

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de mestrado

Utilização de poliacrilamidas de alto
peso molecular na flotação catiônica
reversa de minério de ferro

Autor: Henrique Dias Gatti Turrer
Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres

Setembro/2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Henrique Dias Gatti Turrer

UTILIZAÇÃO DE POLIACRILAMIDAS DE ALTO
PESO MOLECULAR NA FLOTAÇÃO CATIONICA
REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO

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: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2004

À memória de meus avôs
Ruy Franco de Oliveira e
José Dias

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram na condução e execução desse estudo e, em especial:

Antônio Eduardo Clark Peres, pela orientação, compreensão e incentivo.

Armando Corrêa de Araujo e Joaquim Donizetti Donda pelas sugestões.

Paulo Roberto Gomes Brandão e George Eduardo Sales Valadão pelos ensinamentos.

Ari Dias Turrer, pelo apoio, sugestões e incentivo.

Guilherme Gomides Ferreira e Paulo Vinícius Souza da Conceição, pela ajuda.

Isabel de Sousa Batista Carvalho e Ilda de Sousa Batista, pela prontidão em me auxiliar.

À Samarco Mineração S/A, pelas análises químicas e fornecimento de reagentes, sobretudo Maury de Souza Junior e Alessandra Prata Mangabeira.

À Minerações Brasileiras Reunidas S/A, pelo fornecimento das amostras de minério, especialmente Eliezer Antônio Felipe e Eunírio Zanetti Fernandes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO -----	1
2. OBJETIVOS -----	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	4
3.1. Minério de ferro -----	4
3.1.1. Mineralogia -----	4
3.1.2. Classificação dos depósitos e minérios -----	6
3.1.3. Reserva e produção brasileira -----	7
3.2. Concentração de minérios de ferro por flotação -----	8
3.2.1. Reagentes -----	9
3.2.1.1. Depressor -----	9
3.2.1.2. Coletor e espumante -----	11
3.2.2. Aspectos gerais -----	11
3.2.2.1. Contaminação do concentrado -----	11
3.2.2.2. Problemas na recuperação do elemento útil -----	12
3.3. Floculação seletiva de minérios de ferro -----	17
3.3.1. Reagentes -----	17
3.3.1.1. Dispersante -----	17
3.3.1.2. Floculante -----	18
3.3.1.2.1. Floculante natural -----	18
3.3.1.2.2. Floculante sintético -----	18
3.3.2. Aspectos gerais -----	22
3.4. Flotação de agregados -----	23
4. METODOLOGIA -----	28
4.1. Composição e preparação das amostras -----	28
4.2. Análises granulométricas -----	29
4.3. Análises químicas -----	30
4.4. Análises mineralógicas -----	30
4.5. Testes de flotação -----	31
4.6. Testes de sedimentação -----	32

4.7. Medidas de adsorção-----	33
4.8. Planejamento de experimentos -----	34
5. METODOLOGIA -----	35
5.1. Características granulométricas das amostras -----	35
5.2. Análises mineralógicas -----	41
5.3. Testes de flotação -----	42
5.4. Testes de sedimentação -----	48
5.5. Medidas de adsorção-----	53
4.8. Planejamento e análise dos experimentos -----	57
6. CONCLUSÕES -----	65
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS -----	67
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	68

LISTA DE FIGURAS

3.1. Estrutura da molécula de amilose (LEJA, 1982) -----	9
3.2. Estrutura da molécula de amilopectina (LEJA, 1982) -----	9
3.3. Aumento da área superficial devido à diminuição do tamanho da partícula -----	13
3.4. Diagrama esquemático mostrando a relação entre as propriedades físicas e químicas de partículas finas e seu comportamento na flotação. As setas indicam os vários fatores que contribuem para um fenômeno particular observado na flotação de partículas finas (FUERSTENAU, 1980) -----	14
3.5. Flotabilidade do Fe_2O_3 em diferentes dosagens de amina, na flotação reversa de minério de ferro em coluna piloto (MONTENEGRO, 2001) -----	15
3.6. Curvas hipotéticas de recuperação por tamanho de partícula para testes de flotação – adaptado de TRAHAR (1981) -----	16
3.7. Estrutura da molécula de poliacrilamidas (MOODY, 1992) -----	19
3.8. Resultados de floculação para amostras com diferentes granulometrias (RAVISHANKAR et al, 1994) -----	21
3.9. Representação esquemática da adsorção de dois surfatantes com diferentes pesos moleculares (LEJA, 1982) -----	25
3.10. Principais mecanismos responsáveis pelo transporte do floco no processo de flotação (NEIS & KIEFHABER, 1980) -----	26
3.11. Recuperação na floculação de sílica com ácido poliacrílico em função do pH na presença de diferentes cátions (DRZYMALA & FUERSTENAU, 1981) -----	27
4.1. Fluxograma de preparação das amostras -----	29
4.2. Fluxograma geral para análises granulométricas -----	31
5.1. Análise granulométrica da hematita -----	38
5.2. Análise granulométrica do itabirito -----	38

5.3. Análise granulométrica da amostra de hematita -----	40
5.4. Análise granulométrica da amostra de itabirito -----	41
5.5. Mineralogia das amostras utilizadas nos ensaios -----	42
5.6. Recuperação em função da dosagem de floculante a 1500rpm -----	43
5.7. Influência da velocidade de rotação no condicionamento e na flotação, com uso de amido e poliacrilamida catiônica -----	44
5.8. Influência da velocidade de rotação no condicionamento e na flotação, somente com o uso de amido -----	44
5.9. Recuperação em função da dosagem de floculante com condicionamento a 1000rpm e flotação a 1500rpm -----	45
5.10. Recuperação em função da dosagem de floculante com condicionamento a 1250rpm e flotação a 1500rpm -----	45
5.11. Influência da ordem de adição do reagente -----	46
5.12. Cinética de flotação em função da dosagem de floculante a 1500rpm -----	47
5.13. Cinética de flotação em função da dosagem de floculante com condicionamento à 1000rpm e flotação a 1500rpm -----	47
5.14. Cinética de flotação em função da dosagem de floculante com condicionamento à 1250rpm e flotação a 1500rpm -----	48
5.15. Testes de sedimentação com hematita -----	49
5.16. Testes de sedimentação com itabirito -----	50
5.17. Testes de sedimentação com hematita e 2g/t de poliacrilamida catiônica ou 450g/t de amido -----	51
5.18. Testes de sedimentação com amido -----	52

5.19. Testes de sedimentação com amido (da esquerda para direita: teste padrão, teste com ajuste de pH da polpa após adição de amido e teste com ajuste de pH da solução de amido) -----	52
5.20. Altura dos pontos de compressão -----	53
5.21. Espectros de transmissão no infravermelho das poliacrilamidas catiônica, não-iônica e aniônica -----	54
5.22. Espectros de transmissão no infravermelho da hematita pura, condicionada com amido e do amido -----	55
5.23. Espectros de transmissão no infravermelho da hematita pura, condicionada com poliacrilamida catiônica e amido e do amido -----	55
5.24. Espectros de transmissão no infravermelho da hematita pura, condicionada com poliacrilamida não-iônica e amido e do amido -----	56
5.25. Espectros de transmissão no infravermelho da hematita pura, condicionada com poliacrilamida aniônica e amido e do amido -----	56
5.26. Espectros de transmissão no infravermelho da hematita condicionada com poliacrilamida catiônica, não-iônica e aniônica -----	57
5.27. Gráfico de pareto dos efeitos do experimento com poliacrilamida catiônica para a recuperação metalúrgica -----	59
5.28. Gráfico dos efeitos do experimento com poliacrilamida catiônica para a recuperação metalúrgica -----	59

LISTA DE TABELAS

3.1. Propriedades de alguns minerais portadores de ferro (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997) -----	5
3.2. Tipos de depósitos de ferro e suas principais características (KLEMIC et al, 1973) -----	6
5.1. Análise granulométrica da hematita -----	36
5.2. Análise granulométrica do itabirito -----	37
5.3. Análise química da amostra de hematita por faixa de tamanho -----	39
5.4. Análise química acumulada da amostra de hematita por faixa de tamanho -----	39
5.5. Análise química da amostra de itabirito por faixa de tamanho -----	39
5.6. Análise química acumulada da amostra de itabirito por faixa de tamanho -----	40
5.7. Experimento com poliacrilamida catiônica -----	59
5.8. Experimento com poliacrilamida não-iônica -----	59
5.9. Experimento com poliacrilamida aniônica -----	60
5.10. Experimento sem poliacrilamida -----	60
5.11. Análise do experimento com poliacrilamida catiônica -----	61
5.12. Análise do experimento com poliacrilamida não-iônica -----	62
5.13. Análise do experimento com poliacrilamida aniônica -----	62
5.14. Análise do experimento sem poliacrilamida -----	63

RESUMO

A flotação é um importante processo de concentração de minérios de ferro. Um dos grandes problemas encontrados nas instalações que o utilizam é a baixa recuperação metalúrgica associada principalmente à fração de menor granulometria.

Neste trabalho, investigou-se a utilização de floculantes sintéticos na flotação catiônica reversa de minérios de ferro. Os floculantes utilizados foram poliacrilamidas de alto peso molecular e diferentes graus iônicos.

Foram feitos testes de flotação em bancada com o intuito de comparar o desempenho da flotação com e sem adição de poliacrilamidas. Testes de sedimentação permitiram concluir que os flocos formados por baixas dosagens de poliacrilamidas são semelhantes aos formados pela solução de amido. Verificou-se, ainda, que as poliacrilamidas não impedem a adsorção do amido.

Foi constatado que poliacrilamidas catiônicas e não-iônicas causam um aumento significativo na recuperação metalúrgica do processo. Por sua vez, as aniônicas não ocasionaram melhora na performance da flotação. Esse aumento na recuperação metalúrgica foi acompanhado de uma pequena piora na qualidade do concentrado.

A flotação na presença de poliacrilamidas foi muito influenciada pelas condições hidrodinâmicas da polpa, como agitação e porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e na flotação.

ABSTRACT

Flotation is an important iron ores concentration process. A major problem occurring in the concentrators is the low metallurgical recovery associated mainly with the fine size fraction.

In this work, the utilization of synthetic flocculant utilization in the iron ore cationic reverse flotation was investigated. The flocculants used were high molecular weight polyacrylamides of different ionic grades.

Flotation tests were performed to compare the results in the presence and absence of polyacrylamide. Sedimentation tests allowed to conclude that flocs formed by low polyacrylamides dosages are similar to those formed by starch solution. Further, it was verified that polyacrylamides do not prevent starch adsorption.

It was observed that cationic and non ionic polyacrylamides cause a significant raise in the process metallurgical recovery. On the other hand, the anionic polyacrylamides did not improve the flotation performance. This metallurgical recovery increase was accompanied by a slight decrease in the quality of the concentrate.

The flotation in the presence of polyacrylamides was strongly influenced by the pulp hydrodynamic conditions, such as speed and weight percent solids in the conditioning and flotation stages.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O minério de ferro possui grande importância na economia mundial, pois é o principal insumo para a indústria siderúrgica. Devido aos grandes volumes exportados e consumidos pelo mercado nacional, ocupa posição de destaque no cenário da mineração brasileira. A produção brasileira de minério de ferro em 2002 foi de 210 milhões de toneladas (KIRK, 2002). Em 2001, as exportações brasileiras de minério de ferro e pelotas atingiram um total de US\$ 2.930 milhões (QUARESMA, 2001).

O crescente consumo de minério de ferro, nos últimos anos, obriga os produtores a aumentar suas produções e buscar novas reservas. O aumento de produção não deve impactar negativamente a qualidade do produto. Em muitos casos o aumento da capacidade da planta não implica na instalação de novos equipamentos e sim numa otimização do processo. O aumento das reservas faz com que a alimentação de uma usina de concentração seja blendada por materiais mais complexos e mais pobres, conseqüentemente mais difíceis de se tratar. Para tornar a tarefa do tratamentista ainda mais desafiadora, cada dia as exigências de qualidade dos consumidores de concentrados de minérios de ferro estão mais rígidas.

A recuperação metalúrgica de um processo de concentração é um parâmetro de extrema importância. Deve-se sempre procurar maximizá-lo, objetivando-se aumentar a produção de carga metálica por unidade de minério alimentado, tal que seja traduzida em maior margem de lucro. Contudo, isso deve ser feito com o devido planejamento para que não haja perda de qualidade do produto final. Outra importante conseqüência do aumento da recuperação metalúrgica é a diminuição do volume de material descartado como rejeito. O rejeito é descartado em bacias que possuem elevado custo de capital e operacional. Essas bacias, normalmente, possuem vida útil de muitos anos, logo, reduções na produção de rejeito são altamente significativas a longo prazo.

O desempenho do agente depressor dos minerais de ferro é o principal regulador da recuperação metalúrgica na flotação reversa de minérios de ferro. Na maioria dos concentradores de minério de ferro, o amido é utilizado como depressor. Suspeita-se que a intensidade de adsorção do amido em partículas minerais finas seja menor do

que em partículas minerais grossas. Esse fato contribuiria, então, para a perda de partículas de minerais de ferro no flotado, tendo como consequência indesejável diminuição tanto da recuperação metalúrgica quanto da área superficial específica do concentrado, variável de extrema importância para a etapa de pelotização. A sua ação flocculante também é fundamental para a recuperação dessas partículas no afundado através da formação de flocos que são mais facilmente deprimidos.

O objetivo deste trabalho é identificar um flocculante sintético que seja capaz de agir seletivamente, suprir essas deficiências do amido e, deste modo, possa aumentar a recuperação metalúrgica do processo de flotação reversa de minérios de ferro.

CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS

O presente trabalho investiga a possibilidade de aplicação de floculante sintético nos sistemas de flotação reversa de minério de ferro. Objetiva-se com isso aumentar a recuperação metalúrgica desse processo de concentração sem que ocorra perda de qualidade do seu concentrado.

CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura relativa aos tópicos pertinentes ao presente estudo.

Compreende aspectos gerais sobre minérios de ferro e uma abordagem das características dos processos de flotação e floculação seletiva de minério de ferro.

3.1 Minério de ferro

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre. Entre os metais só é superado pelo alumínio. Possui concentração na litosfera de 4,2% (WALDE, 1986). É maleável e dúctil, tem densidade específica de 7,87. Comparativamente a outros metais é um fraco condutor de eletricidade. É facilmente magnetizável em temperaturas baixas, porém sua magnetização se torna mais difícil com seu aquecimento, até que em 790°C ocorre o desaparecimento desta propriedade, graças à transformação de ferro- α em ferro- β (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997).

3.1.1 Mineralogia

A ocorrência de ferro nativo é rara, sendo encontrado somente em meteoritos, basaltos da ilha de Disko, a oeste da Groenlândia, e sedimentos carbonáceos do Missouri, EUA (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997). Normalmente ocorre associado ao dióxido de carbono, oxigênio, enxofre ou silício formando carbonatos, óxidos, sulfetos e silicatos, respectivamente.

Na tabela 3.1 são apresentados os principais portadores de ferro.

De acordo com WALDE (1986), a maioria dos minérios de ferro brasileiros são formados predominantemente por óxidos e hidróxidos de ferro, principalmente hematita, e quartzo. Segundo PARKS, (1965) os pontos isoelétricos do quartzo e da hematita situam-se em pH próximo de 3 e entre 6 e 7, respectivamente.

Tabela 3.1 – Propriedades de alguns minerais portadores de ferro (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997)

Nome, Fórmula	Cor	Dureza	Densidade	Brilho	Sistema cristalino	Transparência	Fratura
chamoisita, (Fe,Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ ·(OH) ₈	cinza esverdeado, preto esverdeado ou amarronzado	3,0	3,0-3,4	vítreo ou terroso	monoclínico	opaco	irregular
ferro, Fe nativo	cinza	4-5	7,3-7,8	metálico	cúbico	opaco	dentilhada
goethita, Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	preto amarronzado, amarelado ou avermelhado	5,0-5,5	4,0-4,4	adamantino	ortorrômbico	opaco	fibrosa, quebradiça
hematita, Fe ₂ O ₃	cinza a preto	5,5-6,5	4,9-5,3	metálico (terroso quando amorfo)	hexagonal	opaco	subconchoi- dal ou irregular
magnetita, Fe ₃ O ₄	preto	6,0	5,2	metálico ou submetálico	cúbico	opaco	subconchoi- dal
marcasita, FeS ₂	amarelo bronze	6,0-6,5	4,9	metálico	ortorrômbico	opaco	irregular, quebradiça
melanterita, FeSO ₄ ·7H ₂ O	verde a branco, amarelado a marrom amarelado	2,0	1,9	vítreo	monoclínico	subtranspa- rente a translúcido	conchoidal, quebradiça
pirita, FeS ₂	bronze, amarelo latão	6,0-6,5	4,8-5,1	metálico	cúbico	opaco	conchoidal, irregular
pirrotita, FeS	avermelhado ou amarronzado, cor de bronze ou cobre	3,4-4,5	4,4-4,65	metálico	hexagonal	opaco	irregular ou conchoidal imperfeita, quebradiça
siderita, FeCO ₃	amarelo pálido a amarelo amarronzado e preto a vermelho amarronzado	3,5-4,5	3,7-3,9	perláceo ou vítreo	hexagonal	opaco, raramente translúcido	Irregular, quebradiça
titanomagnetita, Fe ₃ O ₄ + Fe ₂ TiO ₄	preto	6,0	4,8-5,2	metálico ou submetálico	cúbico	opaco	-
vivianita, Fe ₃ P ₂ O ₈ ·8H ₂ O	branco, azul ou verde profundo	1,5-2,0	2,7	perláceo a vítreo	monoclínico	transparente a translúcido	séctil

3.1.2 Classificação dos depósitos e minérios

JAMES (1966) sugeriu uma classificação das jazidas de minérios de ferro em depósitos sedimentares acamadados, relacionados a atividades ígneas, formados por soluções hidrotermais e resultantes de alterações e acúmulo na superfície. A tabela 3.2 apresenta algumas características dos depósitos de ferro formados por esses mecanismos.

Tabela 3.2 – Tipos de depósitos de ferro e suas principais características (KLEMIC et al, 1973)

Tipos de depósitos		Principais minerais portadores de ferro	Teor de ferro	Local de ocorrência
Sedimentares	Formações ferríferas bandadas (BIF)	magnetita, hematita e siderita	30%	Labrador, Quadrilátero Ferrífero e Carajás
	<i>Ironstone</i>	goethita, hematita, siderita e chamoisita	30%	Inglaterra, França, Luxemburgo e Chile
	Miscelâneos	areias pretas, goethita, siderita, magnetita e ilmenita	variável	-
Relacionados a atividades ígneas	Segregações magmáticas	magnetita	65%	Kiruna/Suécia
	Processos pirometassomáticos	magnetita e hematita	45%	Japão, Rússia e EUA
Hidrotermais	Substituição em rochas não-ferruginosas	magnetita, hematita e siderita	30%	Buena Vista/EUA
	Enriquecimento em rochas ferruginosas	hematita e magnetita	68%	Lago Superior/EUA
Resultantes de alteração superficial	Lateritas	goethita e hematita	45%	Cuba e Filipinas
	Enriquecimento em depósitos com baixa concentração de ferro	goethita e hematita	55%	Lago Superior, Quadrilátero Ferrífero, Carajás e Urucum

O fato do elemento ferro ser encontrado sob diversas formas na natureza faz com que seja necessária a adoção de uma forma de classificação para distinguir um minério de outro. Segundo SANTIAGO et al (1993), estas classificações diferem de acordo com o país e, até mesmo, com a empresa produtora para um país. Contudo, muitos pesquisadores vêm procurando uma forma de padronização da classificação de

minério de ferro. DORR II (1969) sugere uma classificação simples e ampla de acordo com sua resistência à fragmentação e composição química da rocha. Mais recentemente, COELHO et al (2000) e LIBANEO et al (2001) apontaram a necessidade de classificação do minério de ferro em função de um maior número de fatores que influenciam diretamente a eficiência das etapas de concentração e de siderurgia.

3.1.3 Reserva e produção brasileira

Estima-se que os recursos mundiais de minério de ferro excedam 800 bilhões de toneladas de minério, com mais que 230 bilhões de toneladas de ferro contido (KIRK, 2003).

O Brasil ocupa uma posição mundial de destaque tanto como detentor de reservas quanto como produtor. Essas reservas se caracterizam pelo elevado teor metálico e se encontram praticamente em três Estados, Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul (WALDE, 1986).

O Brasil possui a segunda maior produção de minérios de ferro no mundo, ficando atrás somente da China. Entretanto, como a produção da China deve referir-se à produção sem tratamento, o Brasil é, provavelmente, o maior produtor de minério beneficiado. De todo o minério produzido no Brasil, cerca de 16% são destinados à produção de granulados, 54% de *sinter-feed* e 30% de *pellet-feed* (QUARESMA, 2001).

A grande utilização do minério de ferro é para a fabricação de aço. Cerca de 99% de todo minério de ferro explorado é usado na indústria siderúrgica. O restante é utilizado na indústria de ferro-ligas, cimento e, eventualmente, na construção de estradas (QUARESMA, 2001).

3.2 Concentração de minérios de ferro por flotação

TAGGART (1921) definiu o termo flotação como sendo aquele utilizado em tecnologia mineral para designar o processo de separação de um dos constituintes do minério dos restantes, fazendo com aquele constituinte flutue acima da superfície da polpa que é formada por partículas minerais e água. A concentração de minérios de ferro por flotação é uma técnica já mundialmente consolidada para partículas minerais na faixa de 10 a 250 μ m (HUOUT, 1983). O tamanho máximo da alimentação para um sistema de flotação pode ser estabelecido em função do tamanho de liberação do mineral útil. Porém, em muitos casos, este tamanho é limitado pela força de adesão entre partícula e bolha (LEJA, 1982). Ou seja, o fluxo ascendente de bolhas não é capaz de levar partículas muito grandes. O limite inferior da faixa granulométrica é fixado em função do tamanho em que começam a ocorrer efeitos deletérios ao sistema, como o recobrimento de partículas maiores por lamas ou o consumo excessivo de reagentes devido à grande área superficial específica das partículas menores (MONTE & PERES, 2002).

No Brasil, todas as grandes unidades produtoras de *pellet-feed* utilizam a flotação reversa, sendo o rejeito constituído predominantemente de quartzo e o concentrado de óxidos e hidróxidos de ferro. Os reagentes mais utilizados são amina e amido de milho, que atuam, respectivamente, como coletor/espumante e depressor (HOUOT, 1983; FLINT et al, 1992; ARAUJO & PERES, 1995; MONTE & PERES, 2002).

BALAJEE & IWASAKI (1969) concluíram, através de estudos de adsorção de amido, em minérios de ferro, que a flotação seletiva entre o quartzo e a hematita em pH 10,5, usando amido como depressor da hematita e amina como coletor do quartzo, é possível porque o amido adsorve-se preferencialmente sobre a superfície da hematita, em relação ao quartzo e a densidade de adsorção da amina sobre a superfície do quartzo é maior que a densidade de adsorção deste reagente sobre a superfície da hematita. Estudos semelhantes realizados por LIMA (1997) indicaram ainda que a quantidade de amina que se adsorve na superfície da hematita, contendo amido previamente adsorvido, é insuficiente para torná-la hidrofóbica e a quantidade de amido adsorvido sobre o quartzo, também, é insuficiente para manter o caráter hidrofílico do mineral, após adsorção da amina.

