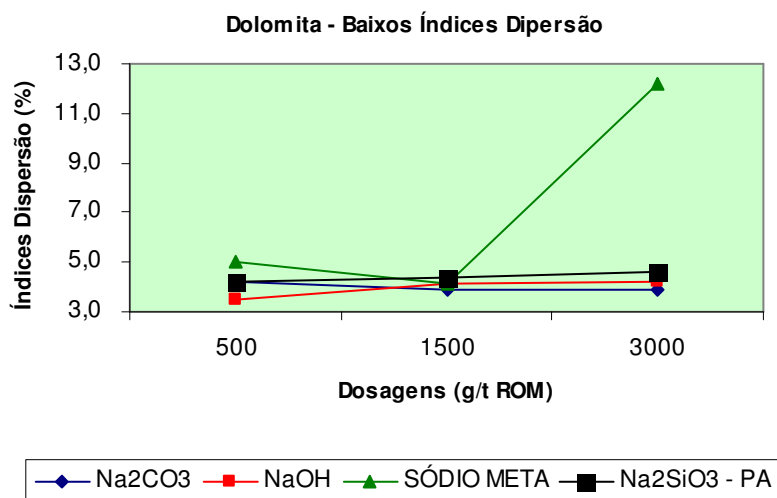


Figura 5.11 - Gráfico dos dispersantes que provocam baixo índice de dispersão no mineral dolomita.

5.1.7 - Reagentes dispersantes para a realização dos testes de flotação de chumbo e zinco

Para a realização dos testes de flotação de chumbo e zinco em bancada foram analisados e escolhidos três reagentes dispersantes que estão descritos abaixo com as suas respectivas justificativas e comentários.

O critério utilizado para a escolha dos reagentes dispersantes utilizados nas flotações de chumbo e zinco em bancada foram as seguintes:

Critérios utilizados na escolha dos dispersantes para realizar testes de flotação de chumbo e zinco em bancada:

1. Flotação de chumbo → O reagente que consegue um alto índice de dispersão para a galena e um baixo índice de dispersão para os outros minerais e minério testados.
2. Flotação de zinco → O reagente que consegue um alto índice de dispersão para a esfalerita e um baixo índice de dispersão para os outros minerais e minério testados.
3. Flotação de chumbo e zinco → O reagente que consegue um alto índice de dispersão para os minerais e minério testado e um baixo índice de dispersão para a pirita, que é considerado mineral contaminante para os concentrados dos dois processos de flotação.
4. Flotação de chumbo e zinco → O reagente que consegue um alto índice de dispersão para todos os minerais e minério testados.

Reagente dispersante escolhido de acordo com o critério 1, flotação de chumbo:

- **Silicato de Sódio (Na_2SiO_3)** → Como não se obteve com a realização dos testes um reagente que atingisse alto índice de dispersão apenas para a galena, foi escolhido o reagente dispersante silicato de sódio que apresenta um mediano índice de dispersão para o mineral galena nas dosagens de 1.500 g/t de 21,51% e 3.000 g/t de 25,93%, e também para o mineral dolomita na dosagem de 1.500 g/t de 21,29% e na dosagem de 3.000 g/t de

36,77%. O índice de dispersão do reagente dispersante silicato de sódio para o minério e os minerais esfalerita e pirita é considerado baixo nas três dosagens usadas nos testes realizados. A tabela V.1 apresenta os resultados obtidos com o reagente dispersante silicato de sódio nas dosagens de 500 g/t, 1.500 g/t e 3.000g/t.

O resultado que se pretende verificar com a adição deste reagente dispersante na flotação de chumbo é a influência do reagente dispersante que apresenta mediano índice de dispersão para a galena e a dolomita e baixo índice de dispersão para o minério e os minerais esfalerita e pirita.

As dosagens escolhidas para a flotação de chumbo do reagente dispersante silicato de sódio para realização dos testes de flotação de chumbo em bancada foram de 1.000 g/t, 1.250 g/t, 1.500 g/t, 1.750 g/t e 2.000 g/t sendo os resultados comparados com o teste padrão de flotação de chumbo que não utiliza nenhum tipo de dispersante.

Tabela V.1 - Resultado dos testes de dispersão com o dispersante Silicato de Sódio

DISPERSANTE	DOSAGEM	Dispersão (%)				
	(g/t)	Minério	Esfalerita	Galena	Pirita	Dolomita
Silicato de Sódio (Na ₂ SiO ₃)	500	4,18	3,84	10,75	5,80	3,64
	1.500	4,36	3,48	21,51	6,40	21,29
	3.000	4,28	2,66	25,93	8,42	36,77

Reagente dispersante escolhido de acordo com o critério 2, flotação de zinco:

Flotação de zinco:

- **Silicato + Sódio Meta** → Esta mistura de reagentes dispersantes se destacou por apresentar um alto índice de dispersão para a esfalerita de 40,41% na dosagem de 1.500 g/t e apresentar um baixo índice de dispersão para os demais minerais, 4,35% galena, 6,29% pirita e 12,00% dolomita e também

para o minério, índice de dispersão de 4,80%. A tabela V.2 apresenta os resultados obtidos nas dosagens de 500 g/t, 1.500 g/t e 3.000g/t.

Como a dispersão ótima que se deseja está em uma dosagem entre 500 g/t e 1.500 g/t, os testes de flotação foram realizados com dosagens da mistura dos reagentes dispersantes Silicato + Sódio Meta na flotação de zinco de 500 g/t, 750 g/t, 1.000 g/t, 1.250 g/t e 1.500 g/t, sendo os resultados comparados com aqueles do teste padrão de flotação de zinco que não utiliza nenhum tipo de dispersante.

Tabela V.2 - Resultado dos testes de dispersão com a mistura Silicato + Sódio Meta

DISPERSANTE	DOSAGEM	Dispersão (%)				
	(g/t)	Minério	Esfalerita	Galena	Pirita	Dolomita
Silicato Sódio + Meta Silicato de Sódio	500	4,64	19,99	3,02	5,13	3,53
	1.500	4,80	40,41	4,35	6,29	12,00
	3.000	4,99	44,62	5,67	10,56	35,51

Reagente dispersante escolhido de acordo com o critério 3, flotação de chumbo e zinco:

- **3223** → Este reagente se mostrou interessante por apresentar um índice de dispersão elevado para todos os minerais e minério que foram testados durante os testes de dispersão, exceto para a pirita nas três dosagens testadas de 500 g/t, 1.500 g/t e 3.000 g/t.

Para dosagem do reagente dispersante 3223 de 500 g/t o índice de dispersão do mineral pirita é 3,67%, para uma dosagem de 1.500 g/t o índice de dispersão para a pirita é 8,23% e para uma dosagem de 3.000 g/t, a pirita apresenta um índice de dispersão de 10,65%.

