

# PROCESSAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO HIDRATADO DA MINA DE ALEGRIA, MARIANA, MG <sup>(1)</sup>

Paulo José Barros Rabelo <sup>(2)</sup>  
Armando Corrêa de Araujo <sup>(3)</sup>

As principais dificuldades encontradas no processamento de minérios de ferro com alto grau de hidratação são a grande quantidade de lamas, que interferem sobremaneira no processo de concentração por flotação, e os elevados teores em fósforo dos concentrados produzidos

Estudos de caracterização, incluindo o emprego de microscópio eletrônico de varredura e microsonda eletrônica, mostraram que o fósforo ocorre intimamente associado aos minerais de ferro hidratados (limonitas e goethita) na porção do Complexo Alegria com altos teores em fósforo (estéril fosforoso).

O processo de deslamagem, com auxílio dos reagentes dispersantes hidróxido e tripolifosfato de sódio, possibilitou a remoção de 30% do fósforo contido no minério, além de remover as lamas em grau suficiente para um bom desempenho da flotação catiônica de sílica. O uso de floculantes, procurando incrementar a seletividade da deslamagem, não produziu resultados satisfatórios.

Com a flotação catiônica obteve-se concentrado com teor em sílica inferior a 1% SiO<sub>2</sub>. A flotação, utilizando coletores aniônicos e anfotéricos foi ineficaz.

Apesar dos índices de remoção alcançados no processo de deslamagem, os teores em fósforo do concentrado final, 0,085% P, não atendem às especificações atuais requeridas pelo processo metalúrgico de Redução Direta. Os teores em sílica e alumina situam-se abaixo dos limites especificados pelo mercado consumidor.

Palavras chave : Fósforo em Minério de Ferro, Deslamagem, Flotação

---

(1) - Trabalho a ser apresentado no I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Pelotização, Ouro Preto, MG, outubro/1996.

(2) - Engenheiro de Minas, M.Sc. SAMARCO Mineração S.A.

(3) - Engenheiro de Minas, M.Sc., Ph.D. MBR - Minerações Brasileiras Reunidas

## 1 INTRODUÇÃO

Os mercados interno e mundial de minérios de ferro vêm se caracterizando por crescentes exigências de qualidade. As especificações para as propriedades físicas, químicas e metalúrgicas dos minérios de ferro acompanham, em termos de requisitos de qualidade, o desenvolvimento tecnológico do setor siderúrgico. A tendência atualmente verificada, de crescimento do número de Usinas Siderúrgicas que empregam o processo de Redução Direta, em detrimento ao processo de Alto-Forno, adverte para a necessidade de melhoria de qualidade das matérias-primas utilizadas pelo setor siderúrgico.

Um dos temas que tem merecido maior destaque e a dedicação de inúmeros pesquisadores em todo o mundo é o controle dos teores em fósforo nos minérios de ferro e seus produtos semi-elaborados. Este controle é, na maioria dos casos, realizado por blendagem de diferentes tipos de minérios, durante as fases de planejamento e operações de lavra.

Processos hidro-metalúrgicos, avaliados em escala de laboratório, têm se mostrado promissores para remoção do fósforo em minérios de ferro, mas sem perspectivas econômicas para aplicações industriais, em seu estágio atual de desenvolvimento [1-3].

No presente trabalho, foram abordadas a concentração e a redução do teor em fósforo do minério de ferro da Mina de Alegria, na região explorada pela SAMARCO Mineração S.A., através de métodos físicos e físico-químicos de processamento de minérios.

Os testes de laboratório tiveram, como estudo inicial realizado com o minério de Alegria, caráter exploratório, e compreenderam os processos de: deslamagem (seletiva) com utilização de floculantes de diferentes características químicas e mecanismos de atuação, em combinação com reagentes dispersantes; flotação, com diferentes sistemas de reagentes, incluindo ensaios com coletores aniônicos e anfotéricos. O Planejamento e a análise dos resultados dos testes de laboratório foram apoiados por estudos de caracterização mineralógica que utilizaram, principalmente, análises químicas e granulométricas, microscopia ótica, microscopia eletrônica e microsonda eletrônica.

A obtenção de resultados definitivos quanto ao entendimento da íntima forma de associação do fósforo aos minerais de ferro no minério de Alegria irá requerer a aplicação de outras técnicas de caracterização instrumental sofisticadas e interpretações geológicas da gênese da jazida, o que vai além dos objetivos pretendidos pelo presente estudo.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Apresenta-se neste item uma descrição sumária dos procedimentos experimentais utilizados. Detalhes destes procedimentos como extensa revisão da literatura técnica disponível podem ser encontrados na referência [4].

A amostra mineral, utilizada para os estudos desenvolvidos no presente trabalho, foi obtida por composição de amostras de sete frentes de lavra da Mina de Alegria localizadas próximas ao contato com o itabirito do tipo anfibolítico. As amostragens foram realizadas através de aberturas de canaletas horizontais, de aproximadamente 15 m de extensão. As amostras, após secagem e britagem até 100% passantes em 3,36 mm, foram homogeneizadas em pilhas cônicas e pilha alongada, da qual foram retiradas alíquotas para realização dos ensaios e estudos de caracterização.

Os teores em ferro foram determinados por dicromatometria. As análises químicas de sílica, alumina e fósforo foram efetuadas por espectrometria de plasma. Os valores de PPC (perda por calcinação) foram obtidos por calcinação em mufla, a 1100 °C.

Os estudos de microscopia ótica foram realizados em microscópio polarizante. As seções polidas foram preparadas por embutimento de partículas de frações granulométricas do minério em resina especial de cura a frio, lixadas e polidas, após polimerização da resina. As seções polidas foram também observadas em microscópio eletrônico de varredura com espectrômetro de energia dispersiva.

A moagem do minério foi realizada em moinho de laboratório de 30,48 cm de comprimento e 20,32 cm de diâmetro, em rotação de 67 rpm, com carga de bolas de diâmetros compreendidos entre 10 mm e 34 mm. A concentração de sólidos na polpa utilizada na moagem foi igual a 70%, em peso. Reagentes dispersantes ou modulador de pH foram adicionados na etapa de moagem.