3.2.1 Reagentes

3.2.1.1 Depressor

O amido é um polímero natural, formado pela condensação de moléculas de glicose geradas por fotossíntese através de ligações α -1,4 e α -1,6. A fórmula química simplificada do amido é $(C_6H_{10}O_5)_n$, onde n representa o número de moléculas α -D(+) glicose que compõem a macromolécula de amido (LEJA, 1982). A maior parte dos amidos constitui-se, basicamente, de dois componentes principais, amilose e amilopectina, em proporções variáveis. As figuras 3.1 e 3.2 ilustram, respectivamente, as estruturas das moléculas de amilose e de amilopectina.

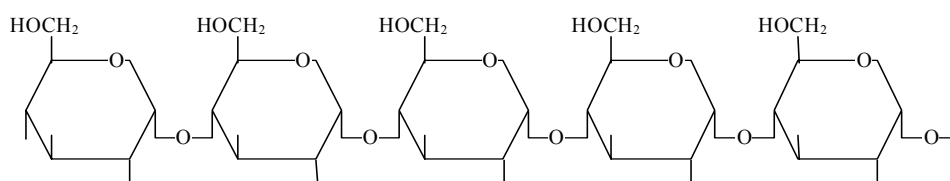


Figura 3.1 – Estrutura da molécula de amilose

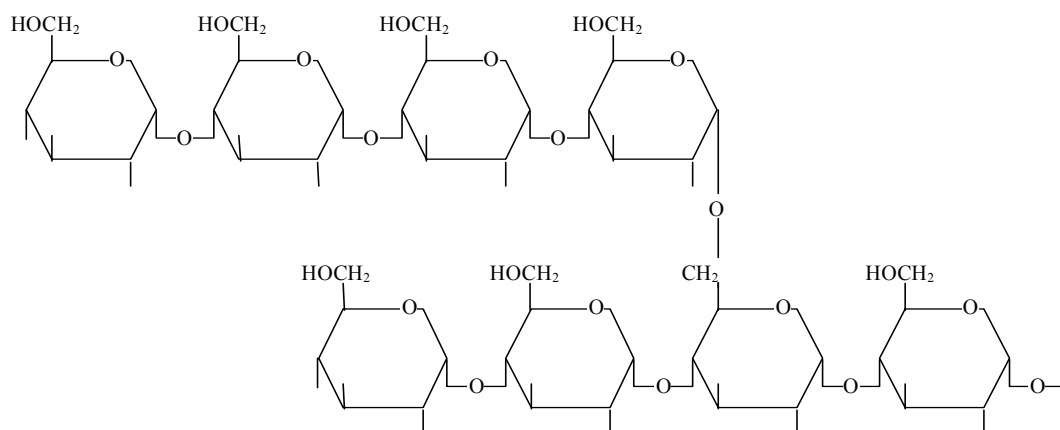


Figura 3.2 – Estrutura da molécula de amilopectina

PEARSE et al (2001) realizaram medidas de viscosidade em soluções de amido e concluíram que sua estrutura muda, conforme o pH da solução. BALDAUF & SCHUBERT (1980) observaram que a estrutura do depressor exerce papel fundamental na adsorção em superfícies minerais.

Testes de flotabilidade com amostras naturais puras de hematita e quartzo e com fluorapatita e quartzo, realizados, respectivamente, por PINTO (1989) e ARAUJO (1988), indicaram que amidos compostos por maiores participações de amilopectina proporcionam maior seletividade na depressão da hematita e da fluorapatita.

O caráter hidrofílico da molécula de amido é devido à presença de um grande número de radicais OH^- nas unidades $\alpha\text{-D}(+)$ glicose (PERES & CORRÊA, 1996).

O amido se adsorve na hematita através de ligações de hidrogênio entre os grupos alcoólicos COH do anel glicose e do grupo metanol ligado ao anel com os grupos FeOH da superfície da hematita, enquanto que a adsorção no quartzo ocorre através do metanol ligado ao anel de glicose (BALAJEE & IWASAKI, 1969; LIMA, 1997).

Estudos de adsorção realizados por PAVLOVIC (2002) indicam que a ligação da hematita com o amido ocorre através dos íons Fe^{3+} da superfície mineral.

LIU et al (2000) afirmam que a adsorção de polissacarídeos em minerais se dá através do metal hidroxilizado da superfície mineral. Deste modo, a seletividade num sistema mineral seria governada por uma interação ácido/base, em que o metal com menor acidez exibe uma interação mais forte com o polissacarídeo.

NEIS & KIEFHABER (1980) observaram, em estudos de adsorção de amido em hematita e quartzo, a influência positiva da componente eletrostática na adsorção do amido catiônico e a influência negativa do amido anionicamente substituído. Observaram também que a magnitude da componente de adsorção devida às ligações de hidrogênio é cerca de quatro vezes superior à da componente eletrostática.

BALAJEE & IWASAKI (1969) concluíram que a molécula de amido de milho apresenta carga negativa e esta aumenta com o pH, alcançando um máximo em valores de pH entre 9 e 10.

3.2.1.2 Coletor e espumante

A amina se ioniza em solução aquosa segundo a equação 1, apresentada abaixo; em pH 10,5 cerca de 50% da amina se encontra na forma ionizada (LEJA, 1982):



O mecanismo atuante na adsorção de aminas em superfícies minerais é predominantemente eletrostático. O desenvolvimento de ligações hidrofóbicas entre as cadeias hidrocarbônicas das aminas e a conseqüente formação de hemi-micelas em superfície, também é fundamental para atingir-se o grau de hidrofobicidade necessário à flotação com este reagente coletor (APLAN & FUERSTENAU, 1962; SMITH & SALIM, 1976; LEJA, 1982).

Resultados obtidos por PAVLOVIC (2002) indicam que o acetato de eteramina, derivado da amina, amplamente utilizado na flotação de minérios de ferro, interage mais fortemente com a componente amilose do amido. Essa interação ocorre com a formação de um complexo de inclusão, com o acetato de eteramina entrando na hélice da amilose.

3.2.2 Aspectos gerais

A falta de seletividade no processo de flotação pode resultar em dois efeitos indesejáveis: perda de qualidade do produto e queda de recuperação do mineral útil.

3.2.2.1 Contaminação do concentrado

Os principais contaminantes dos minérios de ferro brasileiros são sílica, fósforo e alumina.

A contaminação por sílica, na maioria dos casos, é devida à ineficiência na flotação do quartzo. Esta ineficiência ocorre, mesmo em sistemas devidamente liberados e

deslamados, sendo evitada, assim, a possibilidade de presença de partículas mistas e lamas que causem o recobrimento do quartzo.

LEJA (1982) afirmou que na maioria dos casos o limite superior de tamanho flotável se situa abaixo de 300 μm . Em alguns casos, é possível encontrar valores bem diferentes desses. LINS & ADAMIAN (1988) concluíram, através de testes de flotação com minério de ouro, que o limite pode chegar a 710 μm . Testes de flotação em bancada, utilizando minério de ferro, feitos por FERREIRA (2002), indicaram que, para o quartzo, o limite superior é de 105 μm . MONTENEGRO (2001), estudando a flotação em coluna de um minério proveniente da mesma região, obteve índices satisfatórios de flotabilidade para partículas de quartzo de até 177 μm . MEDEIROS et al (1996) também verificaram o comprometimento do desempenho na flotação de minério de ferro pela presença de partículas de quartzo maiores que 104 μm .

A contaminação por sílica pode ainda acontecer pela presença do elemento silício, encontrado na estrutura ou poros dos óxidos e hidróxidos de ferro (FERREIRA, 2002).

O fósforo se encontra intimamente associado aos minerais hidratados de ferro, principalmente a goethita, de tamanhos superiores a lamas (SOUZA JUNIOR, 1994). Estudos conduzidos por RABELO (1994), em minério de ferro, concluíram que a eliminação do fósforo no processo de flotação, sem que ocorra perda de recuperação do elemento útil, se torna impraticável.

SILVA (1999) e TURRER & RABELO (1999) verificaram que a origem da alumina no concentrado da flotação de minérios de ferro se deve à presença dos minerais goethita, gibbsita e caolinita, que ocorrem como partículas individuais ou cimentando partículas de hematita. Um bom desempenho da deslamagem é fundamental para a redução da alumina no concentrado.

3.2.2.2 Problemas na recuperação do elemento útil

A menor recuperação do elemento útil está normalmente associada à presença de partículas de menor granulometria no sistema de flotação. Nos últimos anos, vários

estudos vêm sendo realizados para elucidar os mecanismos pelos quais partículas hidrofílicas finas se dirigem para a região de espuma.

Com a diminuição do tamanho da partícula a superfície específica se torna maior e a massa da mesma se torna menor. A figura 3.3 ilustra esse aumento da área superficial.

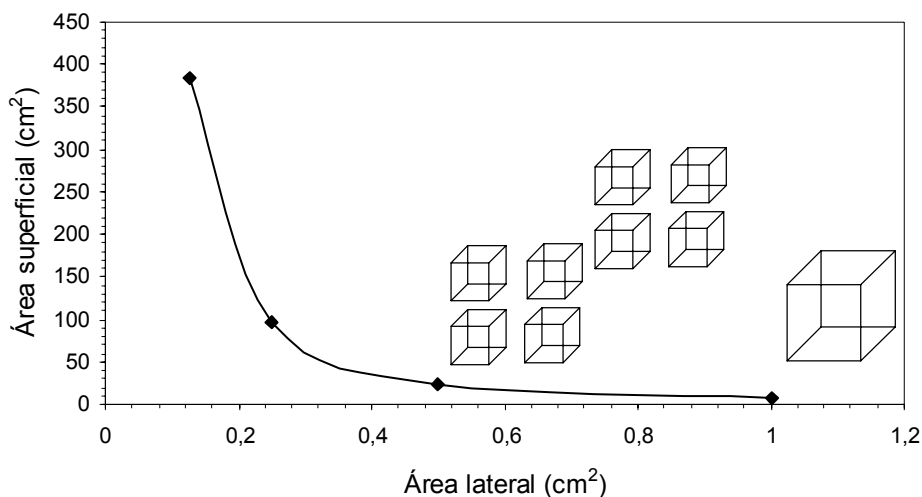


Figura 3.3 – Aumento da área superficial devido à diminuição do tamanho da partícula

A figura 3.4 apresenta um diagrama relacionando as propriedades físicas e químicas de partículas finas e seu comportamento na flotação. Da análise dessa figura, podem ser compreendidas algumas causas da perda de recuperação de partículas finas hidrofílicas no afundado.

A alta energia de superfície específica das partículas finas, devido ao maior número de extremidades, cantos e imperfeições cristalográficas, pode causar um aumento da tendência de ocorrência de adsorção não específica do coletor, que acontece de forma a desconsiderar a natureza eletroquímica ou elétrica da dupla camada (FUERSTENAU, 1980).

Devido à baixa massa e momento das partículas finas, essas podem permitir arraste em líquidos ou aprisionamento em partículas flotadas (FUERSTENAU, 1980). MORRIS (1962) obteve indicações de que partículas finas tendem a se adsorver na interface líquido-ar. Sendo assim, partículas hidrofílicas poderiam ser transportadas para a região de espuma nessa interface.

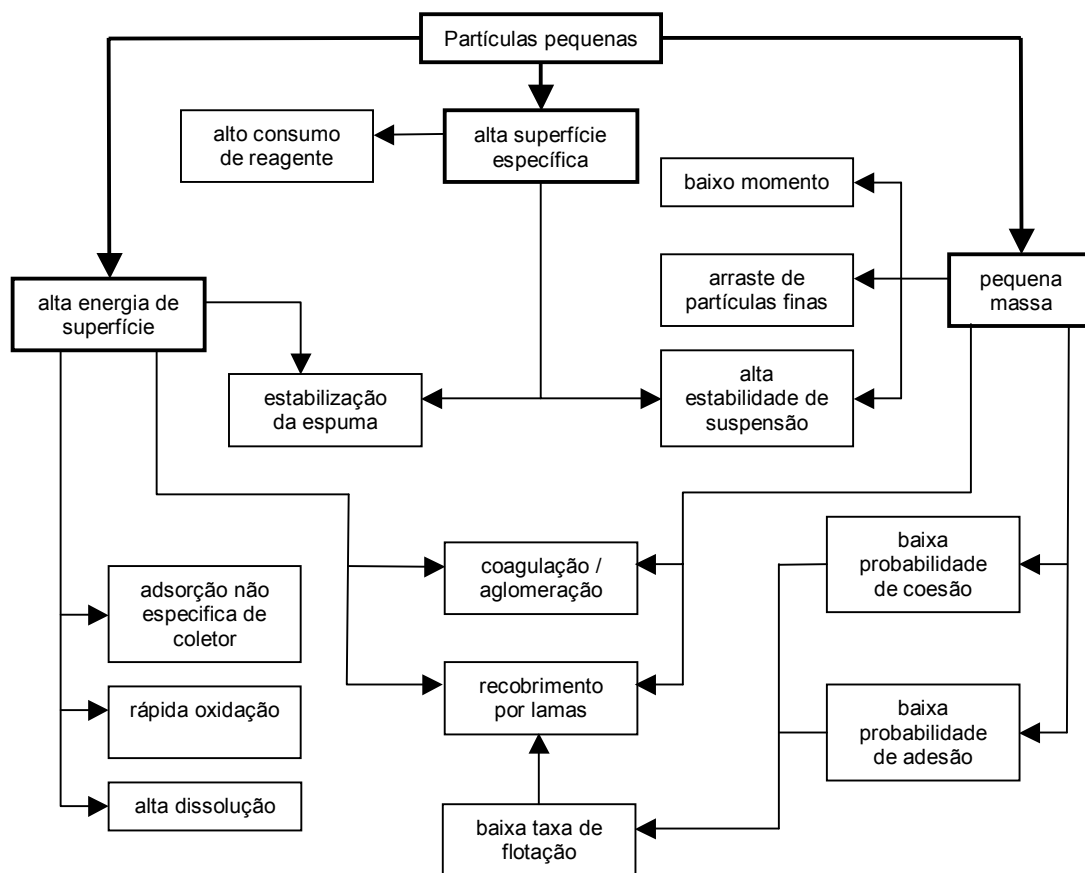


Figura 3.4 – Diagrama esquemático mostrando a relação entre as propriedades físicas e químicas de partículas finas e seu comportamento na flotação. As setas indicam os vários fatores que contribuem para um fenômeno particular observado na flotação de partículas finas (FUERSTENAU, 1980)

QUEIROZ (2003) observou em seus estudos que é possível obter-se uma diminuição dos teores de ferro no rejeito à medida que há o aumento do tempo de atrição da polpa. A atrição permitiu a remoção de agregados terrosos dos minerais de ferro e, por consequência, maior recuperação dos minerais de ferro com cristais compactos e porosos para o concentrado, com granulometrias maiores que 52 μ m e 60 μ m, respectivamente.

MONTENEGRO (2001) modelou a flotabilidade, ou seja, a probabilidade de uma determinada partícula ser coletada, de um sistema constituído de j elementos químicos e i faixas granulométricas. Os resultados obtidos em coluna piloto, figura 3.5, e industrial indicaram que, na flotação reversa de minério de ferro, a flotabilidade de

minerais portadores de ferro liberados é maior para partículas finas e é proporcional à dosagem de coletor/espumante. Isso se deve a dois fenômenos que ocorrem simultaneamente. A flotabilidade aumenta devido ao arraste mecânico e à flotação verdadeira, pois o transporte de água para o flotado é proporcional à dosagem de espumante e a adsorção não específica do coletor é proporcional à sua dosagem. O aumento na flotabilidade das partículas de maior granulometria se deve, muito provavelmente, à existência de partículas mistas.

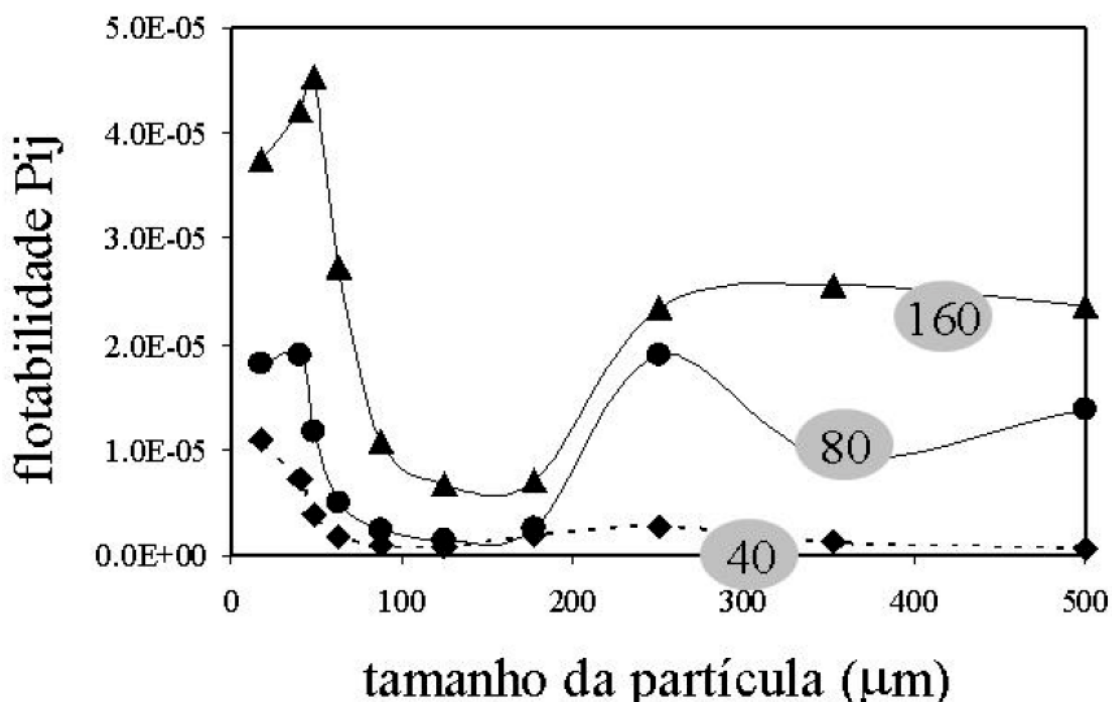


Figura 3.5 – Flotabilidade do Fe_2O_3 em diferentes dosagens de amina, na flotação reversa de minério de ferro em coluna piloto (MONTENEGRO, 2001)

Com a diminuição do tamanho e da massa das partículas minerais, o efeito da força gravitacional se torna desprezível, ou seja, as forças hidrodinâmicas passam a controlar a aproximação entre partículas finas e bolhas (MATHUR et al, 2000). Desse modo, as partículas não se sedimentam, tornando-se cada vez mais parte da fase líquida. Logo, é de se esperar que exista uma correlação entre a recuperação de água no produto flotado e o arraste (TRAHAR, 1981; SUBRAHMANYAM & FORSSBERG, 1987; KERJAVAINEN, 1989). Essa afirmação foi constada por JOHNSON et al (1974) e por ENGELBRECHT & WOODBURN (1975) para diferentes sistemas de flotação de sulfetos com ganga silicatada.

Por sua vez, BORGES (1993), estudando o arraste na flotação catiônica reversa de minérios de ferro, concluiu que a recuperação no flotado das partículas hidrofílicas, através da componente do arraste, não é proporcional à recuperação da água no flotado, como se acreditava.

Devido ao fato de que na flotação de minérios de ferro utiliza-se o mesmo reagente como espumante e coletor, a realização de testes de arraste, exemplificados na figura 3.6, não seria possível somente com uso de espumante. Esses testes se baseiam na execução de dois testes de flotação com o mesmo material. Em um seria utilizado somente espumante, enquanto no outro seriam utilizados espumante e coletor. No primeiro teste a recuperação seria atribuída ao arraste e a diferença encontrada entre as recuperações dos dois testes corresponderia à flotação verdadeira.

BORGES (1993), então, realizou testes com adição de amina (coletor e espumante) e amido (depressor). Porém, esses testes não fazem diferenciação entre as partículas que foram arrastadas e aquelas que, devido à não adsorção do depressor, flotaram por adsorção não específica do coletor. Esse fato poderia explicar o resultado não esperado dos testes com minério de ferro.

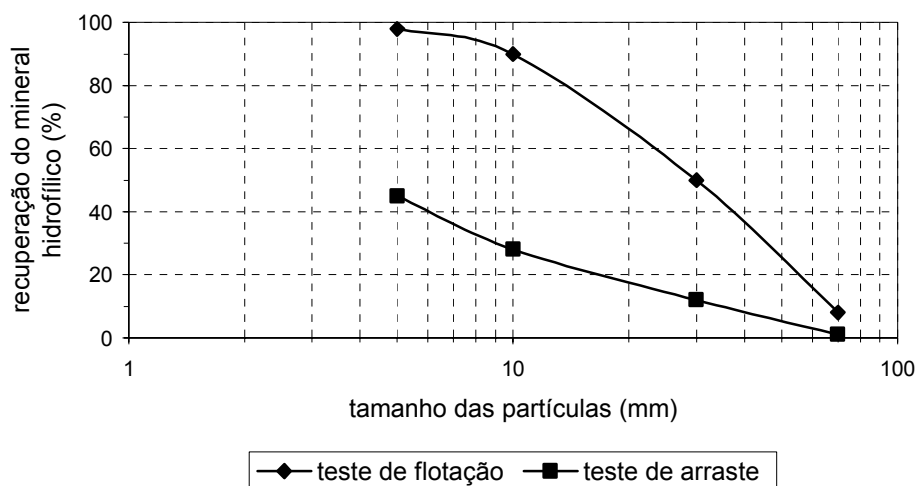


Figura 3.6 – Curvas hipotéticas de recuperação por tamanho de partícula para testes de flotação – adaptado de TRAHAR (1981)

Sabe-se que a adsorção de reagentes químicos na superfície de minerais em solução ocorre de forma diferenciada para partículas de tamanhos variados. Segundo LEJA (1982) a adsorção de reagentes na superfície de partículas menores é menos intensa

do que em partículas maiores. Isso ocorre porque partículas maiores oferecem uma maior área superficial, ou seja, fornecem condição ideal para a formação de interações em pontos múltiplos entre a superfície e polímeros espiralados.

3.3 Floculação seletiva de minérios de ferro

Segundo BALTAR (2002) a floculação caracteriza-se pela ação de um polímero que promove a agregação de partículas finas em forma de flocos.

A floculação seletiva de minério de ferro é utilizada industrialmente pela Tilden Mine, localizada no estado americano de Michigan. Essa operação é realizada em espessadores, antes da etapa de flotação. O pH da polpa varia de 10,5 a 11,0. São utilizados, usualmente, silicato de sódio como dispersante da sílica e amido como floculante dos minerais de ferro (KERANEN et al, 1985; MATHUR et al, 2000).

Para que ocorra floculação seletiva deve-se ter boa dispersão dos componentes, adsorção seletiva do floculante, separação entre flocos e fase dispersa e remoção dos flocos.