O índice de dispersão do minério, e dos minerais esfalerita, galena e dolomita quase não se altera com a variação nas três dosagens do reagente

dispersante. A tabela V.3 mostra os índices de dispersão em função da dosagem do reagente dispersante 3223 e dos minerais e minério testados.

O que foi explorado nos testes de flotação em bancada com a adição do reagente dispersante 3223 foi o efeito na flotação de chumbo e zinco do alto índice de dispersão dos minerais esfalerita, galena e dolomita e do minério, e do baixo índice de dispersão da pirita na dosagem de 500 g/t que é de 3,67%.

Como as dosagens de 1.500 g/t e 3.000 g/t do reagente dispersante 3223 não alteram muito o índice de dispersão da pirita, 8,23% e 10,65% respectivamente, os testes de flotação de chumbo e zinco com o reagente dispersante 3223 foram realizados com a dosagem variando de 100 g/t a 500 g/t, sendo realizados nas dosagens 100 g/t, 200 g/t, 300 g/t, 400 g/t e 500 g/t.

Tabela V.3 - Resultado dos testes de dispersão com o reagente dispersante 3223

DISPERSANTE	DOSAGEM	Dispersão (%)				
	(g/t)	Minério	Esfarelita	Galena	Pirita	Dolomita
3223	500	37,48	44,80	41,17	3,67	39,23
	1.500	41,00	45,33	41,72	8,23	40,12
	3.000	41,09	45,36	41,61	10,65	40,23

Reagente dispersante escolhido de acordo com o critério 4, flotação de chumbo e zinco:

- **Hexametáfosfato de Sódio** → Este reagente dispersante apresentou para dosagens acima de 1.500 g/t um alto índice de dispersão para todos os minerais e minério testados nos testes de dispersão.

O índice de dispersão para uma dosagem de 1.500 g/t de HMF Sódio para o minério foi de 36,10%, para a esfalerita 45,01%, para a galena 41,64%, para a pirita 21,67% e para a dolomita 38,76%. A variação na dosagem de 1.500 g/t para 3.000 g/t influenciou basicamente o índice de dispersão da pirita que

subiu de 21,67% para 23,83%. A tabela V.4 mostra a variação do índice de dispersão para os minerais e minério testados pela dosagem do reagente dispersante HMF Sódio.

O que foi verificado nos testes bancada de flotação de chumbo e zinco com a dosagem do reagente dispersante HMF Sódio foi o efeito do alto índice de dispersão dos todos os minerais e o minério testado na flotação.

Os testes de flotação de chumbo com o reagente dispersante HMF Sódio foram realizados com a dosagem variando de 250 g/t a 1.500 g/t, sendo realizada nas seguintes dosagens 250 g/t, 500 g/t, 750 g/t, 1.000 g/t e 1.500 g/t. Os testes na flotação de zinco com reagente dispersante HMF Sódio foram realizados com a dosagem variando de 100 g/t a 500 g/t, sendo espaçados de 100 em 100 g/t.

Tabela V.4 - Resultado dos testes de dispersão com o reagente dispersante HMF de sódio

DISPERSANTE	DOSAGEM	Dispersão (%)				
	(g/t)	Minério	Esfalerita	Galena	Pirita	Dolomita
HMF SÓDIO	500	35,89	46,44	40,01	11,50	38,84
	1.500	36,10	45,01	41,64	21,67	38,76
	3.000	36,58	45,26	41,43	23,83	38,81

5.1.8 - Planejamento dos testes de flotação de chumbo.

Na tabela V.5 encontra-se o planejamento dos testes de flotação de chumbo. Como esses testes foram planejados a partir de resultados dos experimentos de dispersão optou-se por apresentá-lo no capítulo de “resultados e discussões” e não no capítulo “metodologia”. Os testes de flotação de chumbo foram realizados em três condições para verificar a influência do dispersante e do carbonato de sódio na flotação. As condições de realização dos testes foram:

- pH 9,8 com adição de modificador de pH cal e carbonato de sódio;
- pH 9,8 com utilização de modificador de pH cal, para verificar a influência da retirada do reagente carbonato de sódio na flotação;
- pH natural onde não será dosado nenhum tipo de modificador de pH, para verificar a influência do pH na flotação.

Tabela V.5 - Planejamento dos testes de flotação de chumbo

Planejamento teste de flotação de Chumbo				
Flotação	Dispersante	Dosagem (g/t)	Condição pH	Carbonato de Sódio
Chumbo	Silicato de Sódio (Na ₂ SiO ₃)	1.000	9,8	Sim
		1.250		
		1.500		
		1.750		
		2.000		
	Silicato de Sódio (Na ₂ SiO ₃)	1.000	9,8	Não, modificador de pH somente Cal
		1.250		
		1.500		
		1.750		
		2.000		
	Silicato de Sódio (Na ₂ SiO ₃)	1.000	Natural	Não
		1.250		
		1.500		
		1.750		
		2.000		
Chumbo	3223	100	9,8	Sim
		200		
		300		
		400		
		500		
	3223	100	9,8	Não, modificador de pH somente Cal
		200		
		300		
		400		
		500		
	3223	100	Natural	Não
		200		
		300		
		400		
		500		
Chumbo	HMF Sódio	250	9,8	Sim
		500		
		750		
		1.000		
		1.500		
	HMF Sódio	250	9,8	Não, modificador de pH somente Cal
		500		
		750		
		1.000		
		1.500		
	HMF Sódio	250	Natural	Não
		500		
		750		
		1.000		
		1.500		

5.1.9 - Planejamento dos testes de flotação de zinco.

Na tabela V.6 encontra-se o planejamento dos testes de flotação de zinco. Os testes de flotação de zinco foram realizados em pH 10,5 com a utilização de modificador de pH cal.

Tabela V.6 - Planejamento dos testes de flotação de zinco

Planejamento teste de flotação de Zinco			
Flotação	Dispersante	Dosagem (g/t)	Condição pH
Zinco	Silicato + Sódio Meta	500	10,5
		750	
		1.000	
		1.250	
		1.500	
Zinco	3223	100	10,5
		200	
		300	
		400	
		500	
Zinco	HMF Sódio	100	10,5
		200	
		300	
		400	
		500	

5.2 - Resultado dos testes de flotação

5.2.1 - Testes de flotação de chumbo

5.2.1.1 - Flotação de chumbo com dispersante hexametáfosfato de sódio

Os testes com reagente dispersante hexametáfosfato de sódio na flotação de chumbo apresentaram aumento significativo na recuperação metalúrgica de chumbo conforme apresentado na figura 5.12.