Os testes de dispersão foram realizados com amostra das lamas do minério, em proveta especialmente elaborada, na qual o material em suspensão na polpa é recuperado por uma saída instalada em altura fixa na proveta. Os testes de deslamagem seletiva compreenderam moagem, ajuste da percentagem de sólidos da polpa para 20% em peso, ajuste do pH da polpa, condicionamento do floculante, sedimentação em cuba de quatro litros de volume e sifonamento da fase dispersa.

Os testes de flotação foram realizados em célula de flotação de laboratório, de aeração natural, com cubas de 3,5 litros de volume, rotação de 1300 rpm. Os testes foram iniciados pelo condicionamento do reagente depressor e ajuste do pH requerido. Os reagentes coletores foram adicionados em seguida, sendo condicionados. Novo ajuste de pH foi realizados após condicionamento dos coletores. A percentagem de sólidos inicial da polpa foi igual a 40 %, em peso.

### 3 ANÁLISES DOS RESULTADOS

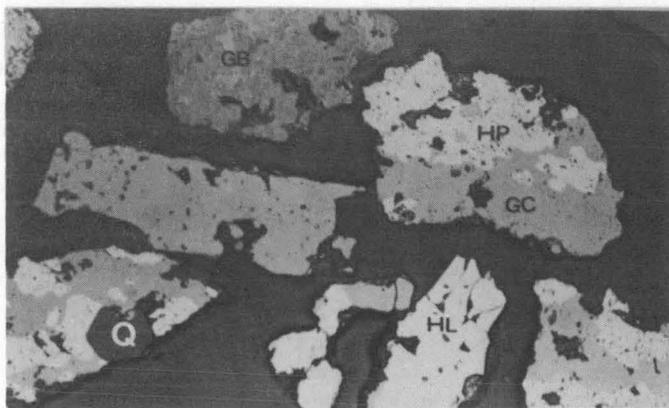
#### 3.1 Caracterização da Amostra Mineral

A análise química da amostra mineral, formada pela composição das amostras das sete frentes de lavra previamente selecionadas, resultou nos teores de 57,37% Fe ; 12,26% SiO<sub>2</sub> ; 0,43% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; 0,093% P e 4,98% PPC (perda por calcinação). Observe-se que o alto teor em fósforo é impeditivo ao aproveitamento industrial deste minério, segundo a rota de processos atual da Usina de Concentração da SAMARCO - moagem, deslamagem e flotação - e especificações vigentes para concentrados utilizados em processos metalúrgicos de Redução Direta. O elevado grau de hidratação pode ser considerado como indicativo de dificuldades para o emprego da concentração por flotação catiônica reversa.

Exames de seções polidas de frações granulométricas do minério cominuído permitiram identificar a hematita (e martita), goethita (e limonitas) e a magnetita, como minerais portadores de ferro, o quartzo como principal mineral de ganga. Não foi constatada a presença de minerais portadores de fósforo através das análises em microscópio ótico. A hematita ocorre nas formas porosa, lamelar e como martita (pseudomorfa de magnetita). A goethita apresenta-se sob as formas compacta, terrosa (associada a massas limoníticas) e em partículas com agregados botrioidais. A magnetita ocorre em pequenos cristais, disseminados em partículas de hematita ou goethita. As limonitas podem ocorrer como massas que envolvem outros minerais, sugerindo ter preenchido espaços abertos por processos de dissolução, ou formando partículas individuais. O quartzo apresenta-se, com maior freqüência, em partículas liberadas dos minerais de ferro, mesmo nas frações granulométricas mais grosseiras.

É muito grande a variedade de associações entre os minerais de ferro, sendo comuns as ocorrências dos três minerais em uma mesma partícula, em diversas proporções. Raramente são encontradas partículas monominerálicas no minério estudado. As fotomicrografias apresentadas nas figuras 1 e 2 ilustram estas feições do minério.

Em termos de evolução no problema de remoção do fósforo no minério de Alegria, os estudos de microscopia ótica contribuíram para a constatação da elevada participação dos minerais hidratados de ferro no minério. Informações da literatura técnica [5,6] estabelecem que estas fases minerais possuem maiores capacidades em aceitar o fósforo em suas estruturas ou superficialmente, por mecanismos de adsorção. Fator que antecipa maiores dificuldades para redução do teor em fósforo do minério é a ocorrência dos diversos minerais de ferro em partículas poliminerálicas, de liberação incompleta até tamanhos inferiores a 0,037 mm. Entretanto, observou-se que a massa limonítica intersticial é passível de liberação por moagem fina, podendo ser removida por operações de deslamagem, juntamente com o fósforo a ela associado.

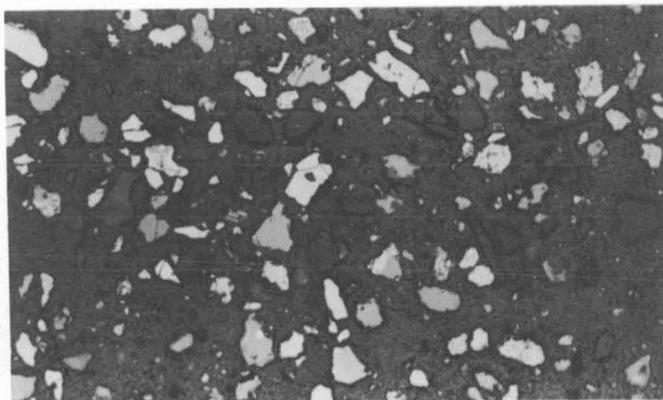


**Legenda :**

Q : Quartzo ; GC : Goethita Compacta ; GB : Goethita Botrioidal ;  
HL : Hematita Lamelar ; HP : Hematita Porosa

**Figura 1** - Fotomicrografia em Microscópio Ótico. Aumento 200x.

Amostra : -0,210 mm + 0,149 mm. Partículas de Goethita Compacta e Botrioidal, Hematita Lamelar, Hematita Porosa(mista com Goethita Compacta), Quartzo Euédrico em Partícula mista com Hematita e Goethita



**Figura 2** - Fotomicrografia em Microscópio Ótico. Aumento 200x.

Amostra : -0,037 mm. Partículas Poliminerálicas nas Frações Finas do Minério.