3.3.1 Reagentes

3.3.1.1 Dispersante

A escolha do dispersante é fortemente influenciada pela composição da polpa mineral (WEISSENBORN, 1996; CUHADAROGLU et al, 2001). COELHO (1980) investigou o desempenho de uma série de dispersantes na floculação seletiva de um minério de ferro. Os resultados encontrados apontaram uma melhor performance do hidróxido de sódio. Por sua vez, RABELO (1994), ao estudar a floculação seletiva de um minério de ferro com diferentes características, recomendou o uso de uma mistura de hidróxido de sódio e tripolifosfato de sódio como dispersante. Ainda segundo RABELO (1994), o principal mecanismo de dispersão dessa classe de reagentes é o aumento e manutenção de uma alta carga na dupla camada elétrica, geralmente de sinal negativo.

3.3.1.2 Floculante

Para FUERSTENAU (1980), a escolha do floculante é um fator crítico para o sucesso do processo de separação que envolve a formação e separação do floco.

Segundo COELHO (1979), os floculantes mais utilizados em estudos de floculação seletiva são os amidos, poliacrilamidas, dextrinas, polimetilceluloses, copolímeros de vinil acetato, poliacrilonitrilas e polieletrólitos modificados pela introdução de radicais (carboxila, fosfato, amônio, sulfato, sulfidril etc.)

3.3.1.2.1 Floculante natural

Em se tratando de minério ferro, a maioria dos estudos de floculação foram realizados com amido (COOKE & SCHULZ, 1952; FROMMER, 1968; GURURAJ et al, 1983; RAO & NARASIMHAN, 1985).

WEISSENBORN (1996) estudou o comportamento das frações amilose e amilopectina na floculação seletiva de partículas finas de ferro e concluiu que a amilopectina é a responsável pela habilidade de floculação do amido. Quando combinados, a amilose suprime a habilidade da amilopectina de flocular todas as partículas do minério de ferro e aumenta levemente a floculação seletiva da hematita. A superior floculação e adsorção da amilopectina são atribuídas a seu maior peso molecular e sua não linearidade.

Segundo CUHADAROGU et al (2001), os amidos são melhores floculantes que dextrinas na floculação seletiva de minério de ferro. As dextrinas, produto da dextrinização do amido, causam um alto grau de dispersão das partículas na polpa (MONTE & PERES, 2002).

3.3.1.2.2 Floculante sintético

Contudo, polímeros naturais, como o amido, não são tão efetivos, em ação floculante, como os polímeros sintéticos e, por isso, estão sendo substituídos em operações em

que não há a necessidade de ação seletiva. Segundo MOSS & DYMOND (1978), as principais desvantagens do uso de polímeros naturais, como o amido, na floculação são necessidade de altas dosagens, formação de soluções instáveis, variabilidade na qualidade e perda da coesão do floco em polpas estocadas.

A maioria dos floculantes sintéticos, usados industrialmente, são polímeros de alto peso molecular baseados na repetição de unidades do ácido acrílico e seus derivados (YONG, 1995; KISSA 1999). Segundo VREUGDE & POLING (1975), a adsorção desses floculantes na superfície mineral pode ocorrer por ligações de hidrogênio através dos grupos amida de poliacrilamidas neutras ou não-iônicas ou por reações químicas (formação de sais) de grupos carregados das poliacrilamidas iônicas. A adsorção por ligações de hidrogênio não é seletiva. A figura 3,7 ilustra monômeros típicos de poliacrilamidas.

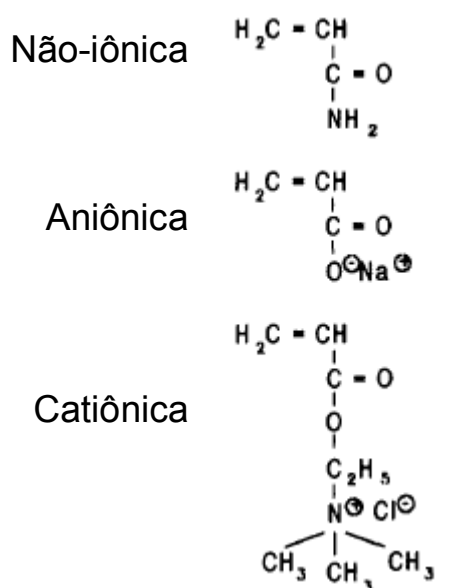


Figura 3.7 – Estrutura da molécula de poliacrilamidas (MOODY, 1992)

Devido à sua alta complexidade química, as poliacrilamidas interagem com superfícies minerais através de vários mecanismos, que podem ser eletrostáticos, interações hidrofóbicas, ligações de hidrogênio e/ou químicas. As interações hidrofóbicas só irão ocorrer com minerais hidrofóbicos ou após a adsorção de surfatantes (BOULTON et al, 2001).

JIN et al (1987a) afirma que poliacrilamidas adsorvem-se fortemente na hematita através da formação de ligações químicas com os átomos de ferro da superfície

mineral, enquanto se adsorvem na superfície do quartzo por mecanismos eletrostáticos.

O mecanismo eletrostático tende a predominar em poliacrilamidas com grande número de unidades iônicas. As ligações de hidrogênio se formam pela presença de grupos NH_2 e OH^- nas moléculas de poliacrilamidas (SOMASUNDARAM, 1980).

CHIBOWSKI & WISNIEWSKA (2002) observaram que o número e a distribuição dos grupos $-\text{COOH}$ nas moléculas de poliacrilamida e ácido poliacrílico governam a conformação da cadeia do polímero na interface e influencia diretamente a quantidade adsorvida. Verificaram que o aumento no peso molecular gerava maior adsorção do polímero devido ao maior número de segmentos em forma de laço e cauda. Por sua vez, a elevação do pH do meio ocasionava diminuição da quantidade adsorvida, graças à repulsão eletrostática entre o polímero e a partícula mineral. Também notaram que o ácido poliacrílico adsorveu-se em maior quantidade na superfície da hematita que a poliacrilamida, devido ao menor número de grupos $-\text{COOH}$ desse último reagente.

BAJPAI & BAJPAI (1995) estudaram a adsorção de poliacrilamida em hematita e concluíram que a taxa inicial de adsorção decresce com o aumento do pH, pela adição de ânions e moléculas de uréia e com o aumento do peso molecular do polímero.

Em seus estudos, tanto CHIBOWSKI & WISNIEWSKA (2002) e BAJPAI & BAJPAI (1995), concluíram que, apesar da existência de interações eletrostáticas, as ligações de hidrogênio eram as principais responsáveis pela adsorção dos polímeros na hematita.

GEBHARDT & FUERSTENAU (1983) obtiveram resultados que mostram a importância da componente eletrostática na adsorção de um ácido poliacrílico na superfície da hematita. O ácido poliacrílico é um floculante aniônico que contém grupos carboxilato capazes de formar quelatos com o Fe da superfície mineral. Pontes de hidrogênio também auxiliam na adsorção desse reagente.

WEISSENBORN et al (1994) estudaram o desempenho de diferentes amidos e poliacrilamidas na floculação de minério de ferro. Amido de trigo apresentou os

melhores resultados. A melhor performance dos amidos foi atribuída a uma menor sensibilidade a íons em solução. As poliacrilamidas apresentaram bons resultados em sistemas compostos por misturas sintéticas de hematita e quartzo em água deionizada. Estudos realizados por JIN et al (1987b), indicaram que as poliacrilamidas não agiram seletivamente em sistemas reais. Os autores sugerem a utilização de agentes complexantes, que reagiriam com os íons em suspensão, melhorando a seletividade. Por sua vez, PRADIP et al (1993) sugerem que o uso de poliacrilamidas de alto peso molecular e contendo altas proporções de grupos funcionais hidroxamato levaria a uma melhora na seletividade das mesmas.

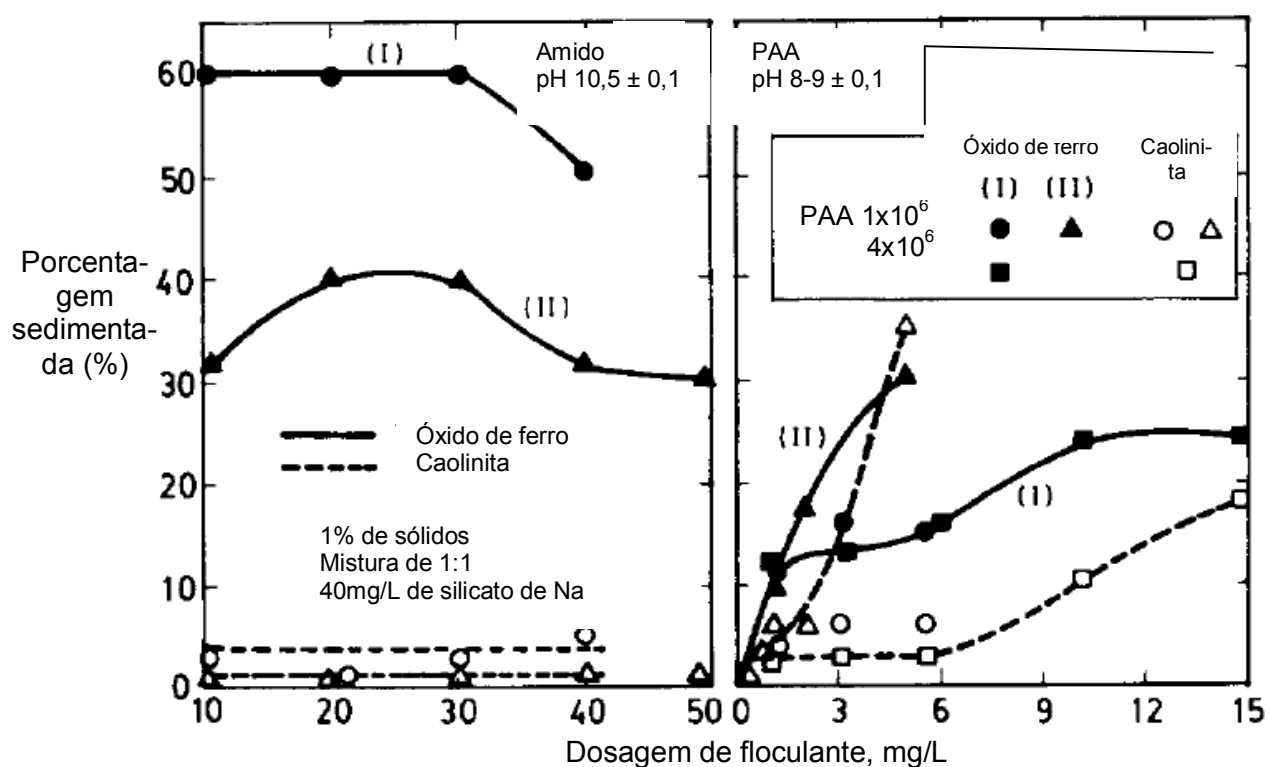


Figura 3.8 – Resultados de floculação para amostras com diferentes granulometrias (RAVISHANKAR et al, 1994)

RAVISHANKAR et al (1994) compararam o desempenho do amido e do ácido poliacrílico na floculação seletiva de minerais de ferro em presença de argilas. Os resultados encontrados indicaram que o amido é mais seletivo, forma flocos menores e requer maiores dosagens. A figura 3.8 mostra que o amido promove uma melhor eficiência de floculação para a amostra de menor granulometria (I) enquanto o ácido poliacrílico apresenta melhores resultados para a amostra de maior granulometria (II).

BOULTON et al (2001) pesquisaram a utilização de poliacrilamidas de baixos pesos moleculares e diferentes grupos funcionais na separação por flotação da esfalerita e pirita com xantato isobutil. Concluíram que poliacrilamidas melhoram a depressão da pirita sem alterar significativamente a recuperação no flotado da esfalerita. Uma maior depressão da pirita foi obtida quando o coletor era adicionado à polpa após condicionamento da poliacrilamida e para partículas de maior granulometria. A seletividade foi obtida devido à interações específicas desses polímeros com os íons e hidróxidos de ferro da superfície mineral.

3.3.2 Aspectos gerais

Segundo BESRA et al (2002), floculação não requer a completa cobertura da partícula mineral pelo floculante. O floculante ideal é aquele capaz de neutralizar a carga superficial responsável pela repulsão e se adsorver em espirais com a cadeia voltada para a solução. A completa cobertura da superfície com polímeros adsorvidos na configuração plana resultaria numa repulsão entre as partículas. Esse fenômeno também pode ser observado na figura 3.8, onde a partir de uma determinada dosagem ocorre uma diminuição na quantidade de material sedimentado.

SHIMBAYASHI et al (1992) e SOMASUNDARAN & YU (1994) afirmaram que em alguns sistemas o uso de uma mistura de dois floculantes é mais efetivo do que o uso de cada um individualmente. A ordem de adição dos componentes da mistura tem efeito no resultado final (PEARSE et al, 2001).

YAN et al (2004) investigaram a eficiência de três ácidos poliacrílicos de diferentes pesos moleculares. Em seus estudos foram usadas quatro soluções, uma com cada floculante e uma com uma mistura dos floculantes de maior e menor peso de forma a resultar numa mistura de peso molecular médio igual ao do floculante não usado na mesma. Eles concluíram que floculantes com maior peso molecular formam flocos pelo mecanismo de formação de pontes entre as partículas, e conseqüentemente, geram flocos maiores e menos resistentes. Por sua vez, floculantes de menor peso molecular formam flocos por neutralização das cargas superficiais das partículas, formando flocos mais compactos e mais resistentes. Também observaram que a utilização da mistura confere uma maior resistência ao floco sem que haja perda de

eficiência na clarificação da água. Outro resultado foi a constatação da importância da ordem de adição dos floculantes na mistura, que influenciavam a distribuição e a média dos tamanhos dos flocos.

Floculantes causam a agregação de partículas, principalmente, através de dois mecanismos: formação de pontes de ancoragem entre os seus sítios ativos e as superfícies das partículas minerais e reversão localizada de carga (COELHO, 1979; SOMASUNDARAM, 1980; BALTAR 2002).

Estudos realizados por MOUDGIL et al (1987 e 1993) e ATTIA & YU (1988) levaram à conclusão de que a perda de eficiência de seletividade na floculação é causada geralmente por heterocoagulação, neutralização de cargas, interferência de íons dissolvidos, recobrimento por lamas, aprisionamento de partículas e arraste.

Testes de floculação seletiva com hematita e quartzo realizados por SRESTY & SOMASUNDARAN (1980) indicaram que se consegue uma melhora na seletividade das poliacrilamidas com a introdução de grupos funcionais adequados. Testes semelhantes realizados por BAGSTER & McILVENNY (1985) apontaram que a utilização conjunta de floculantes de maiores cargas e pesos moleculares e de dispersantes também aumenta a seletividade do floculante.

3.4 Flotação de agregados

FRIEND & KITCHENER (1973), estudando os aspectos físico-químicos de um sistema de floculação seletiva, observaram que a agregação de partículas finas poderia melhorar a eficiência do processo de flotação, uma vez que esses dois processos ocorrem sob as mesmas condições.

A maioria desses estudos trata da floculação e posterior flotação do agregado (GAUDIN et al, 1942; MORRIS, 1962; NEIS & KIEFHABER, 1980; CUHADAROGLU et al, 2001). Porém, um outro processo possível é a floculação e depressão do floco, seguida de flotação das demais partículas (FROMMER, 1970; CUHADAROGLU et al, 2001).

O emprego desse último processo de concentração é particularmente interessante para o minério de ferro.

Óxidos e hidróxidos de ferro apresentam maior densidade que o quartzo (DANA, 1969). Logo, a floculação das partículas hidrofílicas, na flotação reversa de minério de ferro, seria mais interessante. Em sistemas de floculação, minerais mais densos, além de exibirem uma maior velocidade de sedimentação, formam flocos maiores que se sedimentam mais rapidamente (COELHO, 1979). Segundo FRIEND & KITCHENER (1973), a contaminação do produto sedimentado é menor quando esse é composto pelo mineral mais denso.

A baixa recuperação de partículas finas de minerais de ferro no afundado, como já foi visto anteriormente, pode ter várias causas. A ineficiência da adsorção do depressor amido nessas partículas, sem dúvida, contribui para isso.

A utilização de um floculante seletivo juntamente com o amido poderia melhorar a eficiência dessa adsorção pela formação de flocos maiores, nos quais a adsorção do amido seria mais intensa do que em pequenas partículas individuais.

Em tecnologia mineral, o mecanismo de ação, interação e as reações entre dois reagentes ainda são assuntos pouco estudados. WAKAMATSU & NUMATA (1980) estudaram a ação conjunta de dois coletores e comprovaram a eficácia na utilização da mistura de dois reagentes com tamanhos significativamente diferentes da cadeia de hidrocarbonetos. A figura 3.9 ilustra como, através de interações de van der Waals, a utilização de um reagente com maior cadeia hidrocarbônica pode ajudar na adsorção de um de menor cadeia. É importante salientar que a figura 3.9 representa a adsorção em uma interface líquido/gás, mas o fenômeno ilustrado na figura pode se estender para outras interfaces, como por exemplo a interface sólido/líquido.

YUEHUE et al (2004) estudaram o uso de poliacrilamida na flotação direta de caulinita. Eles concluíram que a poliacrilamida aniônica aumentou a recuperação do processo através da adsorção por ligações de hidrogênio desse reagente em planos da superfície mineral que exibiam baixa interação com o coletor. Desse modo, flocos eram formados em que somente os planos de maior interação com o coletor ficavam expostos para adsorção do mesmo.

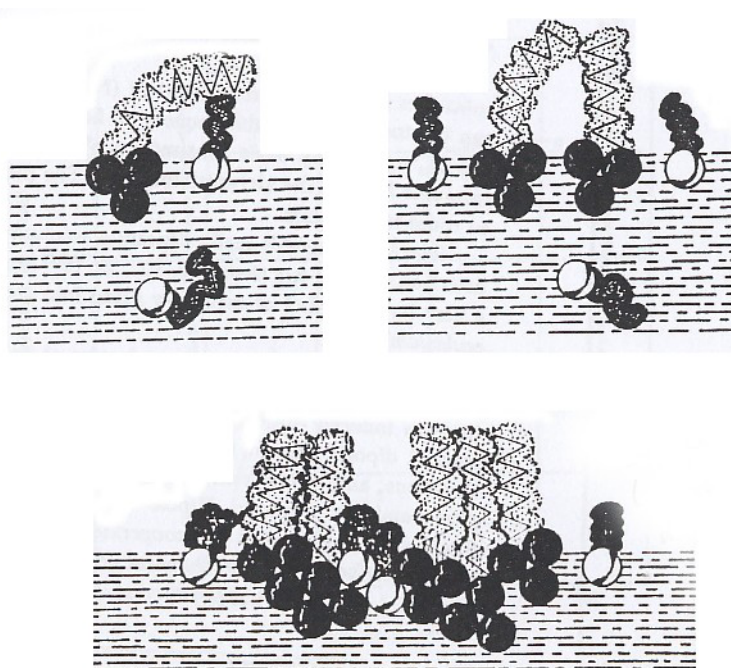


Figura 3.9 – Representação esquemática da adsorção de dois surfatantes com diferentes pesos moleculares (LEJA, 1982)

Num processo de flotação convencional, existem basicamente dois mecanismos de transporte de partículas para o flotado: pela flotação, que consiste na adesão partícula bolha e pelo arraste (LYNCH & WHITEN, 1980; TRAHAR, 1981).

Na flotação em presença de flocos, por sua vez, os mecanismos são quatro: adesão da bolha de ar na fase sólida, aprisionamento da bolha de ar no interior da estrutura do floco durante sua ascensão, adsorção das bolhas de ar na estrutura do floco na formação do mesmo e formação da bolha de ar no interior do floco (NEIS & KIEFHABER, 1980). Esses mecanismos estão ilustrados na figura 3.10.

Dentre eles, somente o primeiro, adesão da bolha de ar na fase sólida, não deverá ser significativo num sistema de flotação onde os flocos hidrofílicos não devam ser flotados. Isso porque a superfície hidrofílica do floco não terá afinidade suficiente com as bolhas para que ocorra a adesão. Os demais mecanismos de transporte do floco para região de espuma ocorrerão no sistema já citado e devem ser minimizados, através da manipulação de variáveis do processo, para que não impactem a recuperação dos flocos no afundado.

Segundo PACKHAM & RICHARDS (1975), apesar do arraste do floco pelas bolhas de ar atuar como um mecanismo não específico de coleta, não atuará de forma dominante no processo de flotação de floco devido aos gradientes de velocidade do sistema.

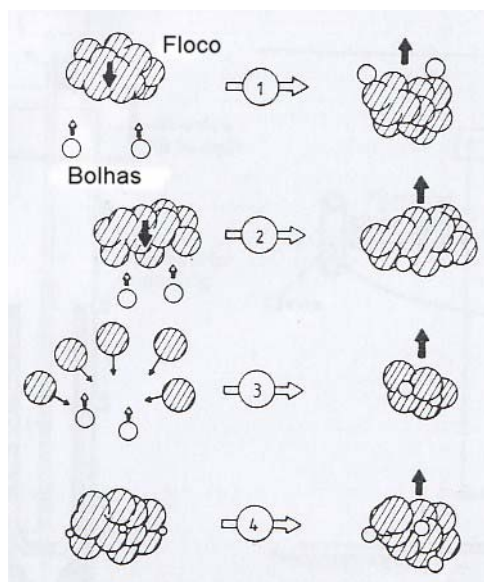


Figura 3.10 – Principais mecanismos responsáveis pelo transporte do floco no processo de flotação (NEIS & KIEFHABER, 1980)

Devida atenção deve ser dada à presença de íons dissolvidos na polpa, pois vários estudos comprovam os efeitos adversos causados por sua vez presença destes em sistemas de flotação e floculação de minérios de ferro (IWASAKI et al, 1980; COELHO, 1980; ARAUJO, 1982; SUBRAMANIAN & NATARAJAN, 1989; CARVALHO, 2003). A ação negativa desses cátions pode ser prevenida pela utilização de reagentes químicos que complexem esses cátions ou que se adsorvam fortemente no mineral (DRZYMALA & FUERSTENAU, 1981). A figura 3.11 ilustra a influência de vários íons na ativação do quartzo. Essa ativação é causada pela adsorção de hidróxido-complexos, que causam reversão de carga do mineral.