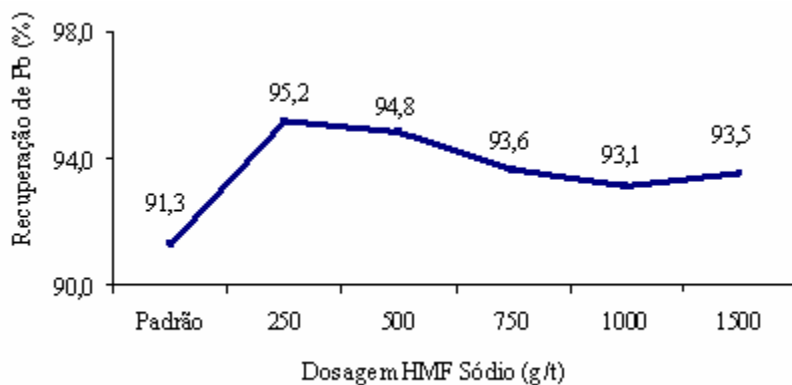


Figura 5.12 - Gráfico da recuperação de chumbo em função da dosagem de HMF Sódio.

Houve redução gradual no teor de chumbo do concentrado final nos testes utilizando dispersante em relação ao teste padrão, figura 13, devido ao aumento da perda de zinco no circuito de chumbo, visto que, na medida em que aumenta a dosagem do reagente dispersante há forte aumento da perda de zinco na flotação de chumbo conforme figura 5.14. Este reagente pode estar ativando a esfalerita fazendo com que a mesma seja flotada no circuito de chumbo, mesmo sem a utilização do ativador padrão sulfato de cobre.

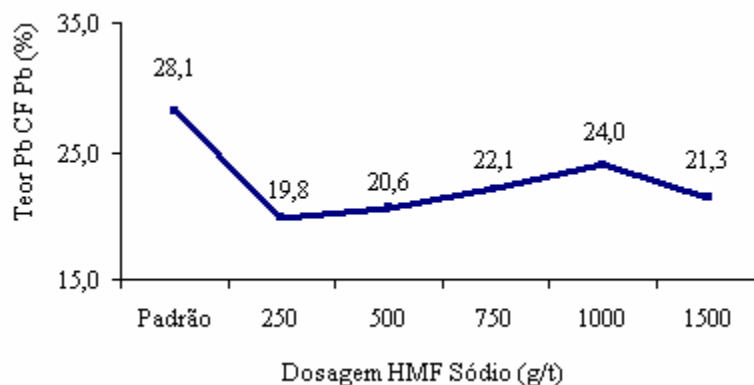


Figura 5.13 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante hexametáfosfato de sódio.

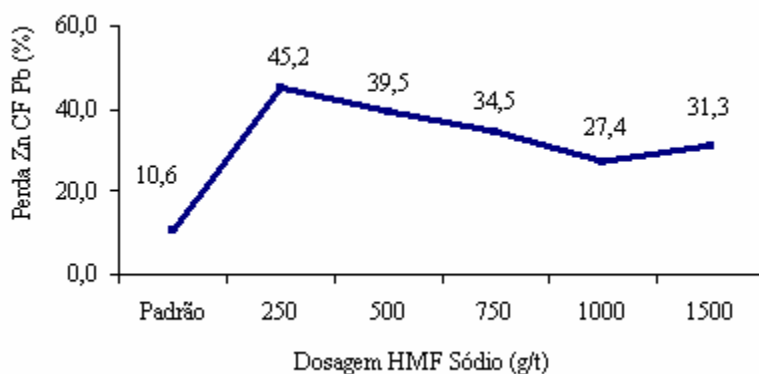


Figura 5.14 - Gráfico da perda de zinco no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante hexametáfosfato de sódio.

Mesmo conseguindo aumento de recuperação de chumbo na flotação, a perda de zinco no concentrado de chumbo foi muito elevada, portanto, na análise global, incluindo a flotação de chumbo e a flotação de zinco, a utilização do reagente dispersante na flotação de chumbo não foi favorável.

Os testes realizados com o dispersante hexametáfosfato de sódio, nas três condições de pH, apresentaram as mesmas tendências com relação ao aumento da recuperação de chumbo, redução do teor de concentrado de chumbo, e aumento da perda de zinco no concentrado de chumbo.

5.2.1.2 - Flotação de chumbo com dispersante silicato de sódio

Na realização do teste utilizando reagente dispersante silicato de sódio não foi possível verificar a influência do pH e do não uso do carbonato de sódio na flotação de chumbo, pois o mesmo já modifica o pH da flotação para próximo a 9,8, que é o pH padrão de flotação para o circuito de chumbo.

Os testes com reagente dispersante silicato de sódio na flotação de chumbo apresentaram redução na recuperação metalúrgica de chumbo na medida em que aumenta a sua dosagem, sendo que em todos os testes o resultado de recuperação de chumbo ficou abaixo da recuperação do teste utilizado como padrão como pode ser visualizado na figura 5.15.

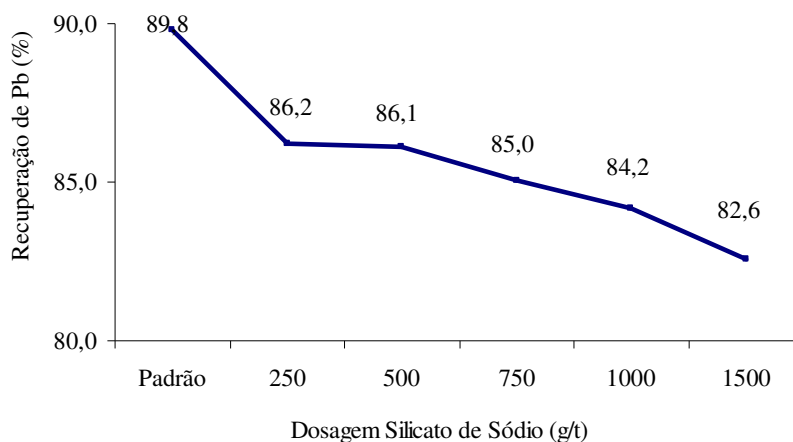


Figura 5.15 - Gráfico da recuperação de chumbo em função da dosagem de silicato de sódio.

Não houve alteração significativa no teor de chumbo do concentrado final nos testes utilizando dispersante em relação ao teste padrão, conforme figura 5.16.

A perda de zinco na flotação de chumbo aumenta substancialmente com o aumento da dosagem do silicato de sódio na flotação, figura 5.17, interferindo negativamente na

recuperação de zinco, fato este que pode ser explicado pela ativação da esfalerita pelo dispersante na flotação de chumbo, mesmo sem a utilização do ativador padrão sulfato de cobre.