A figura 3 mostra as correlações existentes entre os teores em ferro, fósforo e PPC das frações granulométricas do produto da moagem (10% retidos em 0,149 mm). Estas correlações, considerados estes teores aos pares, apresentaram coeficientes superiores a 0,90. Este fato reforça a hipótese de associação preferencial do fósforo aos minerais hidratados de ferro, evidenciando também a predominância das fases hidratadas nas frações do minério mais ricas em ferro.

Observações e análises químicas semi-quantitativas em microscópio eletrônico de varredura, com microsonda eletrônica dispersiva em energia acoplada, foram realizadas procurando pesquisar a distribuição do fósforo entre as fases minerais descritas pela microscopia ótica.

Os resultados encontrados são exemplificados pela fotomicrografia da figura 4 e também sustentam a hipótese de distribuição preferencial do fósforo nos minerais hidratados de ferro. Não houve distinção quanto ao enriquecimento em fósforo nas texturas compacta ou porosa da goethita. Os teores em fósforo na hematita geralmente foram encontrados abaixo do limite de detecção da microsonda e várias partículas de quartzo analisadas não mostraram presença de fósforo.

Em resumo, os resultados dos estudos de caracterização mineralógica definiram a solução do problema abordado por esta pesquisa através de operações de moagem e deslamagem, para liberação e retirada das massas limoníticas intersticiais, e pela procura de um processo seletivo para separação das partículas de goethita, de altos teores em fósforo. Altas perdas metálicas são inevitáveis, em quaisquer destes processos, pela associação do fósforo aos minerais de ferro.

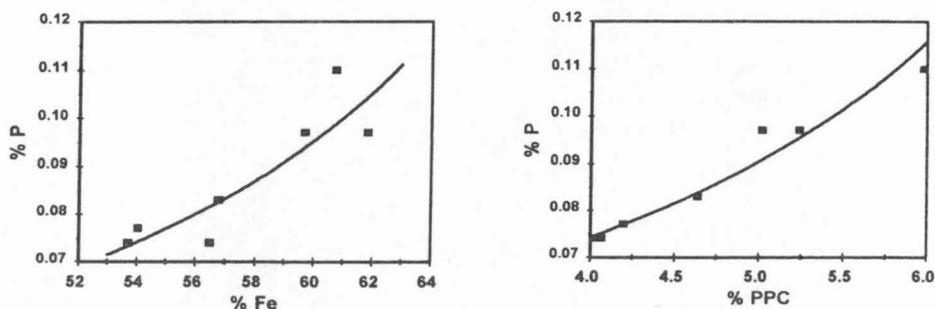
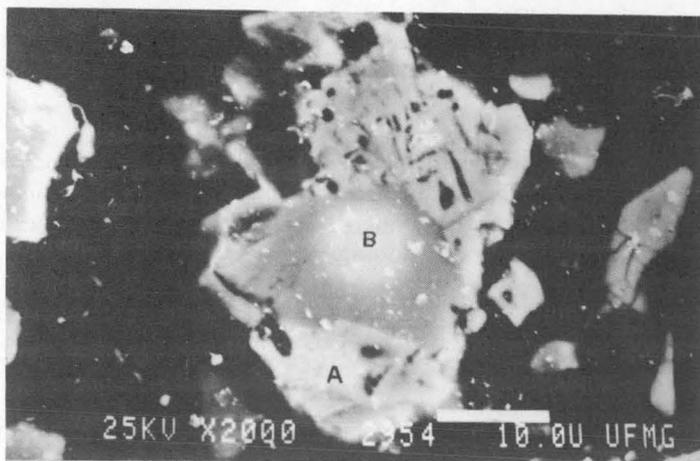


Figura 3 - Correlações entre os Teores em Fósforo, Ferro e PPC das Frações Granulométricas do Produto da Moagem



		TEORES NORMALIZADOS (%)								
		Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Na	Fe
ÁREA A		0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,4
ÁREA B		0,0	2,1	1,5	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	96,2

**Figura 4** - Fotomicrografia em Microscópio Eletrônico de Varredura. Imagens de Elétrons Secundários. Fósforo Associado à Goethita, em Partícula Mista com Hematita

## 3.2 Remoção de Fósforo por Deslamagem

### 3.2.1 Dispersão da Polpa de Lamas do Minério

O estudo das condições processuais adequadas à deslamagem do minério foi iniciado por testes de dispersão, objetivando explorar o potencial de reagentes dispersantes, de diferentes características químicas e mecanismos de atuação e, também, avaliar o efeito do pH como variável fundamental no controle do estado de dispersão e agregação do sistema mineral em questão. A condição de máxima dispersão das lamas será a mais favorável aos processos de deslamagem e flotação, principalmente tendo-se em vista a redução do teor em fósforo.

Os testes de dispersão foram realizados com amostra de lamas do minério com teores de 58,09% Fe ; 6,78% SiO<sub>2</sub> ; 1,34% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; 0,155% P ; 8,17% PPC e granulometria 99% abaixo de 0,037 mm.

O efeito do pH no grau de dispersão da polpa de lamas foi avaliado pelos resultados apresentados na figura 5. O grau de dispersão mostrou-se extremamente sensível a aumentos de pH, na faixa de valores compreendidos entre 7,0 e 9,5.

A análise mecânica do perfil apresentado pela figura 5 é facilmente efetuada através da situação de cargas de superfície das partículas minerais, extensivamente estudada e presente na literatura técnica [7].

A figura 6 mostra uma comparação entre os graus de dispersão obtidos com hidróxido de sódio e os reagentes dispersantes inorgânicos fluoreto de sódio, tetraborato de sódio e silicato de sódio. Em geral, os graus de dispersão obtidos com estes reagentes seguem a curva determinada para efeito do pH (modulado com hidróxido de sódio). A característica ligeiramente alcalina das soluções aquosas destes dispersantes pode resumir o mecanismo pelo qual atuaram, explicando a sua pequena eficiência no processo.