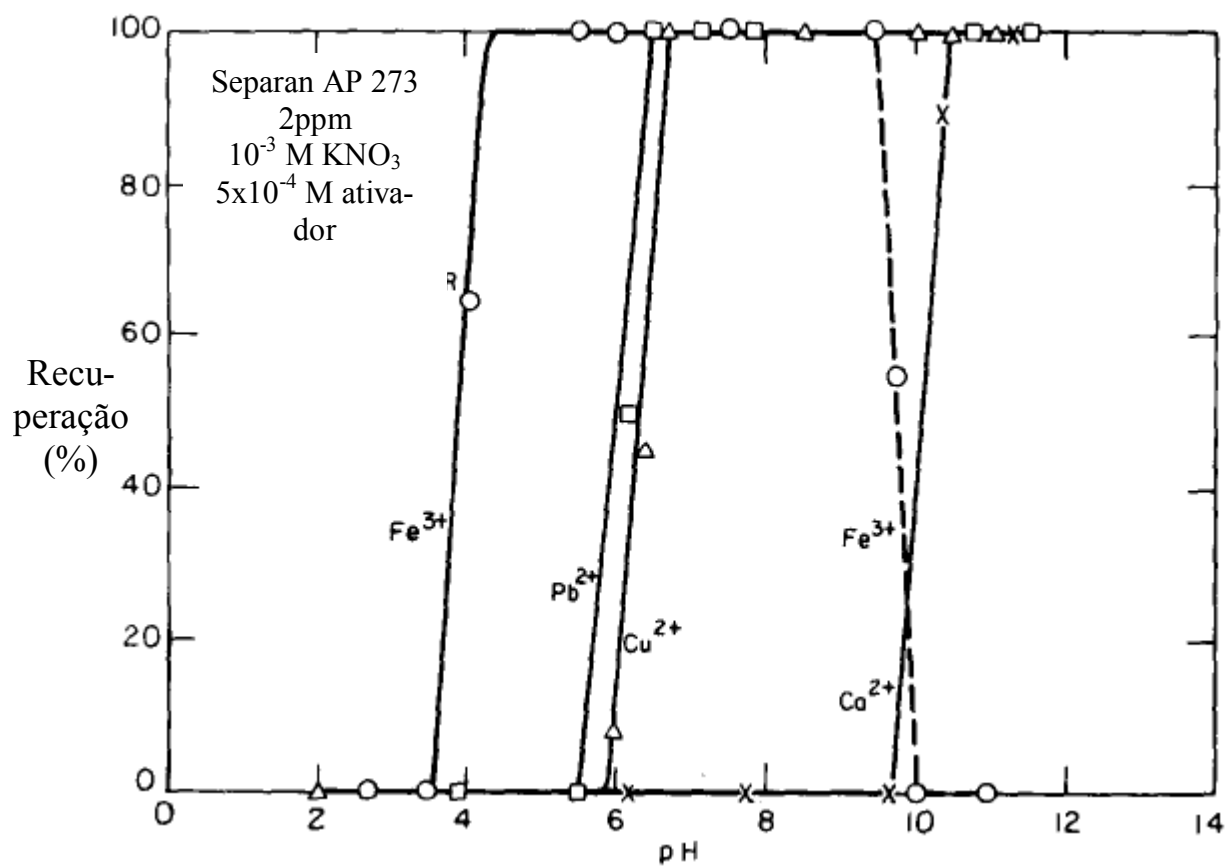


Figura 3.11 – Recuperação na floculação de sílica com ácido poliacrílico em função do pH na presença de diferentes cátions (DRZYMALA & FUERSTENAU, 1981)

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados durante a realização da parte experimental deste trabalho.

4.1 Composição e preparação das amostras

As amostras minerais utilizadas no trabalho são provenientes da mina do Pico, localizada no município de Itabirito-MG, e de propriedade das Minerações Brasileiras Reunidas S. A. Foram coletadas amostras de duas litologias que eram classificadas segundo padrões internos da empresa mineradora em hematita compacta, quase isenta de minerais de ganga, e itabirito pobre, constituído basicamente de hematita e quartzo com o segundo mineral totalizando cerca de 60% do volume da amostra. A amostragem foi realizada através de canaletas feitas nas frentes de lavra com o auxílio de uma retro-escavadeira. Foram coletados cerca de 1000kg de material para cada amostra.

As amostras foram peneiradas a úmido em um peneirador industrial para obtenção de um produto menor que 150 μ m. O material maior que 150 μ m foi descartado. A fração passante foi deslamada com o auxílio de um conjunto constituído por um tanque, uma bomba, um ciclone de 2", tubulações e válvulas para as conexões necessárias.

Primeiramente as amostras foram diluídas para formarem uma polpa com 35% de sólidos. A polpa resultante foi, então, introduzida dentro do tanque que estava ligado à bomba. Em seguida, a polpa foi circulada via *by-pass*, ou seja, sem alimentar o ciclone, por 3 minutos, objetivando a homogeneização do material. Após esse tempo, a válvula de alimentação do ciclone foi aberta e fechou-se a válvula do *by-pass*. A polpa foi recirculada inicialmente por mais 5 minutos na pressão de alimentação máxima do ciclone e depois por mais 5 minutos na pressão de 1kg/cm² antes da coleta simultânea do *underflow* e do *overflow*. A coleta do material se deu até a completa classificação do material. Os finos deslamados pelo fluxo do *overflow* representaram 8,16% e 6,25% da massa alimentada para as amostra de itabirito e hematita, respectivamente.

O produto de maior granulometria da deslamagem foi decantado e teve sua água drenada. Em seguida foram acondicionados em sacos plásticos, totalizando cerca de 300kg de amostra de itabirito e 150kg de amostra de hematita. Essas amostras foram, então, secadas em estufa a 100°C, homogeneizadas e quarteadas em alíquotas menores. Inicialmente foi feita uma pilha cônica com todo o material. Essa pilha foi revolvida algumas vezes e quarteada para formação de duas novas pilhas. A retirada alternada de material dessas pilhas formou uma pilha alongada, tipo *Chevron*, da qual foram retiradas as amostras. A figura 4.1 ilustra o resumo do procedimento de preparação.

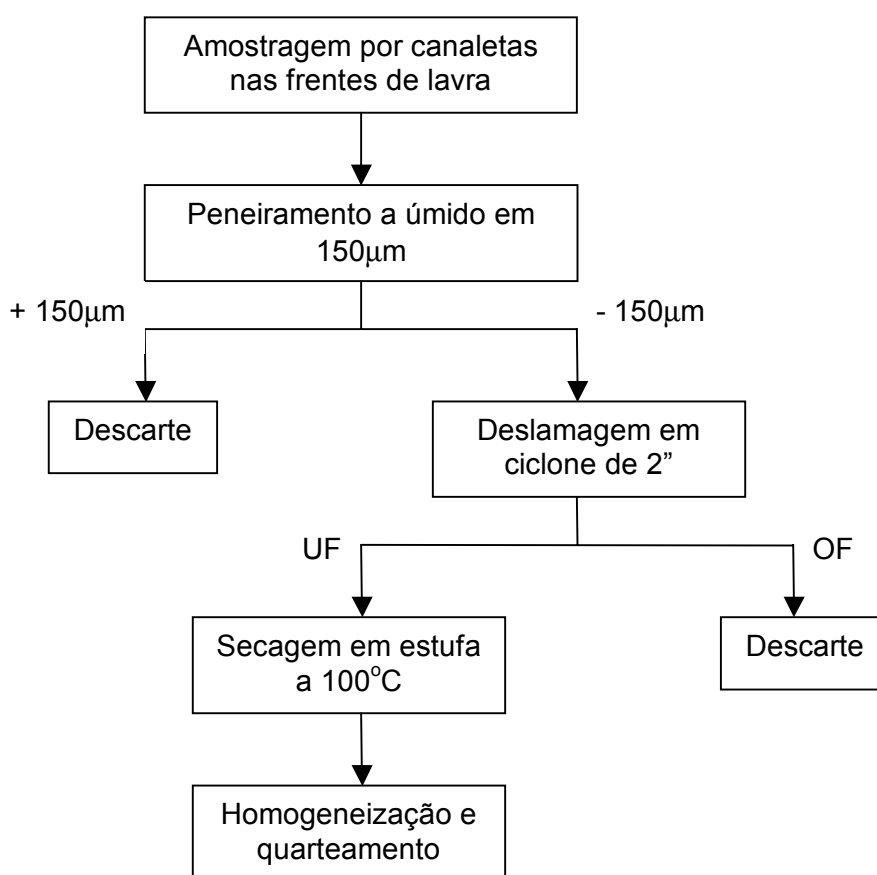


Figura 4.1 – Fluxograma de preparação das amostras

4.2 Análises granulométricas

Foram utilizadas peneiras com aberturas de 150µm, 105µm, 75µm, 53µm, 44µm e 37µm.

O peneiramento na faixa de 150 μ m a 44 μ m foi feito a seco durante 15 minutos em um vibrador suspenso de laboratório. O peneiramento em 37 μ m foi realizado manualmente a úmido.

Alíquotas das frações menores que 44 μ m foram analisadas no granulômetro Sympatec Helos Vectra de propriedade do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG. Nessa análise foram utilizados hexametáfosfato de sódio como dispersante e lente de 50mm.

Foram analisadas alíquotas representativas das amostras de hematita e itabirito, para se obter a distribuição granulométrica das mesmas. Devido à natureza das amostras e à existência da etapa de deslamagem em sua preparação, espera-se que as amostras apresentem baixa proporção de material abaixo de 10 μ m.

A obtenção das massas necessárias para as análises granulométricas foi feita com o uso de quarteador Jones Humbolt H-3980 com 12 calhas distribuídas em uma área de 40cm x 65cm.

A figura 4.2 ilustra o procedimento de análise granulométrica.

4.3 Análises químicas

Os teores em ferro foram determinados por dicromatometria. As análises químicas de sílica, alumina, fósforo, e manganês foram efetuadas por espectrometria de plasma, em equipamento Spectro CIROS^{CCD} M SOP, na Samarco Mineração S.A. Os valores de perda por calcinação (PPC) foram obtidos por calcinação em mufla, a 1100°C.

4.4 Análises mineralógicas

Os estudos de difração de raios-X foram realizados em difratômetro marca Phillips, modelo PW-1400 pertencente ao departamento de Engenharia de Minas da UFMG. Utilizou-se radiação K_{α} do cobre, monocromatizada entre ângulos 2θ de 0° e 80°. As

amostras analisadas por difração de raios-X foram pulverizadas até granulometria menor que 0,037mm.



Figura 4.2 – Fluxograma geral para análises granulométricas

4.5 Testes de flotação

Os testes de flotação foram realizados em célula de laboratório Denver, modelo 5202, com cubas de 2,5 litros.

A amostra devidamente pesada foi inserida na cuba, onde se adicionou água até a formação de uma polpa com 60% de sólidos. Após 1 minuto de agitação, seguiu-se a adição dos reagentes na seguinte ordem: floculante, depressor e coletor. Os tempos de condicionamento foram de 1 minuto para o coletor e 5 minutos para o depressor. A flotação foi realizada em pH 10,5 com 40% de sólidos em peso. Em todos os testes, inclusive aqueles com poliacrilamidas, foram adicionados amido.

As medidas do pH foram feitas com o rotor desligado. Foi utilizado um medidor de pH Analion PM608.

Nos testes de cinética de flotação foram coletados os flotados nos tempos de 30s, 60s, 90s, 150s e 480s. Nesses testes utilizou-se a amostra classificada como hematita. Com isso objetivou-se uma menor obtenção de amostras para análise química, uma vez que essas amostras eram constituídas basicamente por hematita, além de uma maior facilidade na interpretação do desempenho das poliacrilamidas.

Foram utilizados, respectivamente, como depressor, coletor e floculante soluções de amido a 1%, gelatinizado na proporção amido/soda de 5:1, amina a 1% e poliacrilamidas catiônica, aniônica e não iônica a 0,01%. Os moduladores de pH utilizados foram soluções de NaOH a 3% e HCl a 1%. Todas as soluções foram preparadas com água destilada.

O amido utilizado foi o Itafloc, proveniente da Moinhos Cauê Indústria & Comércio Ltda. A amina fornecida pela Clariant foi a Flotigam EDA-B. Os floculantes testados foram poliacrilamidas da Cytec do Brasil Ltda. São eles o Magnifloc 796C (catiônico), o Superfloc A-130 HMW (mediamente aniônico) e o Superfloc N-300 (não-iônico). Todas as poliacrilamidas eram de alto peso molecular.

4.6 Testes de sedimentação

Os testes de sedimentação foram realizados em provetas de vidro de 1000mL a 42% de sólidos. Após adição dos reagentes, a polpa foi agitada manualmente com um *plunger*, que foi levantado e abaixado por três vezes. A altura da interface foi medida

nos tempos de 0s, 15s, 30s, 45s, 60s, 90s, 2min, 4min, 5min, 10min, 15min, 20min, 30min.

Os flocculantes utilizados foram, as já citadas, solução de amido a 1% e poliacrilamidas a 0,01%.

4.7 Medidas de adsorção

As amostras utilizadas nos ensaios de adsorção foram obtidas pelo peneiramento em 37 μ m da amostra de hematita. A fração passante foi ainda cominuída em gral de ágata. A solução de amido foi preparada a 1%. Utilizou-se amido de milho fabricado pela Beneficiadora Primavera Ltda.

A determinação da adsorção qualitativa do amido foi realizada pela técnica de transmissão na região do infravermelho pelo espectrômetro FTIR 1760-X do departamento de Engenharia de Minas da UFMG. As amostras foram misturadas com brometo de potássio para confecção das pastilhas.

Os ensaios de adsorção foram realizados com 0,25g da amostra, pH natural da polpa e 25ml das soluções de amido a 1% e de poliacrilamida a 0,1%. O tempo de condicionamento dos reagentes foi de 20 minutos. No caso da utilização dos dois reagentes, a poliacrilamida era adicionada antes do amido.

Medidas da área superficial e da densidade da amostra utilizada nos ensaios de adsorção foram determinadas, respectivamente, pelo método BET em equipamento Quanta Chrome NOVA1000 e em picnômetro a vácuo Quanta Chrome SPY-3, ambos equipamentos de propriedade do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG.

4.8 Planejamento de experimentos (WERKEMA & AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 1996)

A complexidade dos processos de flotação, custos de laboratório e tempo conduzem à necessidade de reduzir o número de variáveis a ser investigadas.

Para minimizar o número de testes e assegurar e validar numericamente os resultados, o procedimento experimental utilizado foi através do projeto de experimentos fatoriais *screening* (2^k). O critério proposto para a realização dos testes exploratórios de flotação é pelo fatorial de Plackett-Burman.

Nesse tipo de projeto de experimento a magnitude da influência de cada efeito principal, sobre a resposta, está “somada” à magnitude de interações de 2ª ordem. Entretanto, esses projetos são muito úteis para detectar, economicamente, os grandes efeitos. Nele, supõe-se que todas as interações são de baixa significância, quando comparadas com alguns poucos efeitos de importância capital. Os fatores estudados nesses experimentos foram dosagem de coletor, dosagem de depressor, dosagem de floculante, pH de condicionamento do floculante, pH de flotação, agitação do condicionamento, agitação na flotação, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e porcentagem de sólidos em peso na flotação.

Para efeito de comparação, um outro experimento foi realizado, onde floculantes sintéticos não foram utilizados. Nestes foi utilizado um fatorial *screening* (2^k) com melhor resolução que o usado anteriormente, ou seja, capaz de discriminar efeitos principais de efeitos de interações. Os fatores estudados foram dosagem de coletor, dosagem de depressor e pH de flotação. Esse experimento não foi realizado com o mesmo número de fatores dos experimentos com poliacrilamida, pois, por se tratar de uma técnica amplamente estudada, possui a maioria dos fatores já otimizados.

Nesses experimentos foram utilizadas as amostras classificadas como itabirito e a flotação se deu até exaustão da espuma. As variáveis dependentes analisadas foram o teor de sílica no concentrado e a recuperação metalúrgica. O grau de confiança adotado foi de 95%.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, inicialmente, os resultados da caracterização das amostras. Em seguida, resultados dos testes de flotação são mostrados. Finalmente, apresentam-se os resultados de ensaios auxiliares, necessários para a compreensão dos resultados.

5.1 Características granuloquímicas das amostras

Como mencionado anteriormente, foram utilizadas duas amostras, denominadas hematita e itabirito. Sendo a primeira utilizada nos testes de cinética de flotação e a segunda nos experimentos.

Tabelas e gráficos, com as análises granulométricas das amostras, são ilustrados a seguir. A tabela 5.1 e a figura 5.1 são referentes à amostra de hematita, enquanto a tabela 5.2 e a figura 5.2 se referem à amostra de itabirito.

Os resultados da análise granulométrica mostram que a porcentagem de lamas, material abaixo de 10 μ m, representa cerca de 10% e 2,5% das amostras de hematita e itabirito, respectivamente. Essa ineficiência da deslamagem pode ser atribuída ao método empregado. Contudo, essas quantidades de lamas são aceitáveis para os objetivos deste estudo.

As análises químicas das amostras são apresentadas nas tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6.

As análises químicas mostram que ferro e silício são os elementos predominantes nas amostras. Os demais elementos se encontram em proporções muito pequenas. Sílica está presente em pequena quantidade na amostra de hematita e em elevados teores na de itabirito.

Nas figuras 5.3 e 5.4 estão ilustrados os gráficos de distribuição as espécies químicas analisadas por faixa granulométrica.

Tabela 5.1 – Análise granulométrica da hematita

Diâmetro		%Simp. Ret.	%Acum. Ret.	%Acum. Pass.
#	mm			
100	0,150	0,00	0,00	100,00
150	0,105	6,55	6,55	93,45
200	0,075	10,05	16,59	83,41
270	0,053	11,04	27,64	72,36
325	0,044	6,23	33,87	66,13
400	0,037	13,15	47,02	52,98
-	0,0305	10,42	57,44	42,56
-	0,0255	9,01	66,46	33,54
-	0,0215	7,04	73,49	26,51
-	0,0180	5,77	79,26	20,74
-	0,0150	4,47	83,73	16,27
-	0,0125	3,29	87,02	12,98
-	0,0105	2,30	89,31	10,69
-	0,0090	1,52	90,84	9,16
-	0,0075	1,34	92,18	7,82
-	0,0063	1,02	93,20	6,80
-	0,0053	0,82	94,02	5,98
-	0,0045	0,64	94,66	5,34
-	0,0038	0,68	95,34	4,66
-	0,0030	0,67	96,01	3,99
-	0,0025	0,46	96,47	3,53
-	0,0022	0,34	96,81	3,19
-	0,0019	0,34	97,15	2,85
-	0,0016	0,39	97,54	2,46
-	0,0013	0,38	97,92	2,08
-	0,0011	0,34	98,26	1,74
-	0,0009	0,38	98,64	1,36
-	0,0008	0,30	98,94	1,06
-	0,0007	0,21	99,14	0,86
-	0,0006	0,22	99,36	0,64
-	0,0005	0,21	99,57	0,43

Tabela 5.2 – Análise granulométrica do itabirito

#	Diâmetro	%Simp. Ret.	%Acum. Ret.	%Acum. Pass.
	mm			
100	0,150	0,03	0,03	99,97
150	0,105	4,97	5,00	95,00
200	0,075	15,27	20,27	79,73
270	0,053	12,52	32,79	67,21
325	0,044	5,24	38,03	61,97
400	0,037	32,22	70,25	29,75
-	0,0350	0,00	70,25	29,75
-	0,0294	5,54	75,79	24,21
-	0,0246	7,90	83,69	16,31
-	0,0206	6,16	89,85	10,15
-	0,0174	3,47	93,32	6,68
-	0,0146	1,89	95,22	4,78
-	0,0122	1,14	96,36	3,64
-	0,0102	0,86	97,21	2,79
-	0,0086	0,67	97,89	2,11
-	0,0072	0,51	98,40	1,60
-	0,0060	0,34	98,74	1,26
-	0,0050	0,20	98,93	1,07
-	0,0042	0,12	99,06	0,94
-	0,0036	0,08	99,13	0,87
-	0,0030	0,07	99,21	0,79
-	0,0025	0,07	99,28	0,72
-	0,0021	0,09	99,37	0,63
-	0,0018	0,08	99,45	0,55
-	0,0015	0,10	99,55	0,45
-	0,0012	0,12	99,68	0,32
-	0,0010	0,09	99,77	0,23
-	0,00086	0,07	99,83	0,17
-	0,00074	0,05	99,89	0,11
-	0,00062	0,04	99,93	0,07
-	0,00052	0,03	99,96	0,04
-	0,00044	0,02	99,98	0,02
-	0,00036	0,01	99,99	0,01
-	0,00030	0,01	100,00	0,00
-	0,00026	0,00	100,00	0,00
-	0,00022	0,00	100,00	0,00
-	0,00018	0,00	100,00	0,00

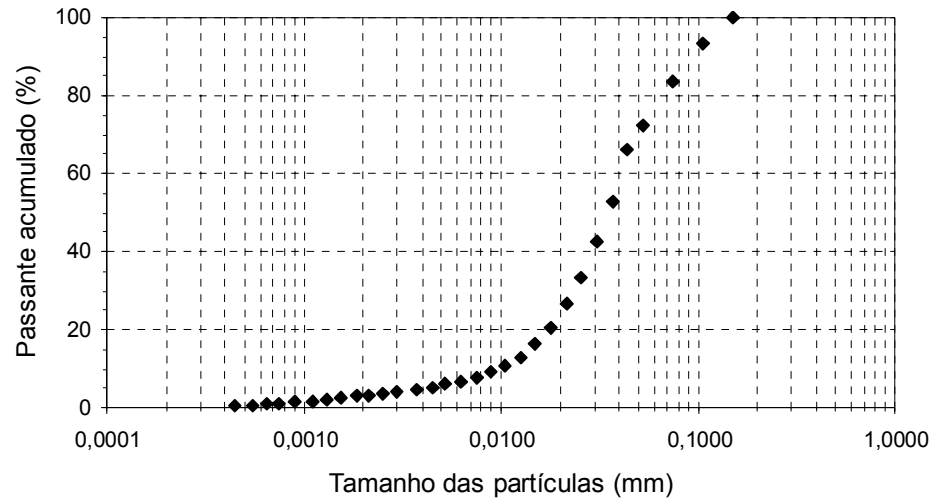


Figura 5.1 – Análise granulométrica da hematita

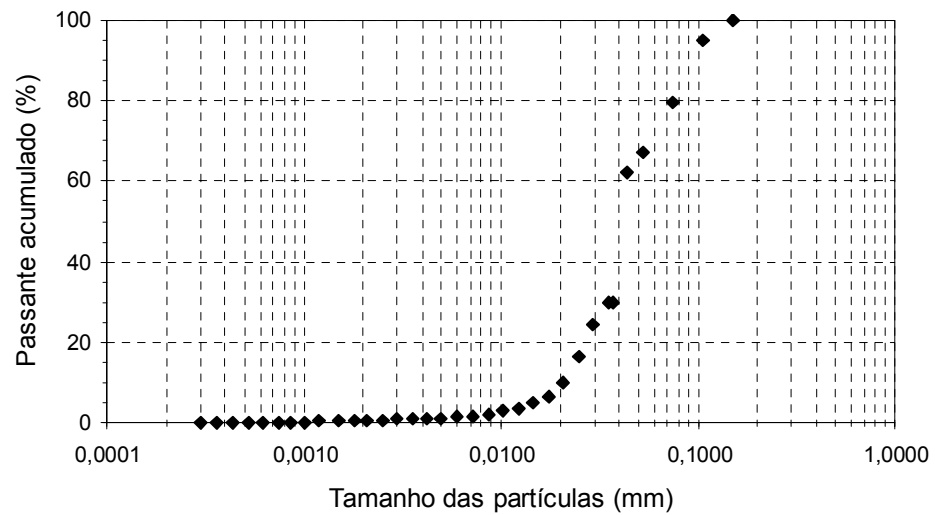


Figura 5.2 – Análise granulométrica do itabirito

Tabela 5.3 – Análise química da amostra de hematita por faixa de tamanho

Abertura (mm)	Teores					
	%Fe	%SiO ₂	%P	%Al ₂ O ₃	%MnO ₂	PPC
0,105	64,49	6,20	0,052	0,38	0,020	0,75
0,075	65,21	5,44	0,046	0,35	0,020	0,62
0,053	66,15	4,03	0,040	0,30	0,020	0,48
0,037	67,74	2,12	0,031	0,25	0,020	0,40
-0,037	68,20	1,13	0,046	0,38	0,020	0,52