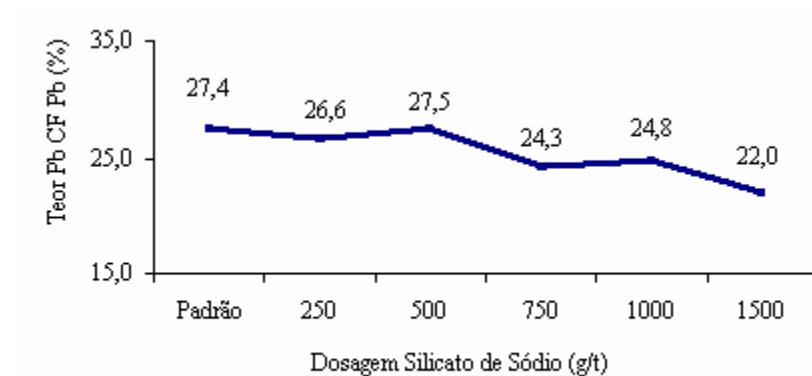


Figura 5.16 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante silicato de sódio.

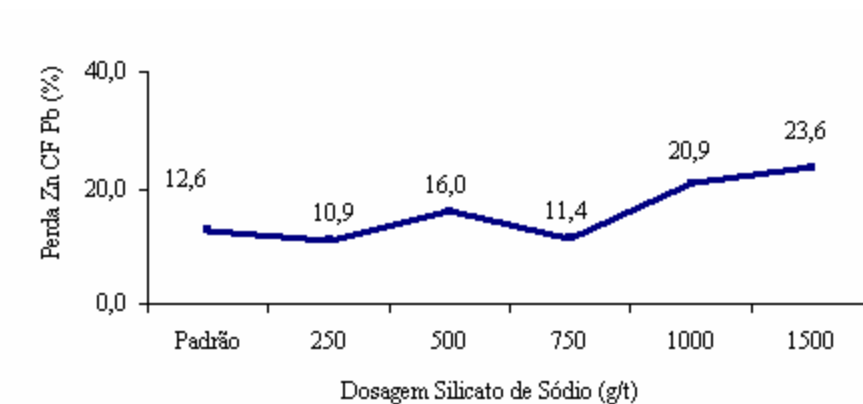


Figura 5.17 - Gráfico da perda de zinco no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante silicato de sódio.

5.2.1.3 - Flotação de chumbo com dispersante 3223

Os testes com reagente dispersante 3223 na flotação de chumbo apresentaram estabilidade na recuperação metalúrgica de chumbo, conforme figura 5.18.

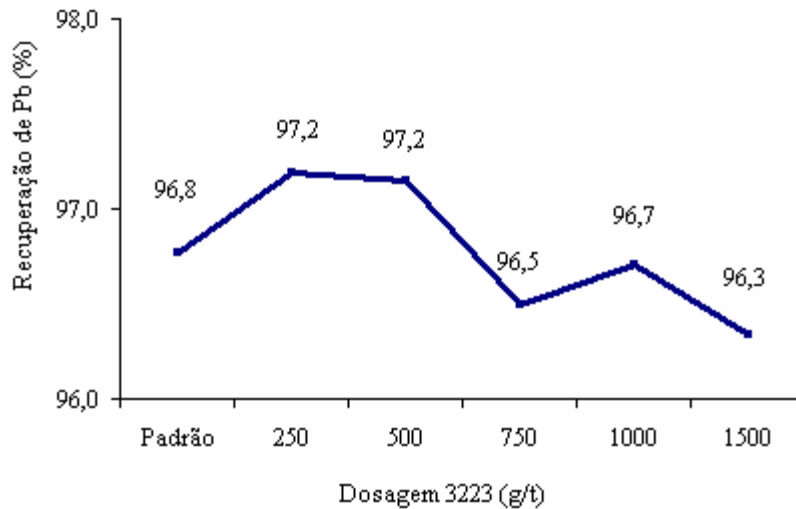


Figura 5.18 - Gráfico da recuperação de chumbo em função da dosagem de dispersante 3223.

Houve redução significativa no teor de chumbo do concentrado final nos testes utilizando dispersante em relação ao teste padrão, figura 5.19, devido ao aumento da perda de zinco no circuito de chumbo, visto que, na medida que aumenta a dosagem do reagente dispersante há forte aumento da perda de zinco na flotação de chumbo visualizado na figura 5.20. Este reagente pode estar ativando a esfalerita fazendo com que a mesma seja flotada no circuito de chumbo, mesmo sem a utilização do ativador padrão sulfato de cobre.

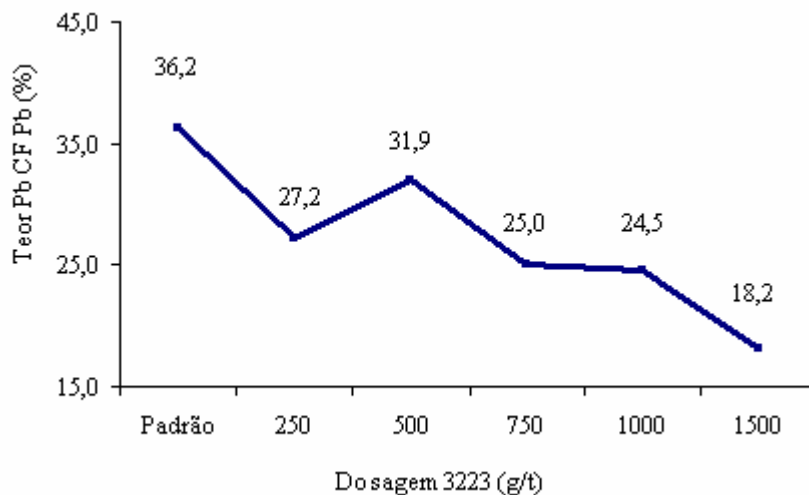


Figura 5.19 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante 3223.

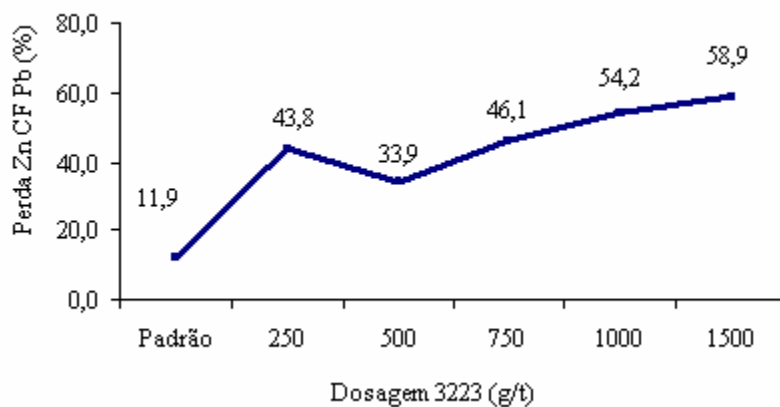


Figura 5.20 - Gráfico da perda de zinco no concentrado final de chumbo em função da dosagem de dispersante 3223.