As diferenças verificadas entre as atuações dos reagentes dispersantes inorgânicos mencionados e os polifosfatos (tripolifosfato e hexametáfosfato de sódio) podem ser verificadas na figura 7, que mostra os graus de dispersão obtidos com os polifosfatos, superiores aos verificados com hidróxido de sódio, para valores similares de pH. Esta diferença ressalta a capacidade das espécies altamente carregadas dos fosfatos adsorverem-se especificamente, formando complexos com cátions das superfícies dos minerais de ferro.

Outros reagentes dispersantes avaliados foram os orgânicos monoméricos (ácido oxálico, ácido cítrico e EDTA), os orgânicos poliméricos (poliacrilatos de sódio), que não produziram modificações significativas na estabilidade da polpa de lamas.

Dentre todos os reagentes dispersantes avaliados selecionou-se o tripolifosfato de sódio para os ensaios subsequentes de deslamagem seletiva e flotação.

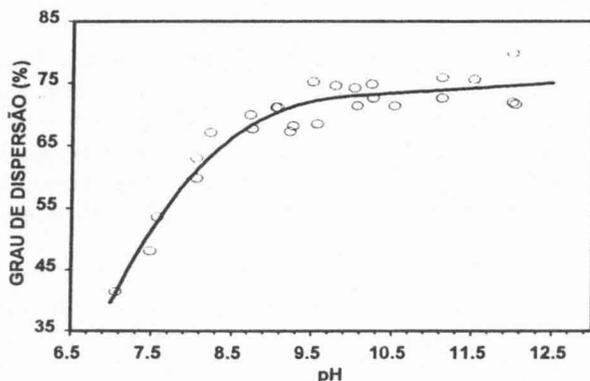
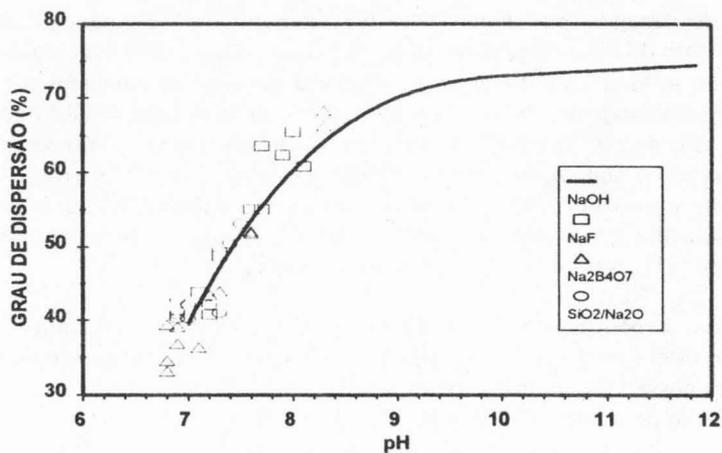
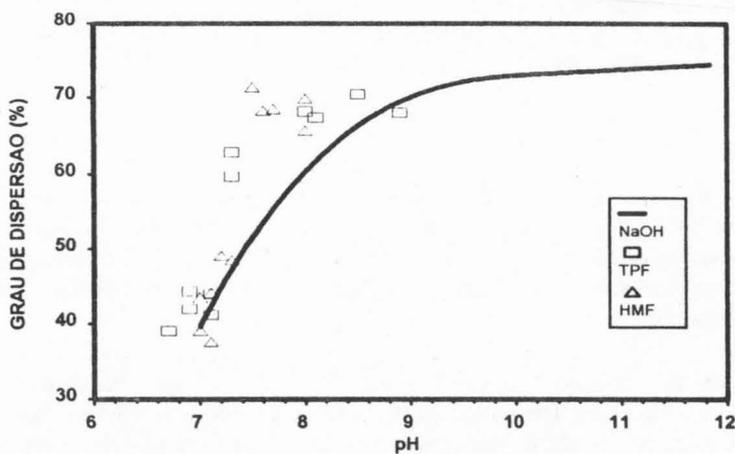


Figura 5 - Efeito do pH no Grau de Dispersão da Polpa de Lamas



**Figura 6** - Comparação entre os Graus de Dispersão Obtidos com Hidróxido de Sódio e Outros Dispersantes Inorgânicos, em função do pH



**Figura 7** - Comparação entre os Graus de Dispersão Obtidos com Hidróxido de Sódio, Tripolifosfato (TPF) e Hexametáfosfato de Sódio (HMF), em função do pH

### 3.2.2 Determinação da Máxima Remoção de Fósforo por Deslamagem

Testes de deslamagem em etapas sucessivas determinaram o potencial de redução do teor em fósforo do minério pela remoção da parcela deste elemento contida nas frações de lamas do minério. Verificou-se a influência do grau de moagem na remoção de fósforo por deslamagem, através da realização de ensaios com minério cominuído até granulometrias de 10,2% e 6,5% retidos em 0,149 mm. Os testes foram realizados em pH 10,5, sendo o número de etapas definido pela obtenção de um produto "overflow" praticamente isento de sólidos na última etapa. Para o minério com granulometria 10,2% retidos em 0,149 mm foram necessárias seis etapas de deslamagem e para o produto com 6,5% retidos em 0,149 mm, nove etapas.