Tabela 5.4 – Análise química acumulada da amostra de hematita por faixa de tamanho

Abertura (mm)	Teores acumulados					
	%Fe	%SiO ₂	%P	%Al ₂ O ₃	%MnO ₂	PPC
0,105	64,49	6,20	0,052	0,38	0,020	0,75
0,075	64,93	5,74	0,048	0,36	0,020	0,67
0,053	65,42	5,06	0,045	0,34	0,020	0,59
0,037	65,84	4,52	0,042	0,32	0,020	0,56
-0,037	67,40	2,28	0,045	0,36	0,020	0,53
cabeça	67,16	2,69	0,044	0,39	0,020	0,54

Tabela 5.5 – Análise química da amostra de itabirito por faixa de tamanho

Abertura (mm)	Teores					
	%Fe	%SiO ₂	%P	%Al ₂ O ₃	%MnO	PPC
0,105	14,29	79,43	0,011	0,08	0,010	0,02
0,075	16,78	75,82	0,010	0,09	0,004	0,07
0,053	19,28	72,24	0,007	0,08	0,002	0,10
0,044	21,13	69,59	0,013	0,07	0,002	0,10
0,037	21,63	68,94	0,008	0,04	0,001	0,08
-0,037	56,20	18,87	0,021	0,31	0,010	0,41

Tabela 5.6 – Análise química acumulada da amostra de itabirito por faixa de tamanho

Abertura (mm)	Teores acumulados					
	%Fe	%SiO ₂	%P	%Al ₂ O ₃	%MnO ₂	PPC
0,105	14,29	79,43	0,011	0,08	0,010	0,02
0,075	16,17	76,71	0,010	0,09	0,005	0,06
0,053	17,36	75,00	0,009	0,08	0,004	0,07
0,044	17,88	74,25	0,010	0,08	0,004	0,08
0,037	19,60	71,81	0,009	0,06	0,003	0,08
-0,037	35,70	48,54	0,170	0,01	0,010	0,23
cabeça	38,16	44,97	0,210	0,02	0,010	0,21

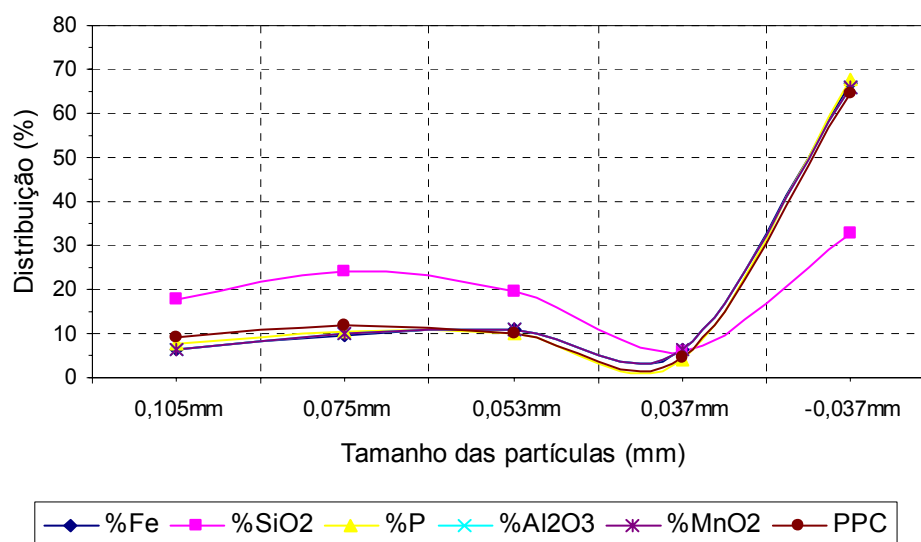


Figura 5.3 – Análise granuloquímica da amostra de hematita

Pela análise da figura 5.3 foi observado que as altas distribuições na fração menor que 0,037mm são atribuídas à grande proporção de material nessa faixa, cerca de 52% da amostra. A sílica apresenta uma distribuição relativamente constante em torno de 20% até a malha de 0,053mm. Os demais analitos apresentaram comportamento semelhante, indicando uma possível correlação entre eles, se concentrando na fração menor que 0,037mm.

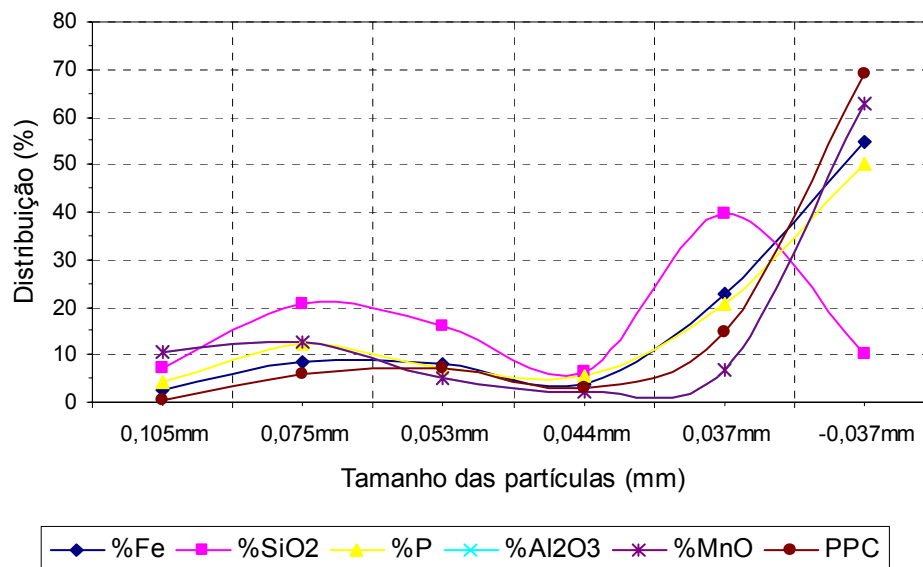


Figura 5.4 – Análise granuloquímica da amostra de itabirito

Tanto na amostra de hematita quanto na de itabirito, os componentes Fe, P, Al₂O₃ e MnO, além da PPC, apresentam distribuições bem semelhantes. Eles estão distribuídos em pequenas proporções até a granulometria de 0,037mm, malha em que começam a exibir uma maior distribuição. Abaixo desse tamanho, representam mais de 50% de todos eles. A sílica, até o tamanho de 0,044mm, também apresenta distribuição semelhante aos demais analitos e oscila em torno de 15%. Apresenta uma maior concentração na fração retida na malha de 0,037mm, a partir da qual, sua distribuição diminui significativamente.

5.2 Análises mineralógicas

Foram analisadas as frações menores que 0,037mm da amostra de hematita e de itabirito e uma alíquota do total de cada amostra, com objetivo de verificar a composição mineralógica qualitativa das mesmas.

Essas análises foram conduzidas para verificar a possível presença de outros óxidos de ferro, que não da hematita, além de outros minerais comumente encontrados nos minérios de ferro da região. Os resultados são apresentados na figura 5.5.

Na amostra de hematita foi detectada uma pequena quantidade de quartzo que diminuiu na fração -0,037mm na alíquota representativa do total. Nessa fração, foi ainda observada uma pequena quantidade de goethita.

A amostra de itabirito apresentou resultados semelhantes, sendo que a quantidade de quartzo foi, obviamente, muito maior do que na amostra de hematita. A goethita também foi detectada em pequenas proporções na fração -0,037mm.

Amostra		Concentração		
		alta	baixa	traço
"Hematita"	cabeça	hematita	quartzo	ND
	-0,037mm	hematita	ND	quartzo e goethita
"Itabirito"	cabeça	quartzo e hematita	ND	ND
	-0,037mm	quartzo e hematita	ND	goethita

Figura 5.5 – Mineralogia das amostras utilizadas nos ensaios

5.3 Testes de flotação

Nos testes de flotação com as amostras de hematita foram avaliados a recuperação no afundado e a constante cinética de flotação das amostras classificadas como hematita. Tanto nos testes com utilização de poliacrilamidas, quanto na sua ausência, foram adicionados 450g/t de amido e 45g/t de amina.

Os resultados apresentados na figura 5.6 indicaram que a utilização de floclantes sintéticos diminuiu a recuperação do material no afundado e que, quanto maior a dosagem, maior era a perda de material no flotado. Esse resultado fez com que, novos testes, mostrados nas figura 5.7 e 5.8, fossem realizados em diferentes condições hidrodinâmicas.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram que as condições hidrodinâmicas da polpa no condicionamento afetam fortemente a recuperação no afundado. É possível observar

que o condicionamento do floculante sintético deve ser feito em condições hidrodinâmicas menos severas, pois polímeros de cadeias longas exibem a tendência de se partir quando em condições turbulentas, perdendo a sua capacidade de agir como floculante. Uma solução para esse problema seria a utilização conjunta de floculantes sintéticos de baixo e alto peso molecular, pois sabe-se que isto aumentaria a resistência dos flocos (YAN et al, 2004). O amido, por sua vez, necessita de condições mais turbulentas, que propiciam maior probabilidade de contato entre partícula e molécula e conseqüente adsorção. Outra importante observação é que a variação da velocidade de rotação na flotação não acarreta aumento significativo da recuperação do afundado. Apesar de pequena, a diferença de recuperação na flotação a 1250rpm e a 1500rpm pode ser atribuída ao arraste de partículas para o flotado devido a um maior volume de bolhas.

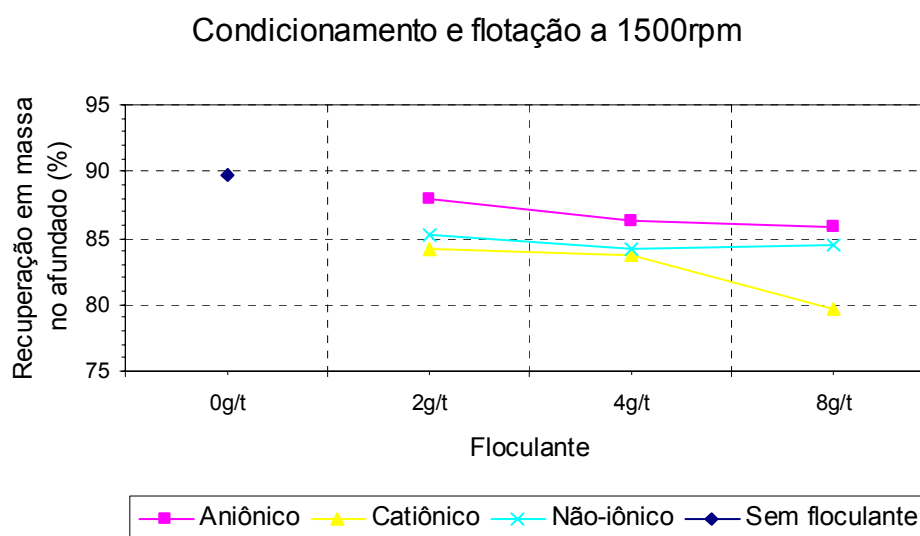


Figura 5.6 – Recuperação em função da dosagem de floculante a 1500rpm

Desse modo, foram realizados novos testes, com o condicionamento em circunstâncias hidrodinâmicas menos severas. Analisando a figura 5.9, observa-se que as recuperações obtidas ficaram muito abaixo dos valores obtidos em outros testes. A única exceção ocorreu para altas dosagens de floculante. Os flocos formados nessas condições exibiam um tamanho que impedia sua flotação. Ou seja, não ocorreu melhora na performance do amido. O baixo desempenho dos testes sem amido deve ser atribuído a um condicionamento ineficiente desse reagente. Os resultados dos testes realizados em condições hidrodinâmicas intermediárias, figura

5.10, mostram que mesmo em altas dosagens o desempenho com o uso de floculantes não é significativamente melhor do que na sua ausência.

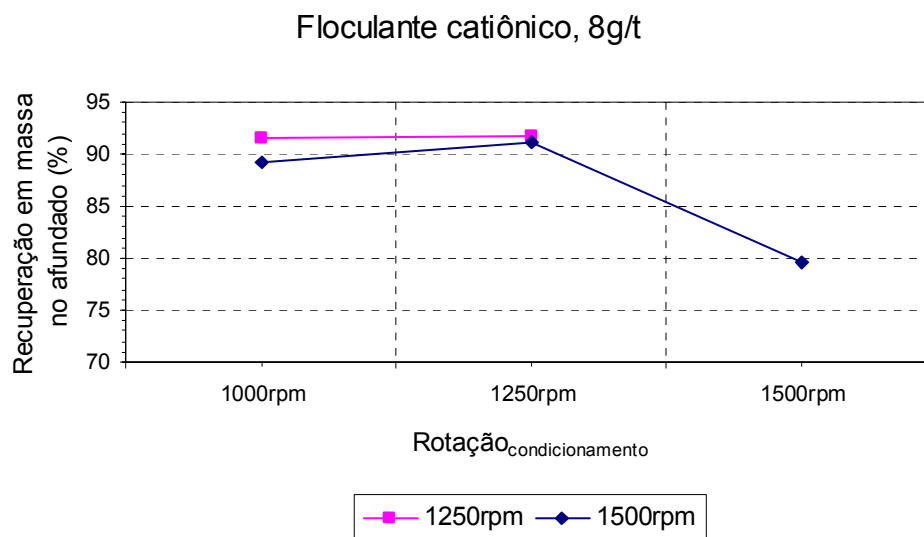


Figura 5.7 – Influência da velocidade de rotação no condicionamento e na flotação, com uso de amido e poliacrilamida catiônica

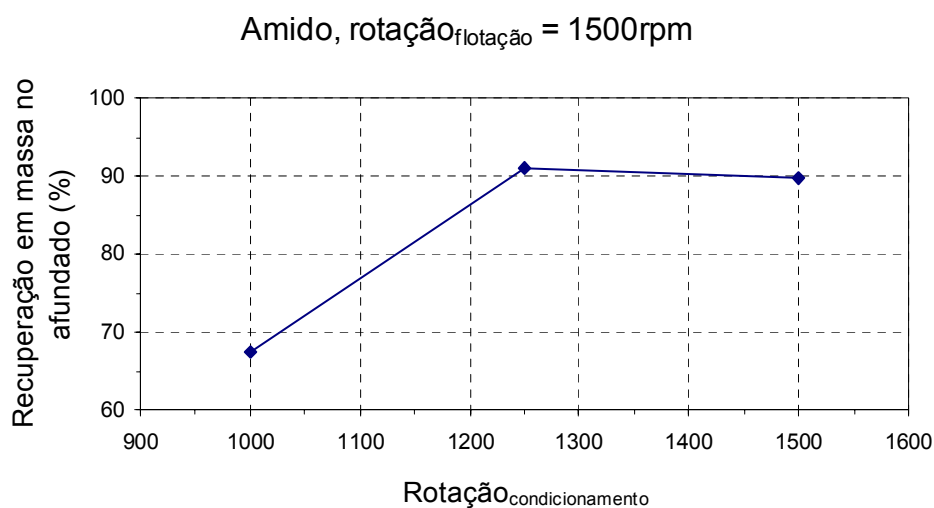


Figura 5.8 – Influência da velocidade de rotação no condicionamento e na flotação, somente com o uso de amido

Também, foram realizados testes com o objetivo de se estabelecer uma ordem de adição do amido e das poliacrilamidas. Os resultados, apresentados na figura 5.11,

mostram que para se atingir maiores recuperações os floculantes sintéticos devem ser adicionados anteriormente ao amido. A adição inicial do amido causa um forte aumento no pH da solução, devido à presença da soda usada na sua gelatinização. O aumento no pH causa um aumento no grau de dispersão da polpa. Por isso, é de se esperar que a formação de flocos, pelas poliacrilamidas, seja dificultada quando o amido é adicionado anteriormente ao floculante.

Condicionamento a 1000rpm e flotação a 1500rpm

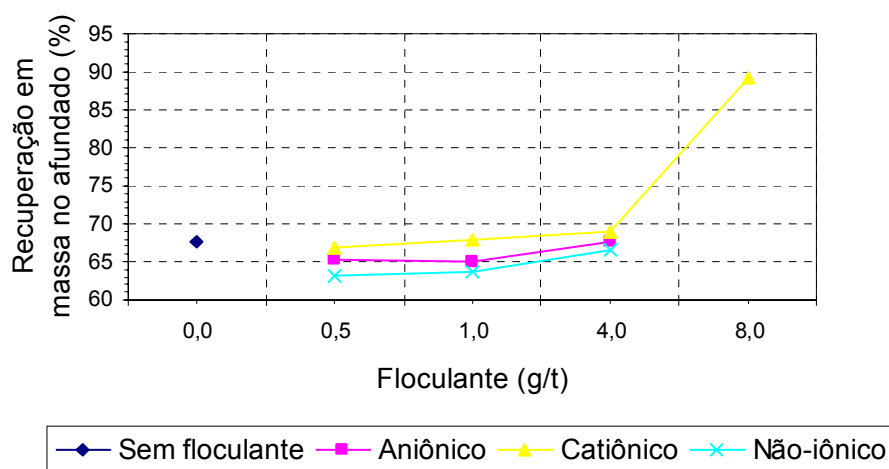


Figura 5.9 – Recuperação em função da dosagem de floculante com condicionamento a 1000rpm e flotação a 1500rpm

Condicionamento a 1250rpm e flotação a 1500rpm

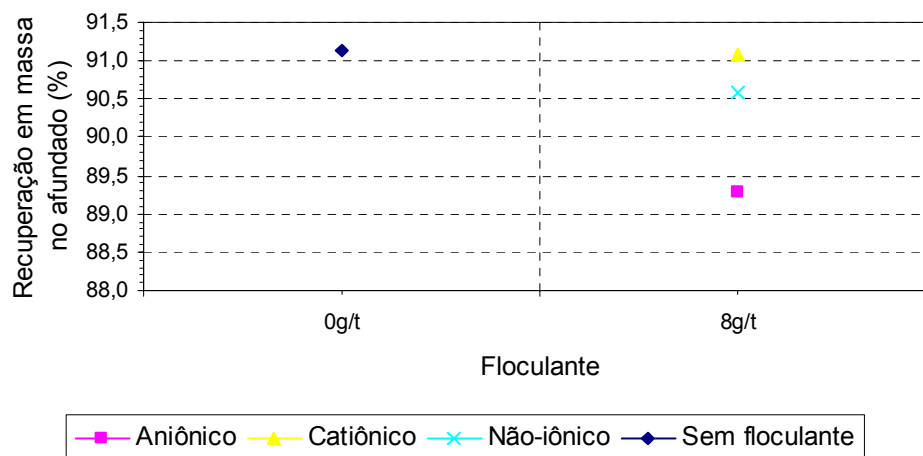


Figura 5.10 – Recuperação em função da dosagem de floculante com condicionamento a 1250rpm e flotação a 1500rpm

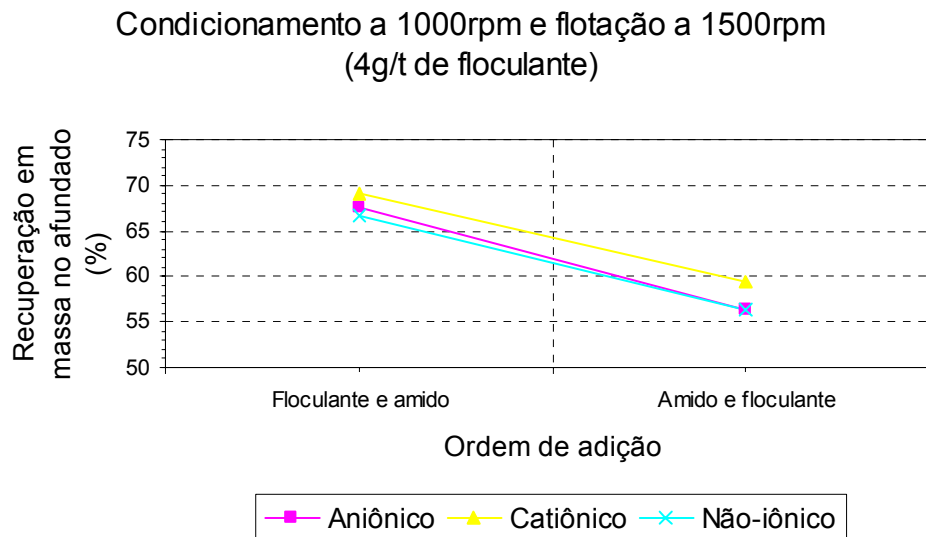


Figura 5.11 – Influência da ordem de adição do reagente

Foi observado nas figuras 5.12, 5.13 e 5.14 que a análise dos resultados de cinética leva às mesmas conclusões já citadas ao analisar a recuperação mássica, ou seja, testes realizados com amido exibem melhores resultados do que aqueles em que há adição de poliacrilamidas. Em se tratando de uma flotação reversa, em que o material é quase todo constituído pelo mineral útil, é importante observar que é desejável a minimização das constantes cinéticas, condição essa obtida para os casos em que houve somente adição de amido.

Os resultados obtidos necessitam de um estudo mais detalhado para a completo entendimento dos mecanismos atuantes no processo. Porém, com base na literatura consultada é possível propor algumas explicações para os resultados encontrados.

A molécula de amido em solução aquosa apresenta carga negativa, logo a melhor performance do flocculante catiônico pode ser atribuída à sua carga, ou seja, a uma maior afinidade entre estas moléculas. Um estudo de adsorção do amido na amostra mineral pré-condicionada com os flocculantes indicaria se os flocculantes estão recobrando a superfície mineral e atraindo as moléculas de amido, no caso do catiônico, ou repelindo, no caso dos demais flocculantes.