Como não houve aumento de recuperação de chumbo na flotação, o teor de Pb no concentrado final de chumbo reduziu com o aumento de dosagem do dispersante e

aumentou a perda de zinco na flotação de chumbo. A utilização do dispersante não beneficiou a flotação.

Os testes realizados com o dispersante 3223 nas três condições de pH apresentaram as mesmas tendências com relação à manutenção da recuperação de chumbo, redução do teor de concentrado de chumbo e aumento da perda de zinco no concentrado de chumbo.

5.2.2 - Testes de flotação de zinco

5.2.2.1 - Flotação de zinco com a mistura de reagentes dispersantes silicato de sódio + meta silicato de sódio

Os testes utilizando a mistura de reagentes dispersantes silicato de sódio + meta silicato de sódio apresentaram estabilidade de resultados em relação ao teste padrão para a recuperação de zinco, figura 5.21, e também para o teor de zinco no concentrado, visualizado na figura 5.22, e também para o teor de chumbo no concentrado de zinco, conforme figura 5.23.

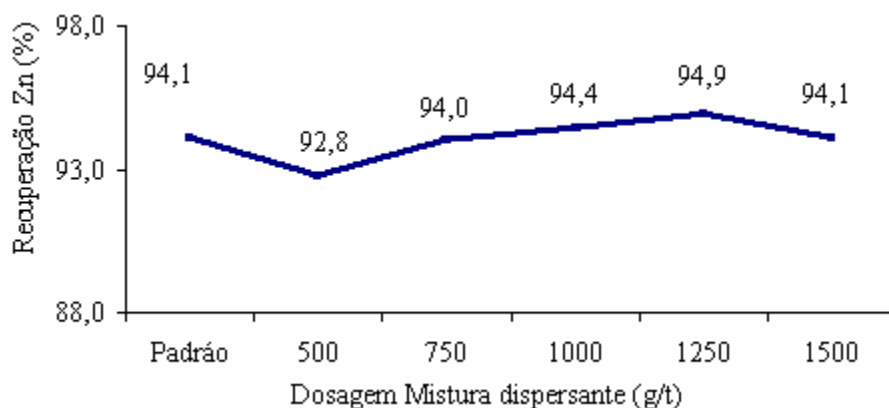


Figura 5.21 - Gráfico da recuperação de zinco em função da dosagem da mistura de dispersantes (g/t).

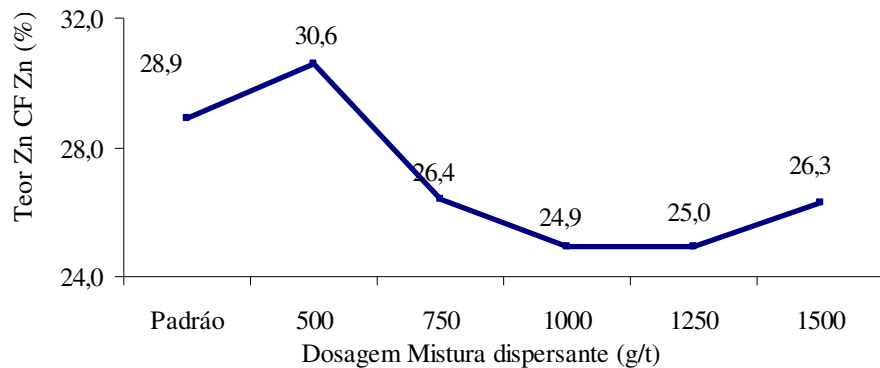


Figura 5.22 - Gráfico do teor de zinco no concentrado em função da dosagem da mistura de dispersantes (g/t).

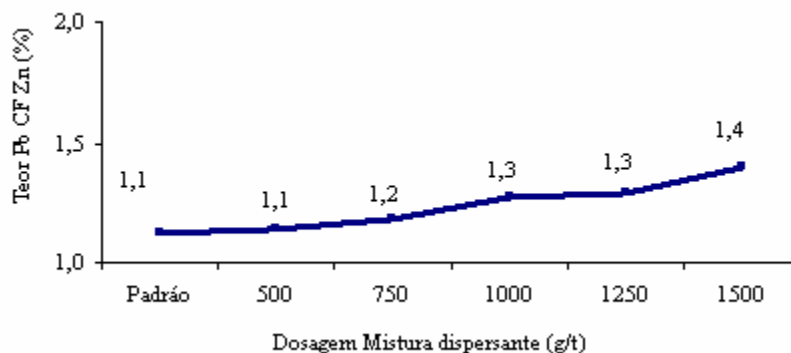


Figura 5.23 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado de zinco em função da dosagem da mistura de dispersantes.

Fato relevante que pode ser observado foi o aumento do teor de ferro no concentrado de zinco com o aumento de dosagem da mistura de dispersantes, atingindo valores maiores que aqueles obtidos no teste padrão, conforme figura 5.24.

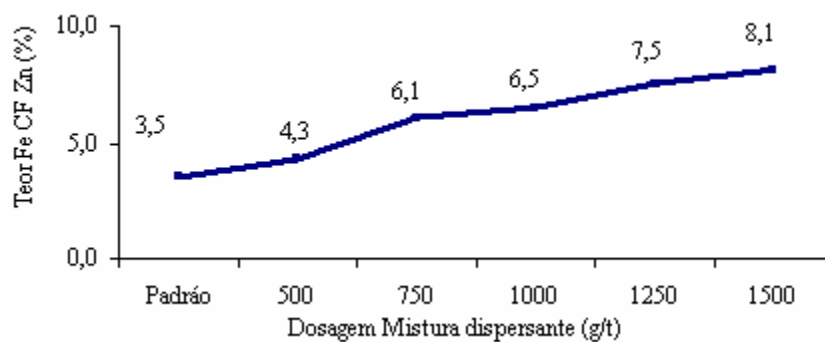


Figura 5.24 - Gráfico do teor de ferro no concentrado de zinco em função da dosagem da mistura de reagentes dispersantes.

5.2.2.2 - Flotação de zinco com o reagente dispersante hexametáfosfato de sódio

Os testes utilizando o reagente dispersante hexametáfosfato de sódio apresentaram forte aumento na recuperação de zinco para todas as dosagens do dispersante chegando a um aumento de 7 pontos percentuais, visualizado na figura 5.25. Houve uma pequena oscilação nos teores de zinco no concentrado de zinco, conforme figura 5.26, porém obteve-se uma estabilidade nos teores de chumbo, figura 5.27, e estabilidade nos teores de ferro no concentrado, conforme figura 5.28.