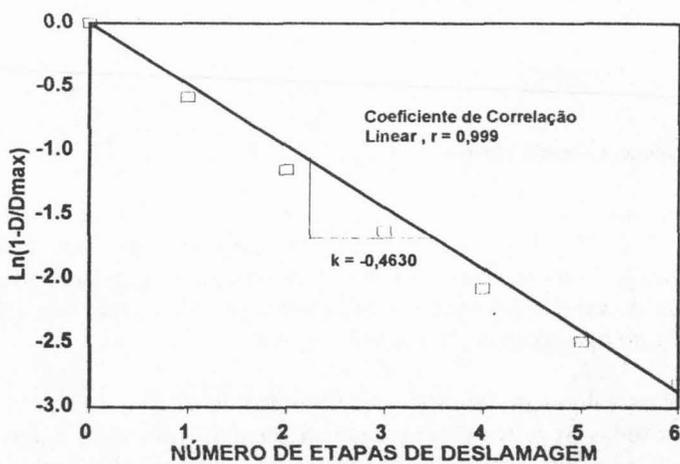
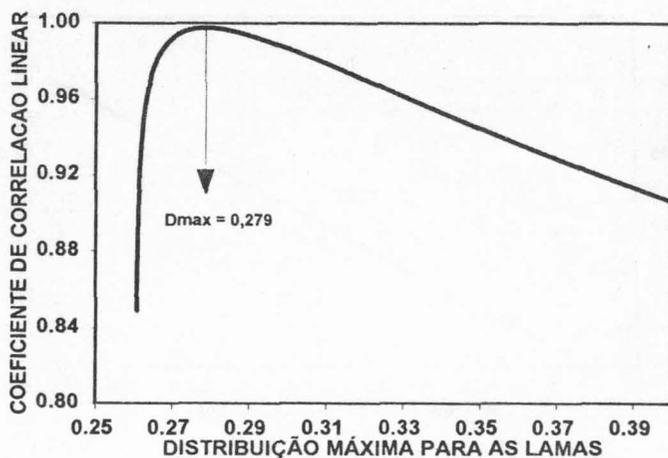
Os resultados experimentais foram ajustados a um modelo matemático de primeira ordem para estimativas das distribuições máximas de fósforo nas lamas do minério, isto é, para possibilitar inferir a remoção deste contaminante caso fosse utilizado um número infinito de etapas de deslamagem.

Sendo  $N$  o número de etapas de deslamagem,  $k$  uma constante cinética,  $D$  a distribuição de fósforo para as lamas acumulada até a etapa  $N$  de deslamagem e  $D_{max}$  a distribuição máxima de fósforo para as lamas, os dados experimentais devem se ajustar segundo uma reta em gráfico com eixos coordenados  $N$  e  $\ln(1 - D/D_{max})$ . O problema de determinação dos parâmetros  $k$  e  $D_{max}$  foi resolvido a partir de cálculos iterativos, fazendo-se  $D_{max}$  variar de 1 (100%) até o valor mínimo de seu domínio e determinando-se para cada valor de  $D_{max}$  o coeficiente de correlação linear entre os dados experimentais e a equação do modelo; o valor de  $D_{max}$  adotado foi aquele que maximizou o coeficiente de correlação.

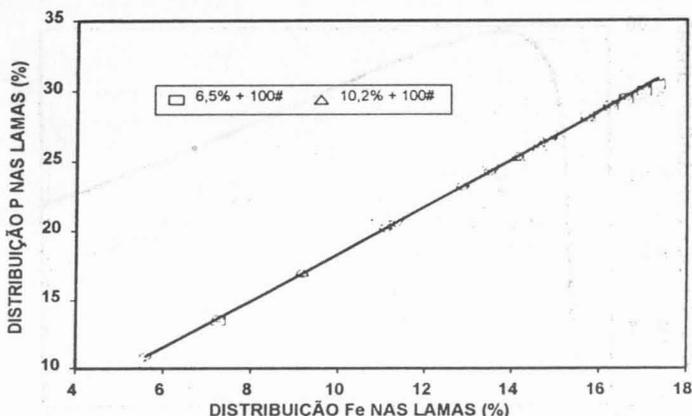
A figura 8 exemplifica o ajuste das distribuições em fósforo ao modelo matemático, ilustrando também o procedimento para determinação dos seus parâmetros. Os coeficientes de correlação linear obtidos foram superiores a 0,99 comprovando a aderência dos dados experimentais ao modelo de primeira ordem utilizado. Os valores de  $D_{max}$  foram determinados em aproximadamente 28% e 31% de remoção de fósforo para as lamas, para as granulometrias 10,2 % e 6,5% retidos em 0,149 mm, respectivamente.

A possibilidade de remoção de apenas 31% do fósforo contido no minério, na etapa de deslamagem, revelou ser bastante significativa a parcela do fósforo associada às partículas de minerais de ferro, principalmente às de goethita, de tamanhos superiores à fração de lamas.

A figura 9 mostra que, apesar do incremento de 3% de remoção de fósforo para um produto de moagem mais fino, não se altera a seletividade da separação do fósforo pelo grau de moagem. As restrições de produtividade de moagem quando se opta por moagem em granulometrias mais finas devem ser consideradas neste caso.



**Figura 8 -** Determinação da Máxima Remoção de Fósforo  
 Produto da Moagem : 10,2 % + 0,149 mm



**Figura 9** - Influência da Granulometria do Produto da Moagem na Seletividade da Remoção do Fósforo por Deslamagem

### 3.2.3 Deslamagem Seletiva

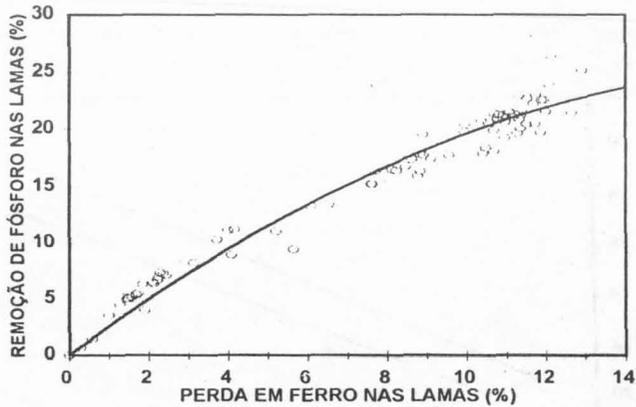
Testes de deslamagem seletiva foram realizados objetivando o estudo do efeito conjunto das variáveis pH, dosagem de tripolifosfato de sódio, tipo e dosagem de floculante, na seletividade da separação entre fósforo e ferro neste processo. A tabela I mostra as faixas de valores cobertas por estas variáveis, tendo sido adotado um plano de experimentos do tipo composição central.