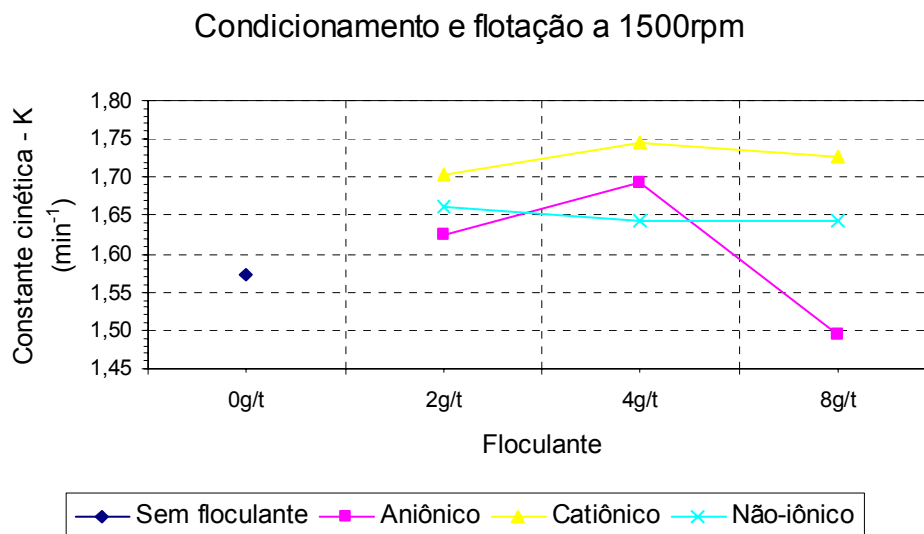


Figura 5.12 – Cinética de flotação em função da dosagem de flocculante a 1500rpm

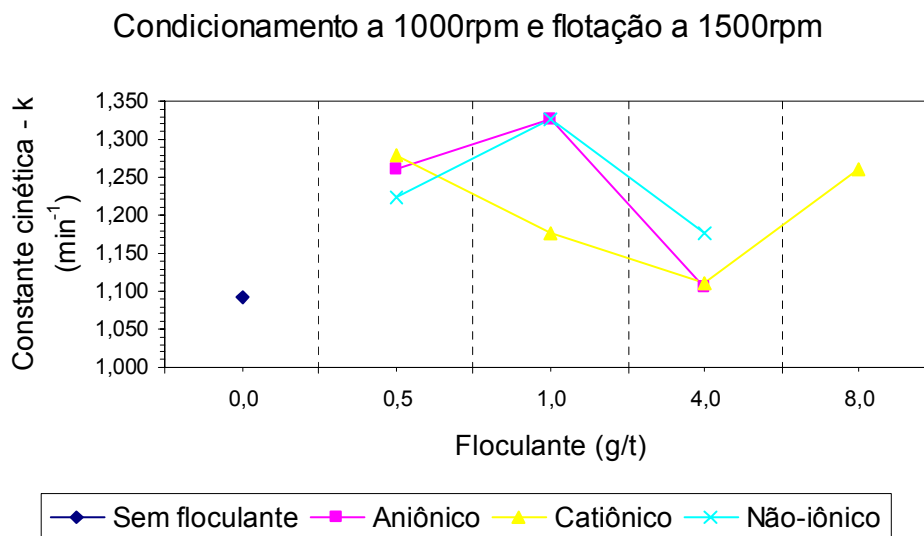


Figura 5.13 – Cinética de flotação em função da dosagem de flocculante com condicionamento à 1000rpm e flotação a 1500rpm

Assim, se todos os flocculantes estiverem agindo da mesma forma, quanto à repulsão ou atração das moléculas de amido, a explicação poderia estar na forma dos flocos. Os flocos formados pelos flocculantes aniônico e não-iônico podem estar apresentando uma configuração que favoreceria o seu encaminhamento para a região de espuma por um dos seguintes mecanismos: adesão da bolha de ar na fase

sólida, aprisionamento da bolha de ar no interior da estrutura do floco durante sua ascensão, adsorção das bolhas de ar na estrutura do floco na formação do mesmo e formação da bolha de ar no interior do floco.

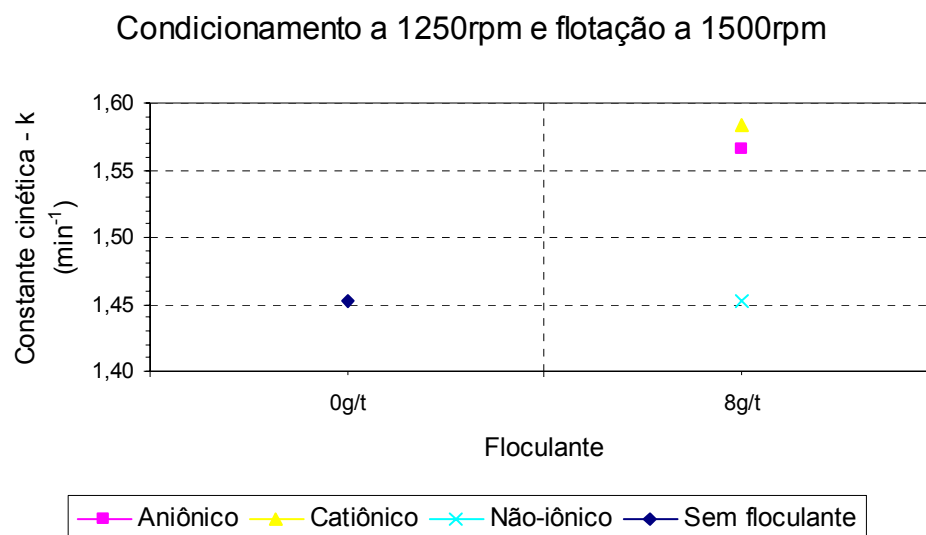


Figura 5.14 – Cinética de flotação em função da dosagem de flocoante com condicionamento à 1250rpm e flotação a 1500rpm

O grande número de variáveis que influenciam fortemente a floculação seletiva, assim como a flotação, e o fato de que esses testes foram realizados em condições não otimizadas poderiam estar contribuindo negativamente para o desempenho dos testes.

Essas três hipóteses foram investigadas e serão discutidas nos próximos tópicos.

5.4 Testes de sedimentação

Os resultados dos testes de sedimentação na amostra de hematita e no itabirito estão ilustrados nas figuras 5.15 e 5.16. A porcentagem de sólidos em peso da polpa foi de 42%. O pH da polpa foi medido antes e depois da adição dos reagentes, sendo que não houve alteração após adição das poliacrilamidas e o pH mudou de 6,0 para 10,5 após adição de amido.

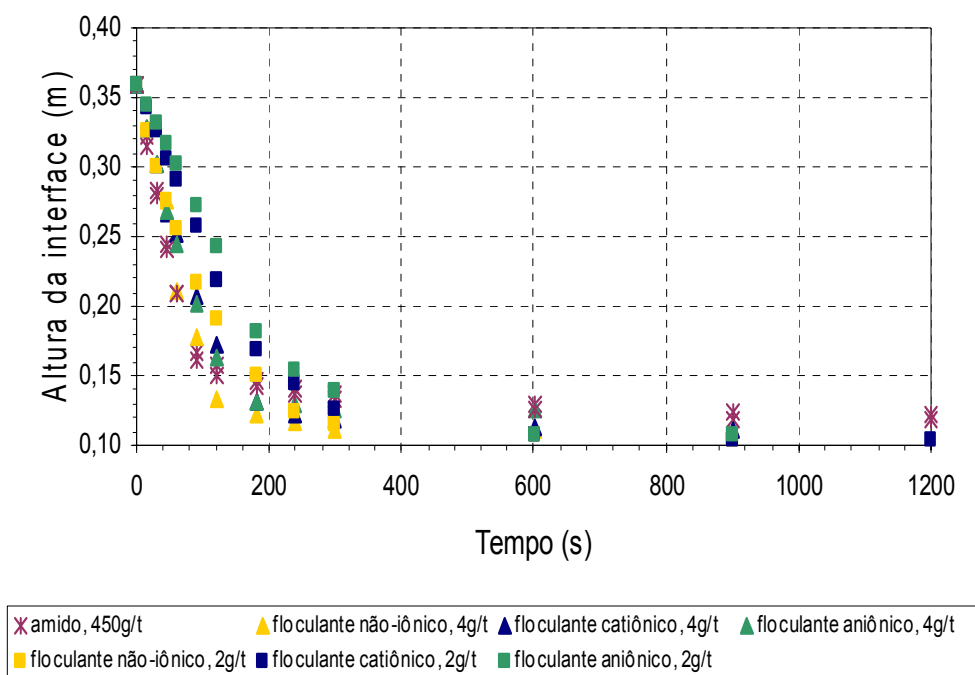


Figura 5.15 – Testes de sedimentação com hematita

Esses gráficos de sedimentação mostram resultados semelhantes, nos quais a velocidade de sedimentação do flocculante não-iônico foi superior à dos demais flocculantes, sendo a do catiônico a menor. O amido também apresentou alta velocidade de sedimentação, sendo superior a de alguns flocculantes nas dosagens testadas. Possivelmente isso ocorreu devido à formação de flocos mais densos, ou seja, menos hidratados.

Devido à proximidade entre valores da velocidade de sedimentação, é possível afirmar que, para as dosagens estudadas, os tamanhos dos flocos são semelhantes.

Nos testes em que foram usados poliacrilamidas, o sobrenadante obteve ótima clarificação para todas as dosagens testadas. Contudo, os testes realizados com amido apresentaram sobrenadantes de péssima clarificação, que permaneceram inalterados por horas. A figura 5.17 ilustra o resultado de testes com o uso de amido e outro com o uso de poliacrilamida, após 1 hora do início do teste.

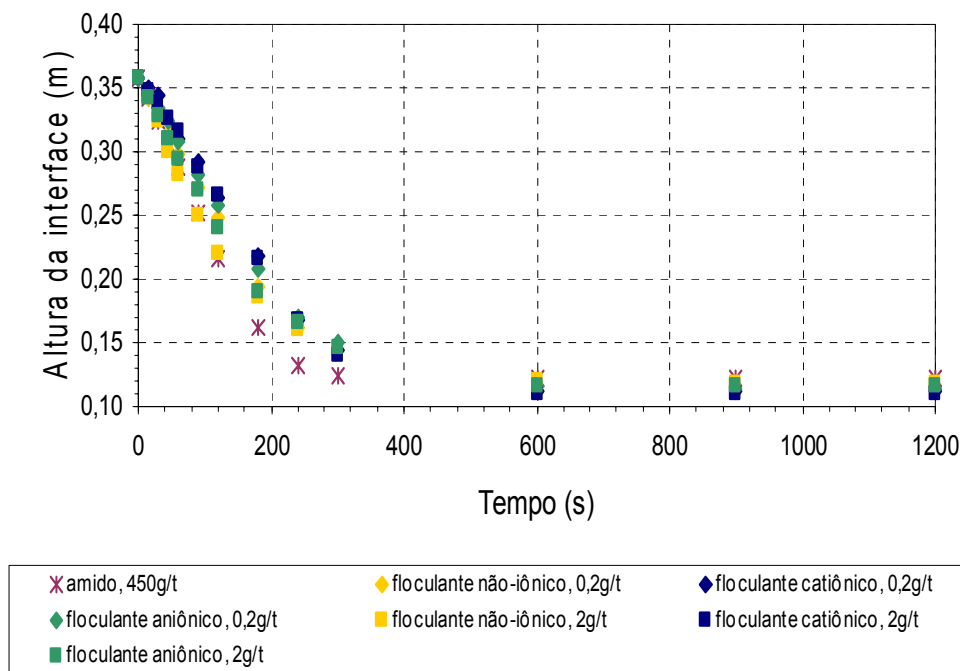


Figura 5.16 – Testes de sedimentação com itabirito

O mau desempenho na clarificação do sobrenadante pode ser atribuído à ineficiência de adsorção do amido nas partículas de menor granulometria e/ou ao alto grau de dispersão da polpa, ocasionado pela adição de amido gelatinizado com soda.

Foram realizados testes com o amido, em diferentes condições, para verificar a influência do pH na qualidade do sobrenadante. Os resultados estão ilustrados na figura 5.18. No primeiro teste, seguiu-se o procedimento padrão, no qual a solução gelatinizada de amido é adicionada à polpa, o pH do meio é medido e o teste é, então, realizado. No segundo, a solução de amido foi adicionada e o pH da polpa ajustado para 6, antes da realização do teste. No último, a solução de amido teve seu pH ajustado para 6, antes de sua adição na proveta, resultando num pH de polpa igual a 5,5.

Não se observou uma mudança significativa nas velocidades de sedimentação. Porém foi obtida uma melhora substancial na clarificação do sobrenadante com o uso da solução de amido em pH igual 6,0, como pode ser visto na figura 5.19. Isso indica que a péssima clarificação obtida no teste em pH 10,5 deve ser atribuída ao alto grau de dispersão da polpa, ocasionado pela forte repulsão entre as partículas minerais.



Figura 5.17 – Testes de sedimentação com hematita e 2g/t de poliacrilamida catiônica ou 450g/t de amido

Os testes de sedimentação realizados com as amostras de hematita mostraram, ainda, que o aumento na dosagem de poliacrilamida de 2g/t para 4g/t causa um aumento na altura do ponto de compressão. Mas, mesmo assim, nos casos dos flocculantes catiônico e não-iônico, essa altura não é maior do que a obtida com o amido. Esses resultados estão apresentados na figura 5.20.

A altura do ponto de compressão, num ensaio de sedimentação, é influenciada diretamente pela forma dos flocos. Flocos menos densos, ou seja, com maior quantidade de água, são maiores e tendem a exibir maiores alturas de compressão. Esses flocos também possuiriam, a princípio, uma maior probabilidade de arraste para o flotado. Desse modo, supõe-se que altas dosagens de flocculantes causariam a formação de flocos maiores e que seriam mais facilmente arrastados para o flotado.

Comparando esses resultados com aqueles da figura 5.15, observa-se que, no caso das poliacrilamidas, a velocidade de sedimentação é inversamente proporcional à altura do ponto de compressão.

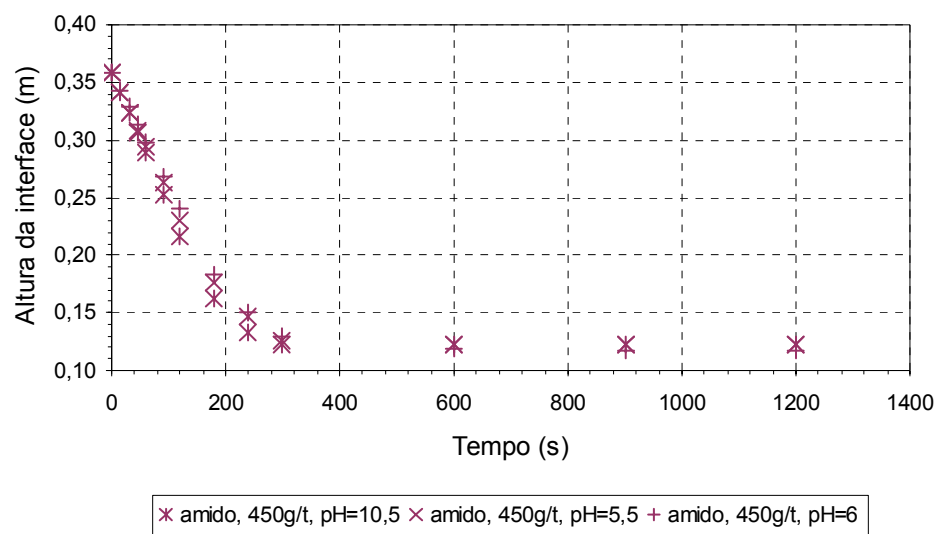


Figura 5.18 – Testes de sedimentação com amido



Figura 5.19 – Testes de sedimentação com amido (da esquerda para direita: teste padrão, teste com ajuste de pH da polpa após adição de amido e teste com ajuste de pH da solução de amido)

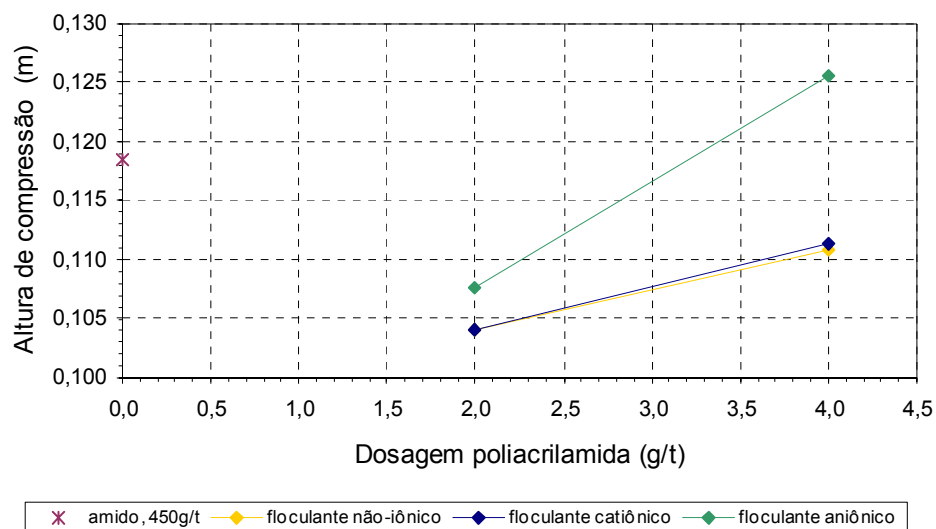


Figura 5.20 – Altura dos pontos de compressão

5.5 Medidas de adsorção

A área específica superficial, medida pelo método BET, e densidade da amostra utilizada nos ensaios de adsorção foram $6,7419\text{m}^2/\text{g}$ e $5,2\text{g}/\text{cm}^3$, respectivamente.

Foram realizados quatro ensaios de adsorção, um somente com amido e outros com amido e poliacrilamida catiônica, não-iônica ou aniônica. Essas amostras tiveram os seus espectros de transmissão no infravermelho analisados para determinação da adsorção de amido. Também tiveram os espectros analisados amostras constituídas das substâncias puras: hematita, amido, poliacrilamida catiônica, não-iônica e aniônica.

As bandas utilizadas na determinação do amido foram caracterizadas por PAVLOVIC (2002) como sendo atribuídas à deformação angular CH_2 (1460cm^{-1}), ao estiramento $\text{C} - \text{O} - \text{C}$ (1160cm^{-1}) e ao estiramento $\text{C} - \text{O}$ acoplado com estiramento $\text{C} - \text{C}$ e deformação $\text{C} - \text{O} - \text{H}$ (1080cm^{-1} e 1020cm^{-1}).

Os espectros de transmissão das poliacrilamidas, ilustrados na figura 5.21, não apresentaram vales nas mesmas bandas das do amido, ou seja, os vales utilizados

para comprovação da adsorção de amido nas amostras não foram causados pelas poliacrilamidas.

A análise das figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 permite concluir que houve adsorção do amido nas amostras de hematita em que não houve pré-condicionamento com poliacrilamidas e na que foi pré-condicionada com poliacrilamida catiônica, sendo que, aparentemente, não ocorreu alteração na quantidade de amido adsorvido na amostra com poliacrilamida catiônica. Nas amostras pré-condicionadas com as demais poliacrilamidas, há uma forte diminuição dos vales característicos da adsorção do amido. Isso é mais facilmente visualizado através da figura 5.26.

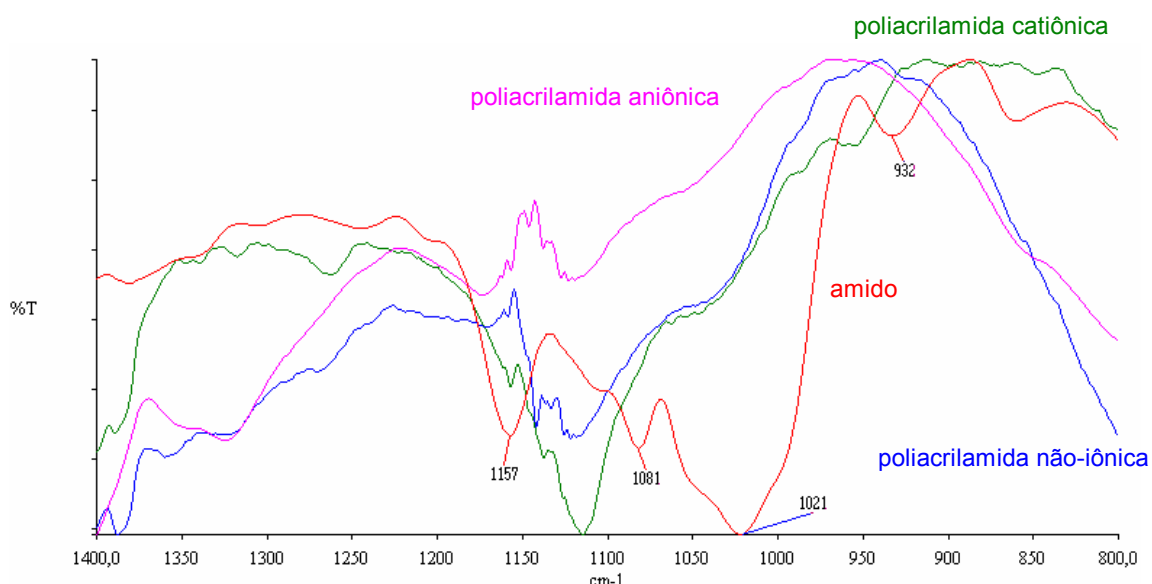


Figura 5.21 – Espectros de transmissão no infravermelho das poliacrilamidas catiônica, não-iônica e aniônica

O comportamento observado na amostra com poliacrilamida catiônica poderia, a princípio, ser atribuído à atração eletrostática entre as moléculas de amido e poliacrilamida. Contudo, a amostra foi lavada depois dos ensaios de adsorção e, com isso, retirado todo o amido que não estivesse adsorvido à superfície mineral por interações mais fortes. Desse modo supõe-se que ocorreu uma atração química entre o amido e a poliacrilamida catiônica que não ocorreu nas demais poliacrilamidas.

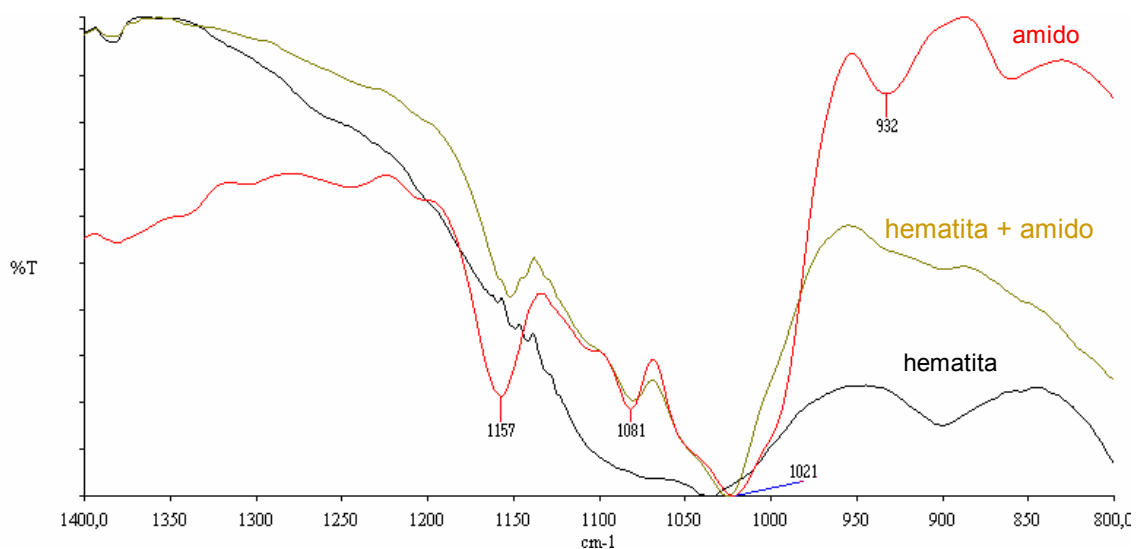


Figura 5.22 – Espectros de transmissão no infravermelho da hematita pura, condicionada com amido e do amido

As altas dosagens de poliacrilamidas utilizadas nos ensaios de adsorção devem ter causado uma grande cobertura da superfície mineral, ocasionando, nos casos da utilização das poliacrilamidas não-iônica e aniônica, a diminuição na adsorção do amido.