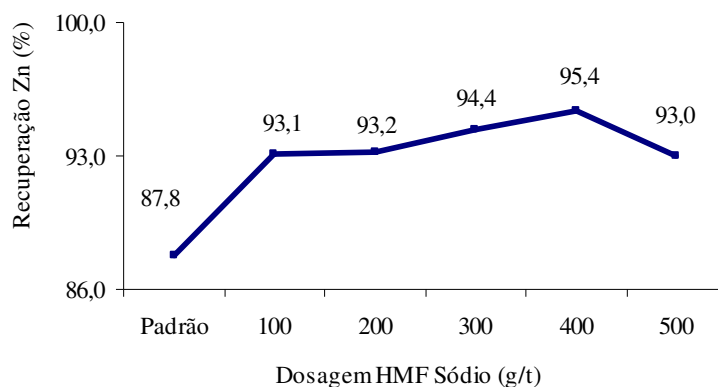


Figura 5.25 - Gráfico da recuperação de zinco em função da dosagem de hexametáfosfato de sódio (g/t).

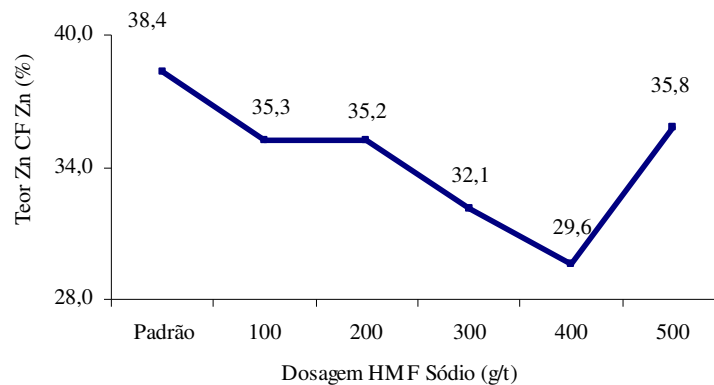


Figura 5.26 - Gráfico de teor de zinco no concentrado em função da dosagem de hexametáfosfato de sódio (g/t).

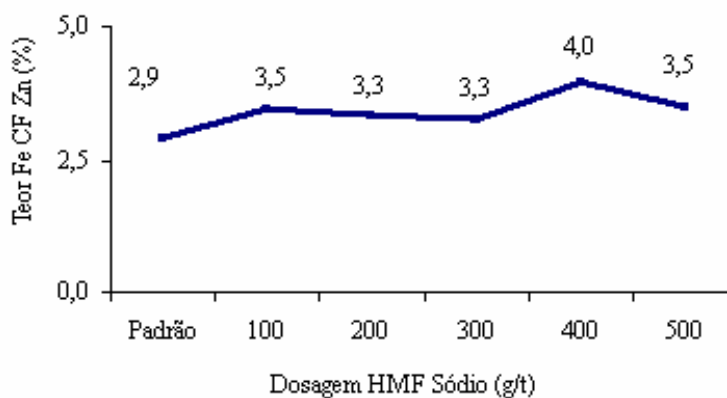


Figura 5.27 - Gráfico do teor de ferro no concentrado de zinco em função da dosagem de hexametáfosfato de sódio.

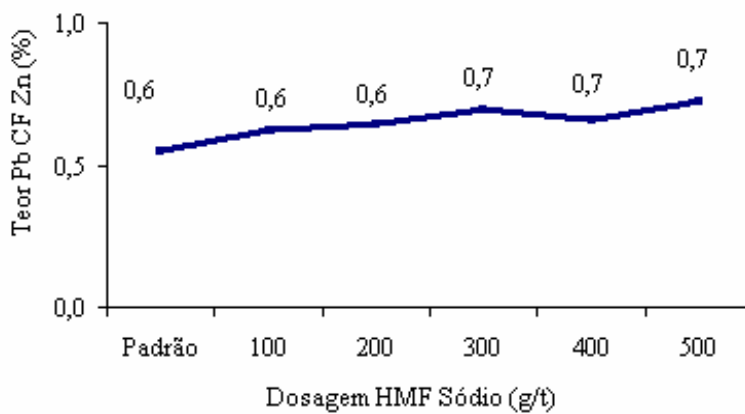


Figura 5.28 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado de zinco em função da dosagem de hexametáfosfato de sódio.

5.2.2.3 - Flotação de zinco com o reagente dispersante 3223

Os testes utilizando o reagente dispersante 3223 apresentaram aumento na recuperação de zinco acima de 3 pontos percentuais para todas as dosagens do dispersante, conforme figura 5.29, além de apresentar uma estabilidade nos teores de zinco, figura 5.30, apresenta estabilidade no teor de chumbo, figura 5.31, e estabilidade no teor de ferro no concentrado de zinco, conforme figura 5.32.

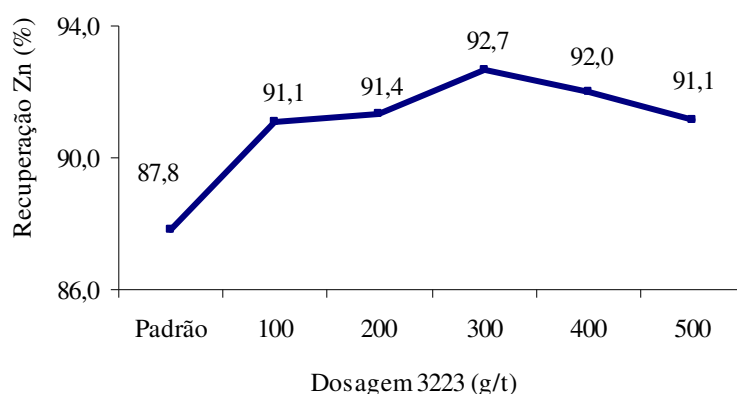


Figura 5.29 - Gráfico da recuperação de zinco em função dosagem dispersante 3223 (g/t).

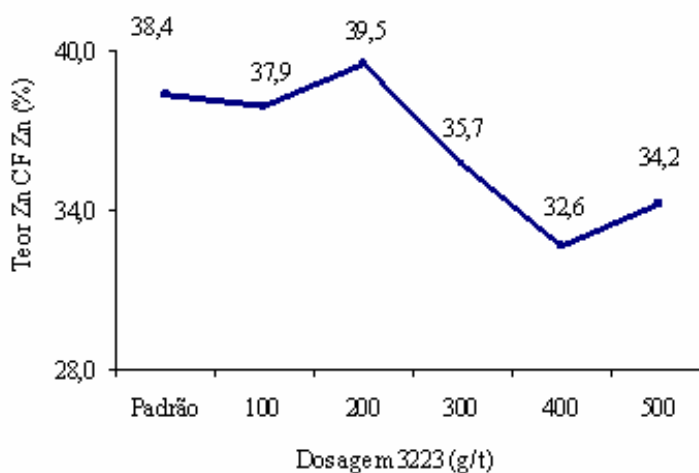


Figura 5.30 - Gráfico do teor de zinco no concentrado em função da dosagem do dispersante 3223.