A relação entre os valores de remoção (distribuição) de fósforo e de perdas em ferro nas lamas, para todos os testes de deslamagem seletiva realizados, é apresentado na figura 10. Observa-se que, apesar das condições de realização dos testes englobarem cinco tipos de floculantes, de características bastante variadas, em diferentes dosagens, faixa ampla de variação de pH e de dosagem de tripolifosfato de sódio, os pontos experimentais puderam ser ajustados segundo uma mesma curva.

Estes resultados trazem consigo a constatação da necessidade de perdas metálicas para que parte do fósforo existente no minério seja removido por deslamagem, mostrando também que a utilização de floculantes não incrementou a seletividade da separação.

**TABELA I - Planejamento de Experimentos para os Testes de Deslamagem Seletiva**

VARIÁVEIS		NÍVEIS				
		-1,68	-1,00	0,00	+1,00	+1,68
DOSAGEM DE FLOCULANTE (g/t)	AMIDO	0	24	60	96	120
	CMC	0	24	60	96	120
	ANIÔNICO (A-100)	0	6	15	24	30
	NÃO-IÔNICO (N-100)	0	6	15	24	30
	CATIÔNICO (573-C)	0	6	15	24	30
DOSAGEM DE DISPERSANTE (TPF) (g/t)		0	40	100	160	120
pH		7,0	7,8	9,0	10,2	11,0



**FIGURA 10 - Testes de Deslamagem Seletiva : Correlação entre Remoção de Fósforo e Perda em Ferro nas Lamas**

### 3.2.4 Efeito do Tripolifosfato de Sódio na Remoção de Fósforo por Deslamagem

A influência do tripolifosfato de sódio na remoção do fósforo por deslamagem não foi evidenciada pela avaliação dos resultados dos testes de deslamagem seletiva com floculantes. Desta forma, foram realizados ensaios com o objetivo específico de determinar a influência deste reagente dispersante, como auxiliar ao hidróxido de sódio, na promoção da dispersão e remoção das lamas e do fósforo da polpa mineral. Os índices de remoção de fósforo foram relacionados às perdas metálicas nas lamas, para as situações de presença ou ausência de tripolifosfato de sódio no processo.

Os resultados apresentados na figura 11 permitem concluir que a seletividade da separação entre o fósforo e os minerais de ferro, no processo de deslamagem, é incrementada pela utilização do tripolifosfato. As curvas apresentadas nesta figura distanciam-se, aproximadamente, por 2% de remoção de fósforo, a maior, para perdas em ferro equivalentes, com a adição do reagente dispersante.

Com base nos resultados dos testes de deslamagem com adição de floculantes e somente de reagentes dispersantes, adotou-se como condição, para esta etapa do processo, a dosagem de 185 g/t de tripolifosfato de sódio, pH em torno de 10, sem adição de floculantes. O número de etapas de deslamagem sucessivas foi estabelecido em três.

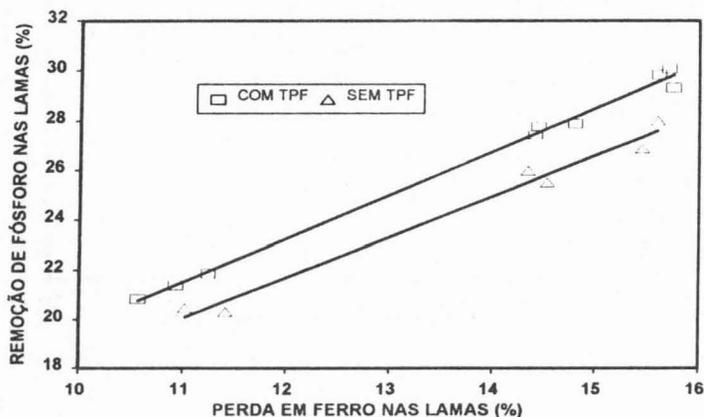


Figura 11 - Efeito do Tripolifosfato de Sódio na Remoção de Fósforo por Deslamagem

### 3.3 Flotação

#### 3.3.1 Testes Exploratórios

O objetivo dos testes exploratórios de flotação foi verificar o potencial de coletores de características diferentes às das eteraminas, coletores aniônicos e anfotéricos, geralmente utilizados na flotação catiônica de quartzo em minérios de ferro, para a redução do teor em fósforo no concentrado desta etapa do processo.

A situação previsível é a de enriquecimento em fósforo no concentrado da flotação, pela rejeição das partículas de quartzo, praticamente isentas deste elemento. Considerando-se que a parcela do fósforo contida nas frações de lamas foi retirada no processo anterior, resta à flotação trabalhar com a remoção do fósforo associado às partículas de minerais de ferro, principalmente goethita. As perspectivas de êxito do processo resumem-se a duas situações: adsorção dos coletores em possíveis minerais de fósforo - mesmo que em partículas mistas com minerais de ferro - e flotação preferencial das partículas de goethita, portadoras de teores em fósforo mais elevados.

A hipótese estabelecida pela primeira situação é muito pouco provável, pois, além de sua densidade de distribuição muito baixa, o fósforo parece estar estruturalmente associado aos minerais de ferro. A seletividade da flotação entre hematita e goethita é de difícil consecução, pois as superfícies das partículas destes dois minerais serão abordadas de maneiras muito semelhantes pelos reagentes utilizados.

A amostra utilizada nos testes exploratórios de flotação foi o produto "underflow" da etapa de deslamagem, que apresentou os seguintes teores : 52,20% Fe ; 13,39% SiO<sub>2</sub> ; 0,26% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; 0,075% P e 4,15% PPC. As variáveis de processo percorridas pelos testes exploratórios de flotação foram o tipo e a dosagem de reagente coletor, o pH e a dosagem de reagente depressor (amido). A tabela II traz um resumo das condições de realização dos testes.