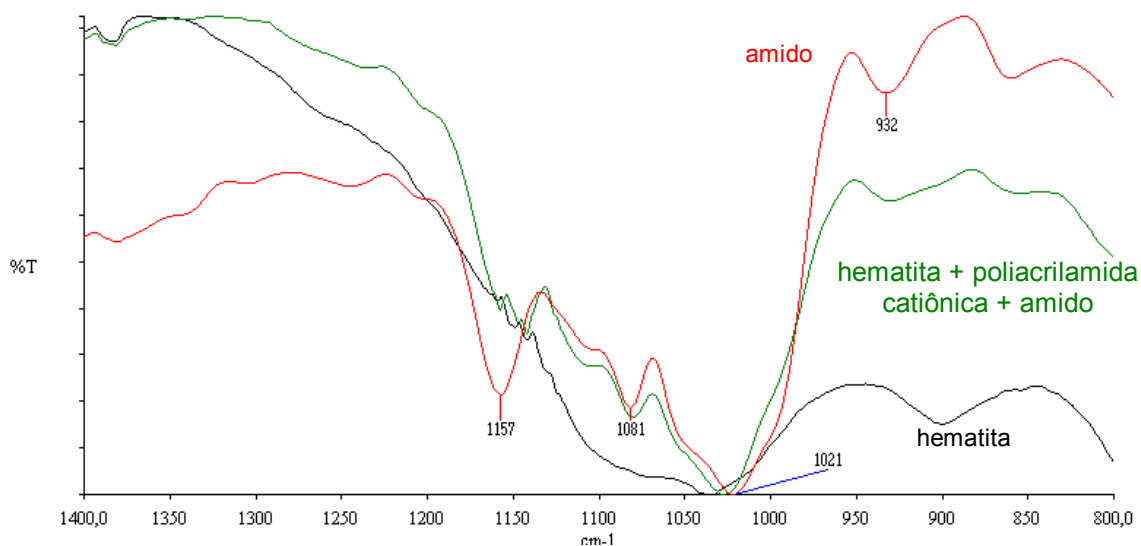


Figura 5.23 – Espectros de transmissão no infravermelho da hematita pura, condicionada com poliacrilamida catiônica e amido e do amido

Sabe-se que é necessário que ocorra uma grande adsorção do amido para que este seja detectado pela técnica utilizada. Sendo assim, mesmo que em menores

quantidades, o amido presente nas amostras pré-condicionadas com poliacrilamidas não-iônica e aniônica pode ser suficiente para causar hidrofobização da superfície mineral.

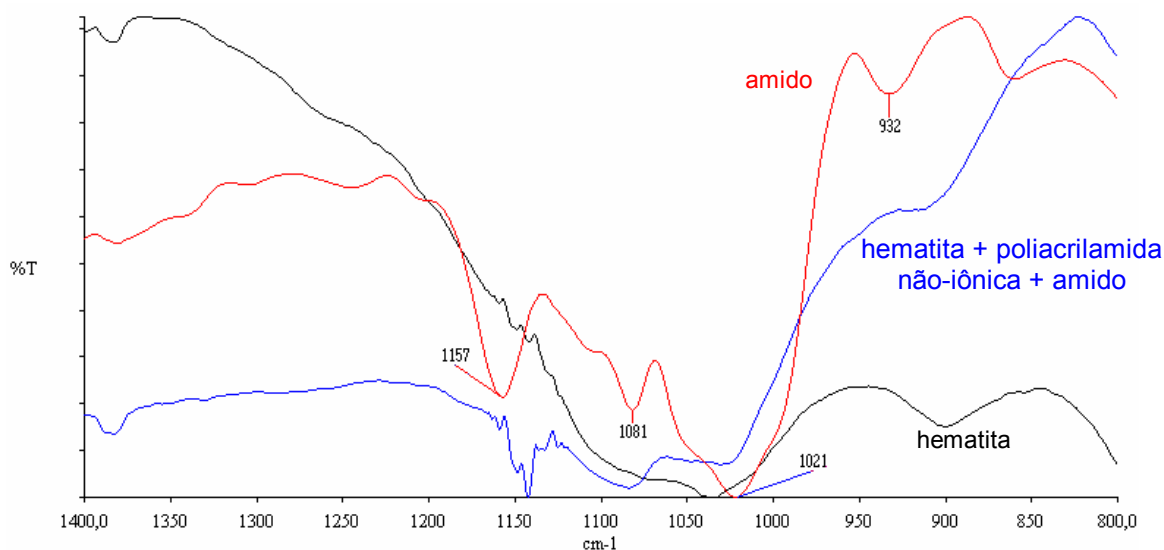


Figura 5.24 – Espectros de transmissão no infravermelho da hematita pura, condicionada com poliacrilamida não-iônica e amido e do amido

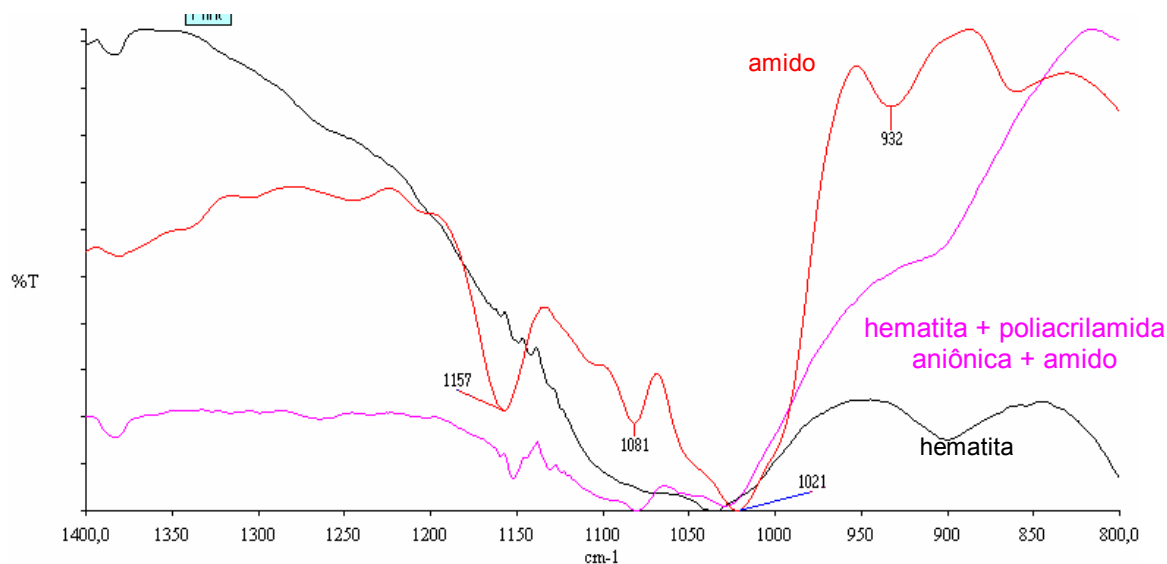


Figura 5.25 – Espectros de transmissão no infravermelho da hematita pura, condicionada com poliacrilamida aniônica e amido e do amido

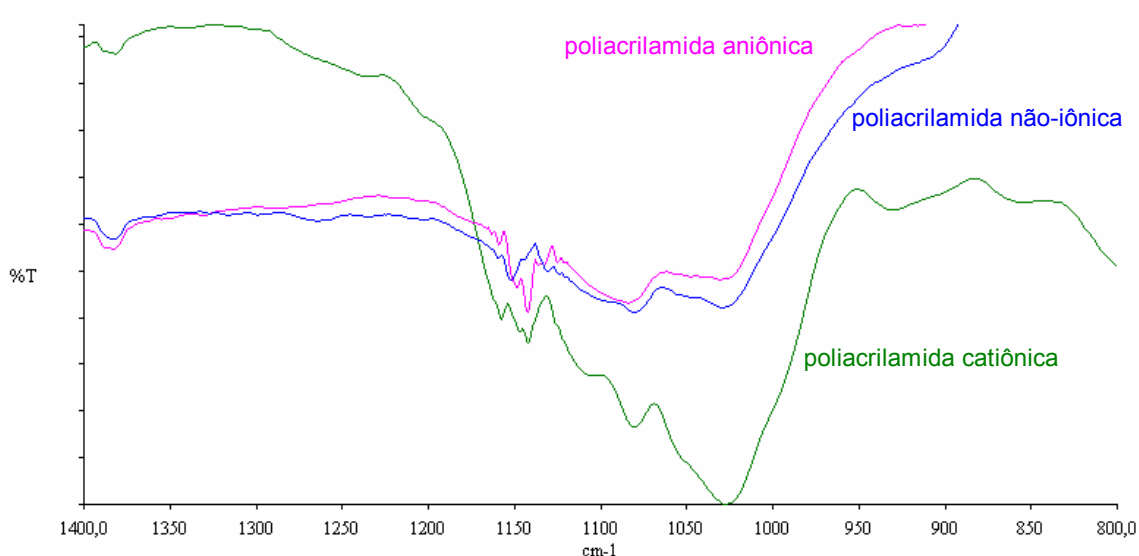


Figura 5.26 – Espectros de transmissão no infravermelho da hematita condicionada com poliacrilamida catiônica, não-iônica e aniônica

5.6 Planejamento e análise dos experimentos

Como mencionado no item 4.8, a metodologia adotada permitiu a avaliação de um grande número de variáveis com a execução de um número relativamente pequeno de testes.

Os níveis dos fatores foram escolhidos com base na prática industrial. Eles são:

- dosagem de coletor, 60 e 120g/t;
- dosagem de depressor, 250 e 500g/t;
- dosagem de floculante, 2 e 10g/t;
- pH de condicionamento do floculante, 6,0 e 10,0;
- pH de flotação, 9,0 e 10,5;
- agitação do condicionamento, 1000 e 1300rpm;
- agitação na flotação, 1300 e 1500rpm;
- porcentagem de sólidos em peso no condicionamento, 50 e 70%;
- porcentagem de sólidos em peso na flotação, 30 e 50%.

No caso dos experimentos sem uso de poliacrilamidas, os fatores pH de condicionamento, agitação do condicionamento e na flotação, porcentagem de

sólidos em peso no condicionamento e na flotação foram fixados em, respectivamente, 6,0 (pH natural da polpa), 1500rpm, 60% e 40%.

Foram utilizadas amostras de itabirito para os testes de flotação. Deve-se ressaltar que o material é muito pobre, ou seja, possui grande quantidade de quartzo.

Os resultados dos experimentos estão apresentados nas tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10.

Os resultados mostram que, nas condições praticadas nos ensaios, o quartzo foi facilmente flotado, pois todos os testes apresentaram reduzido teor de sílica no concentrado quando comparados ao teor da alimentação. Isso deve ser atribuído às altas dosagens de coletor, baixas dosagens de depressor, características do mineral portador de sílica na amostra e da polpa. A recuperação metalúrgica, por sua vez, variou muito mais amplamente.

Os resultados foram analisados utilizando-se o software estatístico Statgraphics Plus for Windows 3.0. Nesse estudo foram utilizados gráficos de Pareto dos efeitos, como o apresentado na figura 5.27, nos quais quanto maior o efeito, maior é a influência do fator na resposta. Gráficos dos efeitos principais dos fatores também foram utilizados para determinação dos limites que apresentaram os melhores resultados. A figura 5.28 ilustra um desses gráficos. Nele observa-se que as maiores recuperações foram obtidas para os limites superiores de dosagem de amido, pH de condicionamento e de flotação e para os limites inferiores da dosagem de coletor e de floculante, agitação do condicionamento e na flotação, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e na flotação.

Esse raciocínio foi feito para demais respostas e experimentos. O resumo dos resultados é apresentado nas tabelas 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14. Os limites para otimização dos resultados foram codificados em -1, nível mínimo do fator, e +1, nível máximo do fator.

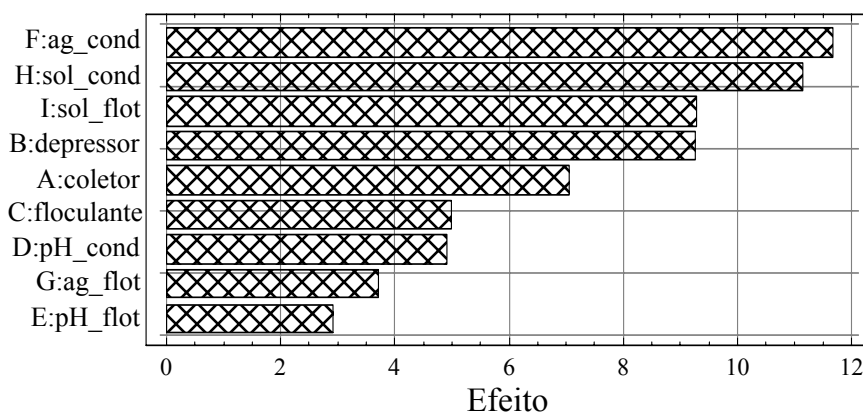


Figura 5.27 – Gráfico de pareto dos efeitos do experimento com poliacrilamida catiônica para a recuperação metalúrgica

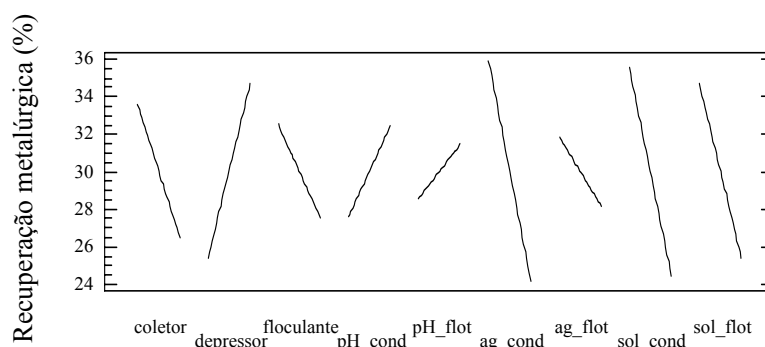


Figura 5.28 – Gráfico dos efeitos do experimento com poliacrilamida catiônica para a recuperação metalúrgica

Os experimentos realizados com as poliacrilamidas catiônica e não-iônica apresentaram melhores resultados de recuperações metalúrgicas. A poliacrilamida não-iônica foi utilizado no teste com maior recuperação.

Em todos os experimentos, foi possível obter concentrados de boa qualidade. Os menores valores foram obtidos nos experimentos sem utilização de poliacrilamidas e com a poliacrilamida aniônica.

Tabela 5.7 – Experimento com poliacrilamida catiônica

Teste	Fatores											Respostas	
	Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	Floculante (g/t)	pH condicionamento	pH flotação	agitação condicionamento (rpm)	agitação flotação (rpm)	sólidos condicionamento (%)	sólidos flotação (%)	Recuperação metalúrgica (%)	SiO ₂ no concentrado (%)		
Plackett-Burman (catiônico)	1	90	375	6	8,00	9,75	1150	1400	60	40	35,69	2,62	
	2	120	500	2	10,00	9,00	1000	1300	70	50	33,39	3,10	
	3	120	500	2	10,00	10,50	1000	1500	50	30	49,05	2,55	
	4	120	250	10	6,00	9,00	1000	1500	70	50	6,59	4,04	
	5	60	500	10	10,00	9,00	1300	1500	50	50	27,70	2,24	
	6	60	500	2	6,00	9,00	1300	1500	70	30	28,97	2,95	
	7	60	250	2	10,00	10,50	1300	1300	70	50	18,44	1,93	
	8	60	500	10	6,00	10,50	1000	1300	50	50	44,12	1,16	
	9	60	250	2	6,00	9,00	1000	1300	50	30	43,18	2,31	
	10	60	250	10	10,00	10,50	1000	1500	70	30	34,64	1,61	
	11	120	250	10	10,00	9,00	1300	1300	50	30	27,42	1,61	
	12	120	250	2	6,00	10,50	1300	1500	50	50	17,90	1,94	
	13	120	500	10	6,00	10,50	1300	1300	70	30	20,51	3,45	
	14	90	375	6	8,00	9,75	1150	1400	60	40	32,92	2,56	

Tabela 5.8 – Experimento com poliacrilamida não-iônica

Teste	Fatores										Respostas	
	Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	Floculante (g/t)	pH condicionamento	pH flotação	agitação condicionamento (rpm)	agitação flotação (rpm)	sólidos condicionamento (%)	sólidos flotação (%)	Recuperação metalúrgica (%)	SiO ₂ no concentrado (%)	
Plackett-Burman (não-iônico)	1	90	375	6	8,00	9,75	1150	1400	60	40	31,66	1,75
	2	120	500	10	6,00	10,50	1300	1300	70	30	31,31	4,38
	3	120	250	10	10,00	9,00	1300	1300	50	30	29,41	5,26
	4	60	500	2	6,00	9,00	1300	1500	70	30	35,18	2,60
	5	60	250	2	6,00	9,00	1000	1300	50	30	37,15	2,98
	6	60	250	10	10,00	10,50	1000	1500	70	30	46,47	3,52
	7	60	500	10	6,00	10,50	1000	1300	50	50	41,01	1,56
	8	60	500	10	10,00	9,00	1300	1500	50	50	20,26	4,01
	9	120	500	2	10,00	9,00	1000	1300	70	50	26,74	2,81
	10	120	500	2	10,00	10,50	1000	1500	50	30	51,33	1,09
	11	120	250	2	6,00	10,50	1300	1500	50	50	21,19	2,47
	12	60	250	2	10,00	10,50	1300	1300	70	50	30,03	1,74
	13	120	250	10	6,00	9,00	1000	1500	70	50	8,96	4,81
	14	90	375	6	8,00	9,75	1150	1400	60	40	35,69	1,84

Tabela 5.9 – Experimento com poliacrilamida aniônica

Teste		Fatores									Respostas	
		Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	Floculante (g/t)	pH condicionamento	pH flotação	agitação condicionamento (rpm)	agitação flotação (rpm)	sólidos condicionamento (%)	sólidos flotação (%)	Recuperação metalúrgica (%)	SiO ₂ no concentrado (%)
Plackett-Burman (aniônico)	1	90	375	6	8,00	9,75	1150	1400	60	40	28,47	1,25
	2	120	250	10	10,00	9,00	1300	1300	50	30	27,38	1,86
	3	60	250	10	10,00	10,50	1000	1500	70	30	29,32	1,51
	4	120	500	2	10,00	10,50	1000	1500	50	30	40,41	1,74
	5	120	500	2	10,00	9,00	1000	1300	70	50	22,53	1,20
	6	60	500	10	6,00	10,50	1000	1300	50	50	33,72	0,96
	7	60	500	10	10,00	9,00	1300	1500	50	50	25,29	1,76
	8	60	250	2	10,00	10,50	1300	1300	70	50	22,06	1,56
	9	60	250	2	6,00	9,00	1000	1300	50	30	37,83	1,50
	10	120	250	2	6,00	10,50	1300	1500	50	50	21,14	2,83
	11	120	250	10	6,00	9,00	1000	1500	70	50	4,30	4,56
	12	60	500	2	6,00	9,00	1300	1500	70	30	34,07	2,06
	13	120	500	10	6,00	10,50	1300	1300	70	30	17,63	1,23
	14	90	375	6	8,00	9,75	1150	1400	60	40	26,98	1,17

Tabela 5.10 – Experimento sem poliacrilamida

Teste		Fatores			Respostas	
		Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	pH flotação	Recuperação metalúrgica (%)	SiO ₂ no concentrado (%)
Fatorial 2 ³ (sem floculante)	1	90	375	9,75	26,80	1,76
	2	60	500	10,50	43,51	0,97
	3	60	250	9,00	22,02	2,27
	4	120	250	10,50	15,94	1,61
	5	120	500	10,50	32,63	1,84
	6	120	250	9,00	20,64	1,35
	7	120	500	9,00	24,11	1,48
	8	60	500	9,00	33,35	1,66
	9	60	250	10,50	21,39	1,76
	10	90	375	9,75	29,21	1,61

A dosagem de floculante não figurou entre os quatro fatores mais influentes nos experimentos com poliacrilamida catiônica, porém, nos demais, ela possui grande influência. Nesses casos os melhores resultados foram obtidos para baixas dosagens de floculantes.

Comparando-se as tabelas 5.11, 5.12 e 5.13, foi observado que a dosagem de coletor aparece como um dos quatro fatores mais importantes para uma mesma resposta, no caso, teor de sílica no concentrado para todos os experimentos e que a porcentagem de sólidos na flotação também exibiu o mesmo comportamento para a recuperação metalúrgica. Ambos fatores apresentaram melhores resultados nos níveis inferiores.

Tabela 5.11 – Análise do experimento com poliacrilamida catiônica

Fatores mais influentes	1º	SiO ₂ %sol. cond. (-1)	RFe ag. cond. (-1)
	2º	coletor (-1)	%sol. cond. (-1)
	3º	pH flot. (+1)	%sol. flot. (-1)
	4º	pH cond. (+1)	depressor (+1)
	5º	depressor (-1)	coletor (-1)
	6º	ag. flot. (-1)	floculante (-1)
	7º	floculante (+1)	pH cond. (+1)
	8º	ag. cond. (+1)	ag. flot. (-1)
	9º	%sol. flot. (+1)	pH flot. (+1)
Melhor resultado		1,16	49,05

Apesar de não figurarem entre os fatores mais influentes para todos os experimentos, foi observado que, em todos eles, as melhores performances de recuperação metalúrgica e teor de sílica no concentrado foram obtidas para as seguintes situações: baixa porcentagem de sólidos no condicionamento, alta dosagem de amido e alto pH de condicionamento e flotação.

Tabela 5.12 – Análise do experimento com poliacrilamida não-iônica

		SiO ₂	RFe
Fatores mais influentes	1º	floculante (-1)	%sol. flot. (-1)
	2º	pH flot. (+1)	pH flot. (+1)
	3º	coletor (-1)	ag. cond. (-1)
	4º	depressor (+1)	coletor (-1)
	5º	ag. cond. (-1)	depressor (+1)
	6º	%sol. cond. (-1)	pH cond. (+1)
	7º	%sol. flot. (+1)	floculante (-1)
	8º	pH cond. (+1)	%sol. cond. (-1)
	9º	ag. flot. (+1)	ag. flot. (-1)
Melhor resultado		1,09	51,33

Tabela 5.13 – Análise do experimento com poliacrilamida aniônica

		SiO ₂	RFe
Fatores mais influentes	1º	ag. flot. (-1)	%sol. flot. (-1)
	2º	depressor (+1)	%sol. cond. (-1)
	3º	coletor (-1)	coletor (-1)
	4º	pH cond. (+1)	floculante (-1)
	5º	pH flot. (+1)	depressor (+1)
	6º	%sol. flot. (-1)	ag. cond. (-1)
	7º	%sol. cond. (-1)	pH cond. (+1)
	8º	floculante (-1)	pH flot. (+1)
	9º	ag. cond. (+1)	ag. flot. (-1)
Melhor resultado		0,96	40,41

Tabela 5.14 – Análise do experimento sem poliacrilamida

		SiO ₂	RFe
Fatores mais influentes	1º	interação coletor/pH flot.	depressor (+1)
	2º	interação coletor/depressor	coletor (-1)
	3º	depressor (-1)	interação depressor/pH flot.
	4º	pH flot. (-1)	pH flot. (+1)
	5º	coletor (-1)	interação coletor/depressor
	6º	interação depressor/pH flot.	interação coletor/pH flot.
Melhor resultado		0,97	43,51

Ao agrupar os fatores em relativos à química do processo (dosagem de coletor, de depressor e de floculante, pH de condicionamento e de flotação), e relativos às condições hidrodinâmicas da polpa (agitação do condicionamento e na flotação, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e na flotação), observa-se que as respostas dos experimentos com as poliacrilamidas iônicas foram mais influenciadas pelos fatores relativos às condições hidrodinâmicas da polpa, sendo o catiônico mais sensível às condições no condicionamento e o aniônico às condições na flotação.