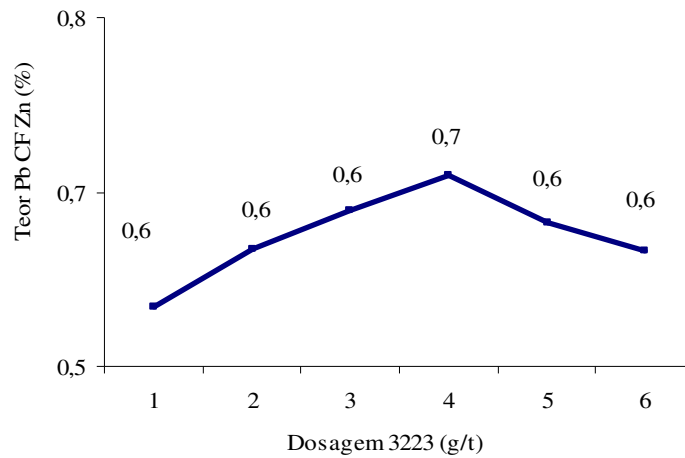


Figura 5.31 - Gráfico do teor de chumbo no concentrado em função da dosagem do dispersante 3223.

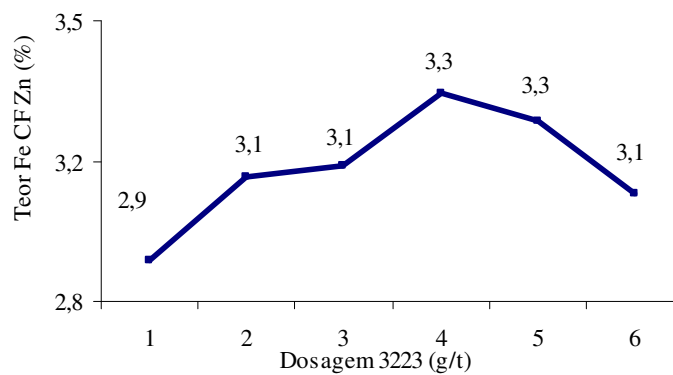


Figura 5.32 - Gráfico do teor de ferro no concentrado em função da dosagem do dispersante 3223.

CAPITULO 6 - CONCLUSÕES

1. O reagente dispersante 3223, com substância ativa poliacrilato de sódio, na dosagem de 500 g/t ROM, apresentou alto índice de dispersão para os minerais-minério (galena e esfalerita) e apresentou baixo índice de dispersão para o mineral contaminante pirita.
2. O reagente dispersante hexametáfosfato de sódio nas dosagens de 500, 1.500 e 3.000 g/t ROM apresentou bom índice de dispersão para todos os minerais e minério estudo.
3. Os reagentes NaOH (hidróxido de sódio) e Na₂CO₃ (carbonato de sódio) nas dosagens de 500, 1.500 e 3.000 g/t ROM apresentaram um baixo índice de dispersão para o minério e os minerais estudados, não podendo ser considerado dispersante para as amostras estudadas.
4. Para os reagentes dispersantes estudados, a esfalerita foi o mineral que apresentou o maior índice de dispersão médio tendo a pirita apresentado o menor índice de dispersão médio.
5. A utilização de reagentes dispersantes na flotação de chumbo não contribuiu para melhoria de eficiência do circuito total pois, apesar de melhorar a recuperação metalúrgica de chumbo, intensifica significativamente as perdas de zinco no concentrado de chumbo, não sendo recomendada a utilização dos mesmos.
6. O reagente carbonato de sódio não modificou os resultados na flotação de chumbo quando comparados com os resultados da flotação em pH natural e pH 9,8 modificado somente com cal, sendo recomendada a sua retirada da flotação de chumbo.

7. A utilização do reagente dispersante 3223, com substância ativa poliacrilato de sódio e a do reagente dispersante hexametáfosfato de sódio na flotação de zinco contribuiu para o aumento significativo de recuperação de zinco sem prejudicar a qualidade do concentrado produzido.

CAPITULO 7 - SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Visando à confirmação dos resultados obtidos em escala de bancada recomenda-se:

- i. realização de testes piloto de flotação de chumbo em pH natural;
- ii. realização de testes piloto de flotação de zinco utilizando os reagentes dispersantes 3223 e o hexametáfosfato de sódio;
- iii. realização de ensaios de bancada combinando silicato de sódio e hexametáfosfato de sódio.

CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANDINI, P., PRESTIDGE, C.A., RALSTON, J. (2001) Colloidal iron oxide slime coatings and galena particle flotation. *Minerals Engineering*, V. 14, No. 5, p. 487-497.

BARBUCCI, R., MARABINI, A.M, BARBARO, M, NOCENTINI, M., COREZZI, S. (1984) Mechanism of action of new functionalized polymers in flocculation and dispersion of chalcosite. In: *Reagents in the Mineral Industry*. Jones, M.J. & Oblatt, R. Ed., London: The Institution of Mining and Metallurgy, p. 245-250.

BOULTON, A., FORNASIERO, D., RALSTON, J. (2001a) Selective depression of pyrite with polyacrylamide polymers. *International Journal of Mineral Processing*, V. 61, p. 13-22.

BOULTON, A., FORNASIERO, D., RALSTON, J. (2001b) Depression of iron sulphide flotation in zinc roughers. *Minerals Engineering*, V. 14, No. 9, p. 1067-1079.

BORGES, A.A.M. (1993) Influência do estado de dispersão na flotabilidade de minério oxidado de zinco. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 189 p.

BULATOVIC, S.M. (1999) Use of organic polymers in flotation of polymetallic ores. *Minerals Engineering*, V. 12, No. 4, p. 341-354.

CARVALHO, M.R, (2003) Interferência de cátions Ca^{2+} nas etapas de deslamagem e flotação de minério de ferro. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto. 57 p.

CASTRO, E.B. (2002) Influência de finos na flotação de minério de ferro: efeitos da granulometria e da mineralogia. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 170 p.

CHANGGEN, L., YONGXIN, L. (1983) Selective flotation of scheelite from calcium minerals with sodium oleate as a collector and phosphates as modifiers, II The mechanism of the interaction between phosphate modifiers and minerals. *International Journal of Mineral Processing*, V. 10, p. 219-235.