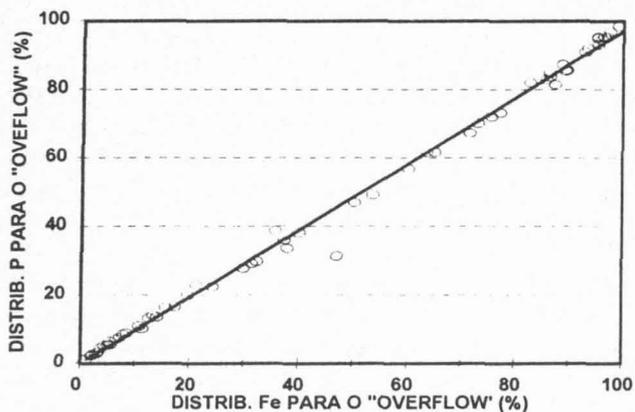
A mesma forma de dependência entre partições de fósforo e ferro, verificada na deslamagem seletiva, ocorreu no estudo de flotação, conforme observa-se na figura 12. A relação entre partições de fósforo e ferro foi ainda mais desfavorável, 1 : 1 ; para cada unidade de fósforo removida perdeu-se também uma unidade metálica. Esta relação evidencia que não houve nenhuma seletividade no processo, em relação à remoção de fósforo, independentemente do amplo número de variáveis cobertas pelos ensaios.

Ressalte-se também que, em nenhum dos testes exploratórios de flotação obteve-se produto com teor em sílica próximo ao especificado para Redução Direta. Desta forma, determinou-se que a etapa de flotação deve ser utilizada com o objetivo único de atingir-se as especificações para teores em sílica de concentrados para Redução Direta, com o processo catiônico.

**TABELA II** - Testes Exploratórios de Flotação : Faixas de Variação dos Parâmetros de Processo

REAGENTE COLETOR			DOSAGEM AMIDO	pH
NOME	TIPO	DOSAGEM		
ÁCIDO OLÉICO	ANIÔNICO	50 a 400	0 a 400	5 a 11
FLOTIGAN HF-3594	ANIÔNICO	20 a 200	0 a 400	4 a 11
FLOTINOR V3900-1	ANFOTÉRICO	50 a 400	0 a 400	5 a 11
ARKOMON SO	ANFOTÉRICO	20 a 200	0 a 800	5 a 11

(dosagens de reagentes em g/t)



**FIGURA 12** - Testes de Flotação : Correlação entre Partições de Fósforo e Ferro para o produto "Overflow"

### 3.3.2 Flotação Catiônica

Os testes de flotação com amina foram realizados com amostra previamente deslamada, objetivando a obtenção de concentrado com teor em sílica inferior a 0,9%  $\text{SiO}_2$ , maximizando-se a recuperação do processo. Os teores químicos do minério alimentado à flotação foram de 57,43% Fe ; 12,77 %  $\text{SiO}_2$  ; 0,24 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ; 0,077 % P e 4,44 % PPC.

Um planejamento de experimentos do tipo composição central, tendo como variáveis as dosagens de Amido (217, 300, 500, 700 e 783 g/t) e de Amina (23, 40, 80, 120 e 137 g/t) foi utilizado para realização dos testes de flotação. O pH foi mantido em torno de 10,5.

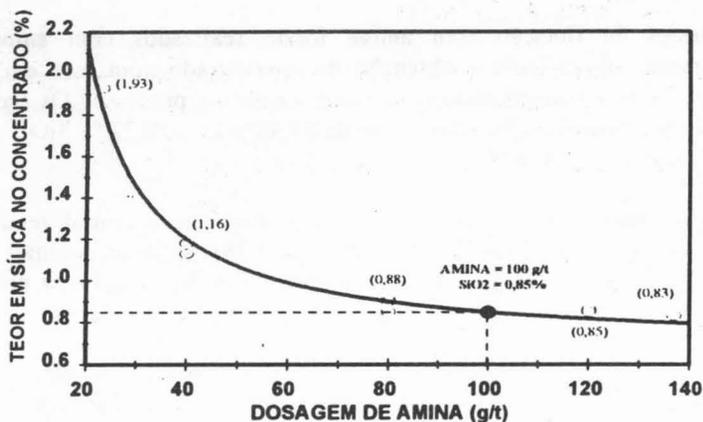
A análise estatística dos resultados mostrou que os teores em sílica do concentrado são influenciados apenas pelas dosagens de amina; a recuperação em massa do processo depende das dosagens de amido e amina, segundo as formas representadas nas figuras 13 e 14, respectivamente (os números entre parêntesis correspondem aos resultados obtidos para cada nível das variáveis).

A figura 13 mostra que, para a obtenção de teor igual a 0,85%  $\text{SiO}_2$  no concentrado, é necessária a adição de 100 g/t de amina. O gráfico mostra também que a variação nos teores de sílica no concentrado é pequena, a partir de 80 g/t de coletor, indicando dificuldades para a realização de teores inferiores a 0,8 %  $\text{SiO}_2$ .

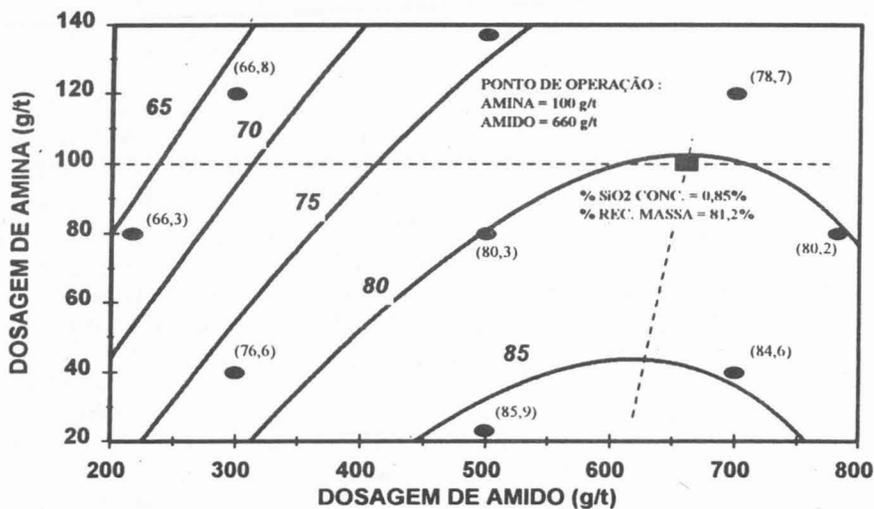
A figura 14 ilustra a metodologia adotada para determinação da dosagem de amido que proporcione a melhor recuperação do processo, subordinada ao teor requerido para o concentrado. O ponto de operação, determinado para as dosagens de amido e amina, está indicado nesta figura, sendo definido pelo cruzamento da linha de dosagem de amina igual a 100 g/t, que produz teor de 0,85% de  $\text{SiO}_2$  no concentrado, e da linha que passa pelos pontos de máximo das superfícies de resposta. Desta forma, determinou-se dosagens de 100g/t de amina e 660 g/t de amido, com o modelo prevendo 0,85% de  $\text{SiO}_2$  no concentrado e 81,2 % de recuperação em massa.