Esses resultados indicam que as baixas recuperações encontradas nos testes iniciais se devem à realização dos mesmos em condições longe das ideais, pois alguns dos fatores que se mostraram muito significativos para o processo não foram analisados naqueles testes.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

1. Os resultados obtidos permitem concluir que a utilização de poliacrilamidas catiônicas e não-iônicas de alto peso molecular, na flotação catiônica reversa da amostra de minério de ferro, causam um aumento significativo na recuperação metalúrgica do processo de 5,5% e 7,8%, respectivamente. Em compensação, há um efeito negativo de pequeno porte, que é a perda na qualidade final do concentrado, aumentando o teor de sílica em torno de 0,19% e 0,12%, respectivamente. Esses aumentos estão expressos em termos absolutos. É evidente que a eventual ocorrência destes valores em escala industrial deve ser precedida de um balanço custo/benefício antes da adoção desta linha de processo.
2. Poliacrilamidas aniônicas foram inócuas para o desempenho da flotação.
3. Comparativamente à flotação convencional, a flotação na presença de poliacrilamida não-iônica se mostrou como a alternativa mais promissora.
4. Flocos formados com baixas dosagens de poliacrilamidas obtiveram velocidade de sedimentação e altura de compressão semelhantes aos flocos formados pelo amido, indicando que esses não possuem tamanhos diferenciados.
5. A amostra mineral pré-condicionada com as poliacrilamidas aniônica e não-iônica exibiu uma diminuição na quantidade de amido adsorvido, quando comparada à amostra pré-condicionada com poliacrilamida catiônica e sem pré-condicionamento com poliacrilamidas.
6. A flotação reversa de minério de ferro deve ser conduzida com baixas dosagens de poliacrilamidas, por volta de 2g/t. Altas dosagens prejudicam seu desempenho pela formação de flocos maiores, que exibem maior facilidade de arraste e/ou por recobrimento excessivo da superfície mineral, resultando em inibição da ação dos outros reagentes.

7. A ordem de influência dos fatores estudados (dosagem de coletor, dosagem de depressor, dosagem de floculante, pH de condicionamento do floculante, pH de flotação, agitação do condicionamento, agitação na flotação, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e porcentagem de sólidos em peso na flotação) alterou significativamente com a mudança do caráter iônico da poliacrilamida.
8. A flotação na presença de poliacrilamidas exibiu melhores performances para baixa porcentagem de sólidos em peso no condicionamento (50%), alta dosagem de amido (500g/t) e alto pH de condicionamento (10,0) e flotação (10,5).
9. Em todos os experimentos com poliacrilamidas, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e dosagem de coletor se mostraram fatores de grande importância na recuperação metalúrgica e no teor de sílica no concentrado, respectivamente.
10. As condições hidrodinâmicas do condicionamento e da flotação têm forte influência no desempenho da flotação na presença de flocos formados por poliacrilamidas, conforme evidenciado pela melhora na performance ocasionada pela manipulação desses parâmetros, principalmente na recuperação metalúrgica.

CAPÍTULO 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Verificar o efeito de íons na polpa da flotação de minério de ferro com poliacrilamidas de alto peso molecular.
2. Investigar o uso de poliacrilamidas de alto peso molecular na flotação de minérios de ferro de diferentes composições químicas e mineralógicas.
3. Estudar a aplicação de outros floculantes, sintéticos ou naturais e de diferentes pesos moleculares, na flotação de minérios de ferro.
4. Estudar misturas de floculantes, para avaliar a existência de efeitos sinérgicos sobre o desempenho da flotação.
5. Estudar os mecanismos de interações desses floculantes entre si e com as partículas minerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APLAN, F. F., FUERSTENAU, D. W. (1962) **Principles of Nonmetallic Mineral Flotation**. In: FUERSTENAU, D. W. Froth Flotation - 50th Anniversary Volume. New York: AIME, c.7, p.170-214.
- ARAUJO, A. C. (1982) **Influência de íons de alumínio e caolinita na flotação catiônica reversa de quartzo e hematita**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- ARAUJO, A. C. (1988) **Starch Modifications of the Flocculation and Flotation of Apatite**. Vancouver: UBC - The University of British Columbia, PhD Thesis.
- ARAUJO, A. C., PERES, A. E. C. (1995) **Froth flotation: relevant facts and the Brazilian case**. Série Tecnologia Mineral, 70. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq.
- ATTIA, Y. A., YU, S. (1988) **Entrapment and entrainment in selective flocculation process, Part 2: Possible methods for minimization of entrapment and entrainment**. In: ATTIA, Y. A., MOUDGIL, B. M., CHANDER, S. Interfacial Phenomena in Biotechnology and Materials Processing. Elsevier, Amsterdam, pp. 503–514 apud MATHUR, S., SINGH, P., MOUDGIL, B. M. (2000) Advances in selective flocculation technology for solid-solid separations. International Journal of Mineral Processing, v.58, p.201-222.
- BAGSTER, D. F., McILVENNY, J. D. (1985) **Studies in the Selective Flocculation of Hematite from Gangue Using High Molecular Weight Polymers. Part 1: Chemical Factors / Part 2: Physical Factors**. International Journal of Mineral Processing, v.14, p.1-32.
- BAJPAI, A. K., BAJPAI, S. K. (1995) **Kinetics of polyacrylamide adsorption at the iron oxide – solution interface**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v.101, p.21-28.
- BALAJEE, S. R., IWASAKI, I. (1969) **Adsorption Mechanism of Starches in Flotation and Flocculation of Iron Ores**. Transactions AIME, v.244, p.401-

406 apud PAVLOVIC, S. (2002) Adsorção de carboidratos na superfície dos minerais hematita e quartzo. Tese de Doutorado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

BALDAUF, H., SCHUBERT, H. (1980) **Correlations between structure and adsorption for organic depressants in flotation.** In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.I, c.39, p.767-785.

BALTAR, C. A. M. (2002) **Floculação.** In: da LUZ, A. B., et al. Tratamento de minérios, 3ª edição, c.12, p.495-531, Rio de Janeiro, CETEM/MCT.

BESRA, L., SENGUPTA, D. K., ROY, S. K., AY, P. (2002) **Polymer adsorption: its correlation with flocculation and dewatering of kaolin suspension in the presence and absence of surfactants.** International Journal of Mineral Processing, v.66, p.183-202.

BORGES, A. M. B. (1993) **Arraste na flotação catiônica reversa de minérios de ferro.** Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

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

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

BUMOIS, M. K. A., GILES, J. K., HAMILTON, P. A. R., SMITH, F. (1956) **Calorimetric method for determination of sugars and related substances.** Analytical Chemistry, v.28, p.350-356.

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.

- CHIBOWSKI, S., WISNIEWSKA, M. (2002) **Study of electrokinetic properties and structure of adsorbed layers of polyacrylic acid and polyacrylamide at Fe_2O_3 – polymer solution interface.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v.208, p.131-145.
- COELHO, E. M. (1980) **Estudos de dispersão e de floculação seletiva dos “finos” da usina de concentração de itabirito da Samarco.** Relatório de Pesquisa. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- COELHO, E. M., (1979) **Aspectos Relevantes da Floculação Seletiva.** In: VI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Rio de Janeiro.
- COELHO, L. H. T., KANEKO, K. M., LIBANEO, C. A. F., ALVES, S. A., VIEIRA, C. B., ARAUJO, F. G. S. (2000) **Classificação geosiderúrgica dos principais tipos de minérios de ferro brasileiros – sua gênese e seus produtos.** In: XXXI Seminário de Minérios de Ferro. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Santos, p. 215-229.
- COOKE, S. R. B., SCHULZ, N. F. (1952) **The effect of certain starches on quartz and hematite suspensions.** Transactions AIME, Mining Engineering, p.697-698.
- CRISTIE, T., BRATHWAITE, B. (1997) **Mineral commodity report 15 – iron.** New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd.
- CUHADAROGLU, D., KIZGUT, S., BACAK, L.K. (2001) **Beneficiation of complex iron oxides by flocculation-flotation.** Journal of Ore Dressing, Issue 6.
- DANA, J. D. (1969) **Manual de mineralogia.** Rio de Janeiro: Livro Técnico.
- DORR II, J. V. N. (1969) **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** In: Geological Survey Professional Paper, 641-A. Washington: United States Government Printing Office.

- DRZYMALA, J., FUERSTENAU, D. W. (1981) **Selective flocculation of hematite in the hematite – quartz – ferric ion – polyacrylic acid system. Part 1: activation and deactivation of quartz.** International Journal of Mineral Processing, v.8, p.265-277.
- ENGELBRECHT, J. A., WOODBURN, E. T. (1975) **The effects of froth height, aeration rate and gas precipitation on flotation.** Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, p.125-132 apud BORGES, A. M. B., 1993. Arraste na flotação catiônica reversa de minérios de ferro. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- FERREIRA, V. M. (2002) **Avaliação da produção de um superconcentrado de minério de ferro.** Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto.
- FLINT, I. M., WYSLOUZIL, H. E., ANDRADE, V. L. L., MURDOCK, D. J. (1992) **Column flotation of iron ore.** Minerals Engineering, v.5, nº10-12, p.1185-1194.
- FRIEND, J. P., KITCHENER, J. A. (1973) **Some psycho-chemical aspects of the separation of finely-divided minerals by selective flocculation.** Chemical Engineering Science, v.28.
- FROMMER, D. W. (1968) **Preparation of nonmagnetic taconites for flotation by selective flocculation.** 8th International Mineral Processing Congress, Leningrad, preprint D-9, 8p.
- FROMMER, D. W. (1970) **Nonmagnetic taconites.** Mining Engineering, 22, nº11, p.79-81.
- FUERSTENAU, D. W. (1980) **Fine particles flotation.** In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.I, c.35, p.669-705.
- GAUDIN, A. M., SCHUHMANN, R. SCHLECHTEN, A. W. (1942) **Flotation kinetics, II. The effect of size on behavior of galena particles.** Journal of Physical

Chemistry, v.46 apud FUERSTENAU, D. W. **Fine particles flotation**. In: SOMASUNDARAN, P. (1980). Fine particles processing, v.I, c.35, p.669-705.

GEBHARDT, J. E., FUERSTENAU, D. W. (1983) **Adsorption of polyacrylic acid at oxide/water interface**. Colloids and Surfaces, v.7, p.221-231.

GURURAJ, B., SHARMA, J. P., BALDAWA, A., ARORA, S. C. D., PRASAD, N., BISWAS, A. K. (1983) **Dispersion-flocculation studies on hematite-clay systems**. International Journal of Mineral Processing, n^o11, p.285-302.

HOUOT, R. (1983). **Beneficiation of iron ore by flotation – review of industrial and potential applications**. International Journal of Mineral Processing, v.10, p.183-204.

IWASAKI, I., SMITH, K. A., LIPP, R. J., SATO, H. (1980) **Effect of calcium and magnesium ions on selective desliming and cationic flotation of quartz from iron ores**. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.II, c.54, p.1057-1082.

JAMES, H. L. (1966) **Chemistry of the iron-rich sedimentary rocks**. In: United States Geological Survey Professional Paper 440-W. Washington: United States Government Printing Office, p.61.

JIN, R., HU, W., HOU, X. (1987a) **Mechanism of selective flocculation of hematite from quartz with hydrolysed polyacrylamide**. Colloids Surface, vol.26, p.317-331 apud WEISSENBORN, P. K., WARREN, L. J., DUNN, J. G. (1994) **Optimisation of selective flocculation of ultrafine iron ore**. International Journal of Mineral Processing, v.42, p.191-213.

JIN, R., HU, W., HOU, X. (1987b) **Research status of selective flocculation using HPAM in China**. In: ATTIA, Y. A. Flocculation in Biotechnology and Separation Systems. Elsevier, Amsterdam, p.639-657 apud WEISSENBORN, P. K., WARREN, L. J., DUNN, J. G. (1994) **Optimisation of selective flocculation of ultrafine iron ore**. International Journal of Mineral Processing, v.42, p.191-213.

- JOHNSON, N. M., McKEE, D. J., LYNCH, A. J. (1974) **Flotation rates of nonsulfide minerals in chalcopyrite flotation processes**. Society of Mining Engineers, AIME, vol.256, p.204-209 apud BORGES, A. M. B. (1993) Arraste na flotação catiônica reversa de minérios de ferro. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- KERANEN, C. U., IVELSON, A. T., LINDROOS, E. W. (1985) **Tilden Mine**. In: WEISS, N. L. SME Mineral Processing Handbook, v.2, p.20/33-20/33, New York.
- KERJAVAINEN, V. M. (1989) **Application of a probability model for the entrainment of hydrophilic particles in froth flotation**. International Journal of Mineral Processing, v.27, p.63-74.
- KIRK, W. S. (2002) **Iron ore**. U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook.
- KIRK, W. S. (2003) **Mineral commodity summaries**. U. S. Geological Survey. Washington: p.86-87.
- KISSA, E. (1999) **Dispersions – characterization, testing, and measurement**. Surfactant Science Series, v. 84, Marcel Dekker Inc., New York, c.8, p.282-344.
- KLEMIC, H., JAMES, H. L., EBERLEIN, D. H. (1973) **United States mineral resources, iron**. In: United States Geological Survey Professional Paper nº 820. Washington: United States Government Printing Office, p.291-306 apud WALDE, D. H. G. Geologia do ferro. In: SCHOBENHAUS, C., COELHO, C. E. S. (1986) Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, v.II, c.1, p.3-6.
- LEJA, J. (1982) **Surface Chemistry of Froth Flotation**. New York: Plenum Press, 758p.
- LIBANEO, C. A. F., KANEKO, K. M., COELHO, L. H. T., PURIFICAÇÃO, E. X. (2001) **Classificação mineralógica, textural e granulométrica de detalhe de minério de ferro (pellet feed) e suas implicações geosiderúrgicas**. In: III

Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Ouro Preto, p.70-78.

LIMA, R. M. F. (1997) **Adsorção de amido e amina na superfície da hematita e do quartzo e sua influência na flotação**. Tese de Doutorado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

LINS, F. A. F., ADAMIAN, R. (1988) **Influência da aeração e agitação na flotação de partículas de ouro e considerações sobre o tamanho máximo de flotação**. In: XIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, São Paulo, p.131-141.

LIU, Q., ZHANG, Y. LASKOWSKI, J. S. (2000) **The adsorption of polysaccharides onto mineral surfaces: an acid/base interaction**. International Journal of Mineral Processing, v.60, p.229-245.

LYNCH, A. J., WHITEN, W. J. (1980) **The control of fine particles beneficiation processes**. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.I, c.46, p.895-921.

MATHUR, S., SINGH, P., MOUDGIL, B.M. (2000) **Advances in selective flocculation technology for solid-solid separations**. International Journal of Mineral Processing, v.58, p.201-222.

MEDEIROS, R. L. C., WHITAKER, W., MARTINS, J. (1996) **Influência da granulometria no processo de concentração de minério de ferro por flotação em coluna**. In: I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto, p.367-373.

MONTE, M. B. M., PERES, A. E. C. (2002) **Química de superfície na flotação**. In: LUZ, A. B., et al. Tratamento de minérios, 3ª edição, c.9, p.339-407, Rio de Janeiro, CETEM/MCT.

MONTENEGRO, L. C. M. (2001) **Efeito das condições operacionais sobre a relação teor-recuperação na flotação de minérios de ferro**. Tese de

Doutorado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

MONTGOMERY, D. C. (1996) **Introduction to Statistical Quality Control**. New York:
John Wiley & Sons, Inc. c.2, Modeling Process Quality, p.374-375.

MOODY, G. (1992) **The use of polyacrylamides in mineral processing**. Minerals
Engineering. V.5, p.479-492.

MORRIS, T. M. (1962) **Measurement and evaluation of the rate of flotation as a
function of particle size**. Mineral Engineering, v.4.

MOSS, N., DYMOND, B. (1978) **Flocculation: theory and application**. Mine and
Quarry Journal, 8p.

MOUDGIL, B. M., BEHL, S., PRADIP (1993) **Scientific design of a selective
flocculation process**. Miner. Metall. Process. 10 (2), p.43–46 apud MATHUR,
S., SINGH, P., MOUDGIL, B.M. (2000) Advances in selective flocculation
technology for solid-solid separations. International Journal of Mineral
Processing, v.58, p.201-222.

MOUDGIL, B. M., SHAH, B. D., SOTO, H. S. (1987) **Loss of selectivity in apatite–
dolomite flocculation**. Miner. Metall. Process. 4 (2) , p.27–31 apud MATHUR,
S., SINGH, P., MOUDGIL, B.M. (2000) Advances in selective flocculation
technology for solid-solid separations. International Journal of Mineral
Processing, v.58, p.201-222.

NEIS, U., KIEFHABER, K. P. (1980) **Differences between particle flotation and floc
flotation**. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.I, c.38, p.755-
766.

PACKHAM, R. F., RICHARDS, W. N. (1975) **Water clarification by flotation – 3**.
Technical report 2, Water Research Centre, England.

PARKS, G. A. (1965) **The Isoelectric Point of Solid Oxides, Solid Hydroxides, and
Aqueous Hydroxo-Complexes Systems**. Chemical Reviews, v.65, p.177-198.

- PASCOE, R. D., DOHERTY, E. (1997) **Shear flocculation and flotation of hematite using sodium oleate**. International Journal of Mineral Processing, v.51, p.269-282.
- PAVLOVIC, S. (2002) **Adsorção de carboidratos na superfície dos minerais hematita e quartzo**. Tese de Doutorado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- PEARSE, M. J., WEIR, S., ADKINS, S. J., MOODY, G. M. (2001) **Advances in mineral flocculation**. Minerals Engineering, v.14, nº11, p.1505-1511.
- PERES, A. E. C., CORRÊA, M. I. (1996) **Depression of iron oxides with corn starches**. Minerals Engineering, v.9, nº12, p.1227-1234.
- PINTO, C. L. L. (1989) **Efeito do amido, amilose e amilopectina na depressão de oxí-minerais**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- PRADIP, RAVISHANKAR, S.A., SANKAR, T.A.P., KHOSLA, N.K. (1993) **Beneficiation studies on alumina-rich iron ore slimes using selective dispersants, flocculants and flotation collectors**. In: XVIII International Mineral Processing Congress. Sydney, p. 1289-1294 apud WEISSENBORN, P. K., WARREN, L. J., DUNN, J. G. (1994) **Optimisation of selective flocculation of ultrafine iron ore**. International Journal of Mineral Processing, v.42, p.191-213.
- QUARESMA, L. F. (2001) **Balço mineral brasileiro**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral.
- 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.

- 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.
- RAO, K. H., NARASIMHAN, K. S. (1985) **Selective flocculation applied to Barsuan iron ore tailings**. International Journal of Mineral Processing, v.14, p.67-75.
- RAVISHANKAR, S. A., PRADIP, KHOSLA, N. K. (1994) **Selective flocculation of iron oxide from its synthetic mixtures with clays: a comparison of polyacrylic acid and starch polymers**. International Journal of Mineral Processing, v.43, p.235-247.
- SANTIAGO, T. C., ARAUJO, A. C. (1993) **Minério de ferro**. In: Aspectos Tecnológicos Relativos à Preparação de Carga e Operação de Alto-Forno. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte.
- SHIMBAYASHI, S., NISHINO, K., NAKAGAKI, M. (1992) **Colloids Surfaces**, 63, 121 apud KISSA, E. (1999) Dispersions – characterization, testing, and measurement. Surfactant Science Series, v. 84, Marcel Dekker Inc., New York, c.8, p.282-344.
- SILVA, R. V. G. (1999) **Efeito da alumina na flotação de um minério misto hematítico-itabirítico da mina do pico**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- SMITH, R. W., SALIM, A. (1976) **Cationic Flotation of Oxides and Silicates**. In: FUERSTENAU, M. C. Flotation - A. M. Gaudin Memorial Volume. New York: AIME, c.5, p.87-116.
- SOMASUNDARAM, P. (1980) **Principles of Flocculation, Dispersion, and Selective Flocculation**. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.II, c.48, p.947-976.

- SOMASUNDARAN, P., YU, X. (1994) **Colloid Interface Science**, 53, 33 apud KISSA, E. (1999) *Dispersions – characterization, testing, and measurement*. Surfactant Science Series, v.84, Marcel Dekker Inc., New York, c.8, p.282-344.
- SOUZA JUNIOR, M. (1994) **Caracterização mineralógica e tecnológica do minério de ferro itabirítico anfíbolítico da jazida de Alegria, Mariana, MG**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- SRESTY, G. C., SOMASUNDARAN, P. (1980) **Selective Flocculation of Synthetic Mineral Mixtures Using Modified Polymers**. *International Journal of Mineral Processing*, v.6, p.303-320.
- SUBRAHMANYAM, T. V., FORSSBERG, E. (1987) **Froth stability, particle entrainment and drainage in flotation – a review**. *International Journal of Mineral Processing*, v.23, p.33-53.
- SUBRAMANIAN, S., NATARAJAN, K. A. (1989) **Adsorption behaviour of an oxidised starch onto hematite in the presence of calcium**. *Minerals Engineering*, v.2, nº1, p.55-64.
- TAGGART, A. F. (1921) **A manual of flotation process**. New York, 181p.
- TRAHAR, W. J. (1981) **A rational interpretation of the role of particle size**. *International Journal of Mineral Processing*, v.8, p.289-327.
- TURRER, A. D., RABELO, P. J. B. (1999) **O uso de fatorial para avaliar os efeitos da %Al₂O₃ na água de flotação dos minérios de ferro da Samarco Mineração S.A.** In: II Simpósio Brasileiro de Minérios de Ferro. Ouro Preto, p.209-221.
- VREUGDE, M. J. A., POLING, G. M. (1975) **The effect of flocculants on reclaim water quality for flotation**. *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, p.1-6.

- WAKAMATSU, T., NUMATA, Y. (1980) **Fundamental study on the flotation of minerals using two kinds of collectors.** In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.I, c.40, p.787-801.
- WALDE, D. H. G. (1986) **Geologia do ferro.** In: SCHOBENHAUS, C., COELHO, C. E. S. Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, v.II, c.1, p.3-6.
- WEISSENBORN, P. K. (1996) **Behaviour of amylopectin and amylose components of starch in the selective flocculation of ultrafine iron ore.** International Journal of Mineral Processing, v.47, p.197-211.
- WEISSENBORN, P. K., WARREN, L. J., DUNN, J. G. (1994) **Optimisation of selective flocculation of ultrafine iron ore.** International Journal of Mineral Processing, v.42, p.191-213.
- WERKEMA, M. C. C., AGUIAR, S. (1996) **Otimização estatística de processos: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria.** Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, c.4, p.141-183.
- YAN, Y. D., GLOVER, S. M. JAMESON, G. J., BIGGS, S. (2004) **The flocculation efficiency of polydisperse polymer flocculants.** International Journal of Mineral Processing, v.73, p.161-175.
- YONG, H. (1995) **Coagulants and flocculants – theory and practise.** Tall Oaks Publishing, Inc., 86p.
- YUEHUE, H., WEI, S., HAIPU, L., XU, Z. (2004) **Role of macromolecules in kaolinite flotation.** Minerals Engineering, article in press.