CHURAEV, N.V., DERJAGUIN, B.V. (1985) Inclusion of structural forces in the theory of stability of colloids and films. *Journal of Colloid and Interface Science*, V. 103, p. 542-553.

CLEMMER, J.B. (1947) Flotation of iron ore. 8th Ann. Min. Symposium. January.

DAY, A. (2002) *Mining Chemicals HANDBOOK*. Cytec Industries Inc., p. 240 - 241.

DUDENKOV, C.V., SHUBOV, L.I. (1969) Application of flotation reagents, Theory and Practice. Nedra, Moscow, p. 109-135; apud BULATOVIC, S.M. (1999) Use of organic polymers in flotation of polymetallic ores. Minerals Engineering, V. 12, No. 4, p. 341-354.

FULIANG, W., FENGLUO, L. (1997) Study on influence of calcium and magnesium ions on floatability of galena. Mining and Metallurgy, V. 6, No. 4, p. 30-37.

FURTADO, J.R.V. (1985) Recuperação de finos do minério fósforo-uranífero de Itataia-CE. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 123 p.

GALÉRY, R. (1985) Influência do estado de dispersão na flutuabilidade do sistema willemita/dolomita. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 92 p.

GORLOVSKI, C.I. (1956) High molecular weight organic compounds as depressants. Obogaschenie Rud, No. 6, p. 25-32; apud BULATOVIC, S.M. (1999) Use of organic polymers in flotation of polymetallic ores. Minerals Engineering, V. 12, No. 4, p. 341-354.

ISRAELACHVILI, J. (1991) J. Intermolecular and Surface Forces. 2nd Ed. Chapter 13.

KEISCH, B., FELLER, R.L., LEVINE, A. S., EDWARDS, R.R. (1967) Dating and Authenticating Works of Art by Measurement of Natural Alpha Emitters. In: Science, 155, No. 3767, p. 1238-1242.

KEISCH, B. (1968) Dating Works of Art Through their Natural Radioactivity: Improvements and Applications. In: Science, 160, p. 413-415.

KEISCH, B. (1968) Discriminating Radioactivity Measurements of Lead: New Tool for Authentication. In: Curator, 11, No. 1., p. 41-52.

LANGE, A.G., SKINNER, W.M., SMART, R.St.C. (1997) Fine: coarse particle interactions and aggregation in sphalerite flotation. Minerals Engineering, V. 10, No. 7, p. 681-693.

LASKOWSKI, J.S. (1992) An introduction: physicochemical methods of separation. In: Colloid Chemistry in Mineral Processing. Laskowski, J.S. & Ralston, J. Ed., Amsterdam: Elsevier. Chapter 7.

van LIERDE, A. (1967) Amélioration de flotation des minerais oxides de cuivre, plomb et zinc à gangue calcaire ou dolomitique à l'aide de polymères d'acide acrylique. Thèse Docteur em Sciences Appliquées, Université Catholique de Louvain. 97 p.

LIMA, N.P. (2001) Comportamento de minérios itabiríticos dos complexos Alegria e Fábrica Nova frente aos processos de deslamagem e flotação. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 126 p.

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

LIU, Q., ZHANG, Y. (2000) Effect of calcium ions and citric acid on the flotation separation of chalcopyrite from galena using dextrin. *Minerals Engineering*, V. 13, No. 13, p. 1405-1416.

LUZ, J.A.M. (1988) Efeito do estado de agregação na separação entre calcita, dolomita e apatita por flotação. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 189 p.

MARCIANO NETO, A. (1989) Influência dos silicatos de sódio e de potássio na flutuabilidade do sistema apatita/quartzo. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 167 p.

MONTANER Y SIMÓN (1898) EDITORES *Diccionario Enciclopédico Hispano-Americano*, Tomo XXIII, Barcelona.

NEVES, C.A.R., (2006), *Sumário Mineral*, Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, p. 118 - 119.

PARSONAGE, P., MELVEN, D., HEALY, A.F., WATSON, D. (1984) Depressant function in flotation of calcite, apatite and dolomite. In: *Reagents in the Mineral Industry*. Jones, M.J. & Oblatt, R. Ed., London: The Institution of Mining and Metallurgy, p. 33-45.

PAZHIANUR, R., YOON, R-H. (2003) Model for the origin of hydrophobic force. *Minerals & Metallurgical Processing*, v. 20, n. 4. p. 178-184.

PEREIRA, C.A. (2004) Estudo da dispersão e concentração de minério calamínico. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 160 p.

PEREIRA, C.E (1984) Estudo da seletividade na flotação de um minério sulfetado de cobre de ganga silicatada. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 141 p.

PUGH, R.J. (1989) Macromolecular organic depressants in sulphide flotation – a review, 1. Principles, types and application. *International Journal of Mineral Processing*. V. 25. p. 101-130.

QUEIROZ, L.A. (2003) Emprego da atrição na deslamagem: efeitos na flotação reversa de minérios itabiríticos. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 169 p.

RABELO, P.J.B. (1994) Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 266 p.

RASHCHI, F., FINCH, J.A. (2000) Polyphosphates: a review. Their chemistry and application with particular reference to mineral processing. *Minerals Engineering*, V. 13, No. 10-11, p. 1019-1035.

SALUM, M.J.G. (1983) Estudo da flotação dos minerais silicatados de zinco com amina em sistema sulfetizado. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 89 p.

SILVA, B.C.E. (2006), Sumário Mineral, Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, p. 35 – 36.

SILVA, G.M.A. (1994) Estudos sobre o estado de agregação de um minério de ferro. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 145 p.

WAKAMATSU, T., NUMATA, Y., SUGIMOTO, Y. (1979) The effect of amino acid additions on the flotation of sulphide ore. In: Fuerstenau, D.W. *Developments in Mineral Processing XIII IMPC*, Warsaw, V. 2, p. 159-179.

WIGHTMAN, E.M, GRANO, S.R., RALSTON, J. (2000) Selectivity in the polymer assisted separation of galena from quartz by flotation. *Minerals Engineering*, V. 13, No. 8-9, p. 843-956.

VERGOUW, J.M, DIFEO, A., XU, Z., FINCH, J.A. (1998) An agglomeration study of sulphide minerals using zeta-potential and settling rate. Part I: pyrite and galena. *Minerals Engineering*, V. 11, No. 2, p. 159-169.

VIANA, P.R.M. (1981) Estudo da interação entre a dolomita e reagentes de flotação. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 81 p.

YOON, R-H. (1991) Hydrodynamic and surface forces in bubble-particle interactions. In: *International Mineral Processing Congress XVII*. Dresden. Proceedings, v. II. p. 17-31.