Os resultados desta série de testes mostraram que o processo de flotação catiônica reversa de quartzo é extremamente seletivo na concentração do minério hidratado de Alegria. Certamente, grande contribuição aos resultados da flotação foi dada pela remoção quase total das lamelas do minério no processo precedente, o que pode não ser possível em aplicações industriais de deslamagem por circuitos de hidrociclones.

Como esperado, em virtude da rejeição das partículas de quartzo pelo processo, isentas de fósforo, houve enriquecimento em fósforo no concentrado da flotação, que analisou, em média, 0,086 % P.



**Figura 13 - Testes de Flotação com Amina : Determinação da Dosagem de Coletor para Teor em Sílica no Concentrado = 0,85 %**



**Figura 14 - Testes de Flotação com Amina : Superfícies de Resposta para Recuperações em Massa na Flotação. Determinação da Dosagem Ótima de Amido (Teor em Sílica no Concentrado = 0,85%)**

#### 4 CONCLUSÕES

A complexidade do problema de remoção do fósforo em minérios de ferro nasce, fundamentalmente, da sua forma de ocorrência nestes depósitos minerais. O fósforo encontra-se predominantemente associado às limonitas e à goethita. Nesta primeira forma de ocorrência pode ser seletivamente removido por moagem e deslamagem, numa relação entre remoção de fósforo e perda em ferro de aproximadamente 2:1. Determinou-se que aproximadamente 30% do fósforo contido no minério podem ser removidos do minério por deslamagem, realizada com auxílio dos reagentes dispersantes hidróxido e tripolifosfato de sódio.

O processo de flotação não foi demonstrado viável como etapa para redução do teor em fósforo do minério, tendo em vista a associação do fósforo aos minerais de ferro e a inexistência de minerais fosfatados no minério.

O balanço metalúrgico final, obtido para a rota de processos adotada, determinou recuperação em ferro de 71,3%, com teores de 0,85%  $\text{SiO}_2$  ; 0,25%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 0,085 P no concentrado. Estes resultados indicam que o minério hidratado (fosforoso) em estudo pode ser utilizado em blendagens com minério de baixo fósforo, para produzir concentrados de baixos teores em sílica e alumina. A capacidade de deslamagem do circuito industrial deve ser avaliada para permitir identificar os níveis de participação do minério hidratado nas blendagens alimentadas. O aproveitamento deste minério será mais facilitado pelas especificações químicas vigentes para concentrados destinados a processos siderúrgicos de Alto-Forno.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - COELHO, E. M., ARAUJO, A. C., SILVA, J. M. **Estudo Do Fósforo no Minério de Ferro da Mina de Alegria - Primeiro Relatório de Progresso**. Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, 1988 (Relatório de Consultoria Técnica).
- [2] - KOKAL, H. R. **The Origin of Phosphorus in Ironmaking Raw Materials and Methods of Removal - A Review**. In: Annual Meeting of the Minnesota Section - AIME, 63, Duluth, Minnesota, 1990. Proceedings.
- [3] - ARAUJO, M. A. C. **Localização Mineralógica do Fósforo nos Sínteres e Pelotas de Minério de Ferro**. Belo Horizonte : UFMG, 1994. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, 1994.
- [4] - RABELO, P. J. B. **Estudos de Caracterização e Redução do Teor em Fósforo do Minério de Ferro da Mina de Alegria, Mariana, MG**. Belo Horizonte: UFMG, 1994. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, 1994
- [5] - BARBOUR, A. P. **Distribution of Phosphorus in Iron Ore Deposits of Itabira, Minas Gerais**. Economic Geology, v. 68, p.58-64, 1969.
- [6] - GRAHAM, J. **Phosphorus in Iron Ore from the Hamersley Iron Formation**. In: Proceedings : Australian Institute of Mining and Metallurgy, v.246, p.41-42, 1973.
- [7] - PARKS, G. A. **The Isoelectric Point of Solid Oxides, Solid Hydroxides and Aqueous Hydroxo-Complexes Systems**. Chemical Reviews, v.65, p.177-198, 1965.

## PROCESSING OF THE HYDRATED IRON ORE FROM ALEGRIA MINE, MARIANA, MG

Microprobe and electronic microscopy characterization studies have shown that phosphorus occurs intimately associated with hydrated iron minerals (limonites and goethite) in a high phosphorus iron ore of the Alegria Complex (phosphorous waste).

Removal of approximately 30% of the phosphorus contained in the ore was accomplished by desliming with sodium hydroxide and tripolyphosphate (at pH 10).

Flotation with anionic, cationic and amphoteric collectors was ineffectual aiming at the proposed objective. Silica grade in concentrate below 1% SiO<sub>2</sub> was obtained with the cationic flotation of quartz.

Regardless of the levels of removal attained, the final concentrate phosphorus grade of 0,085% P did not meet the specifications required for Direct Reduction processes. Silica and alumina grades were found below the specified limits for the concentrate.

Key-words: Phosphorus in Iron Ore, Desliming, Flotation