

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

**Mitigação dos Efeitos de Cátions Ca^{2+} na Flotação
Catiônica Reversa de Minério de Ferro**

Autor: Carlos Roberto Silva Mamede
Orientador: Prof. Doutor Roberto Galéry
Maio / 2016

Carlos Roberto Silva Mamede

Mitigação dos Efeitos de Cátions Ca^{2+} na Flotação Catiônica Reversa de
Minério de Ferro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Roberto Galéry

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2016

M264m	<p>Mamede, Carlos Roberto Silva. Mitigação dos efeitos dos cátions Ca^{2+} na flotação catiônica reversa do minério de ferro [manuscrito] / Carlos Roberto Silva Mamede. - 2016. xii, 76 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Roberto Galéry.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: 73-76.</p> <p>1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Flotação - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses. I. Galery, Roberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 622(043)</p>
-------	--

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1. Minério de Ferro.....	6
3.2. Flotação	12
3.2.1. Reagentes Utilizados na flotação	16
3.2.1.1. Amido	16
3.2.1.2. Amina	17
3.2.1.3. Espumantes	22
3.2.1.4. Complexantes	23
3.3. Efeito da dosagem de cal hidratada na polpa e flotação.....	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1. Recebimento e Caracterização Inicial das Amostras.....	32
4.2. Fluxo simplificado dos testes	33
4.3. Teste piloto de moagem.....	35
4.4. Homogeneização e quarteamento de amostras de pequeno volume .	37
4.5. Distribuição Granulométrica.....	38
4.6. Deslamagem em <i>loop</i>	39
4.7. Flotação em Bancada	40

4.8. Análise Química	41
4.9. Mineralogia	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1. Caracterização Inicial das Amostras	43
5.2. Deslamagem.....	48
5.3. Flotação	50
6. CONCLUSÃO	70
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

Lista de Tabelas

Tabela III.1 – Principais óxidos e oxihidróxidos de ferro (Schwertmann e Cornel, 1991).....	7
Tabela III.2 – Coletores catiônicos (Lelis, 2014 adaptado de Smith e Akhtar, 1976).....	19
Tabela IV.1 – Determinação da dosagem de cal para cada faixa de pH da deslamagem.....	35
Tabela IV.2 – Dimensões internas do moinho piloto.....	36
Tabela IV.3 – Carga de bolas.....	36
Tabela IV.4 – Classificação dos minerais segundo padrão CPT.	42
Tabela V.1 – Granuloquímica da fração britado a - 25,00mm.....	44
Tabela V.2 – Balanço granulométrico da moagem.	47
Tabela V.3 – Balanço da deslamagem em loop.....	49
Tabela V.4 – Distribuição granulometria dos fluxos.	50
Tabela V.5 – Especificações para flotação com cal variando pH de flotação e dosagem de amina.....	51
Tabela V.6 – Resultados químicos para flotação com cal variando pH de flotação e dosagem de amina.	52
Tabela V.7 – Especificações para flotação com cal variando pH de deslamagem.....	53
Tabela V.8 – Resultados químicos para flotação com cal variando pH de deslamagem.....	54
Tabela V.9 – Especificações para flotação com cal adição de espumante.....	55

Tabela V.10 – Resultados químicos para flotação com cal adição de espumante.	56
Tabela V.11 – Especificações para flotação com cal adição anteriormente a deslamagem reduzindo pH.	57
Tabela V.12 – Resultados químicos para flotação com cal adição anteriormente a deslamagem variando pH.	58
Tabela V.13 – Especificações para flotação com cal adição de complexante.	60
Tabela V.14 – Resultados químicos para flotação com cal adição de complexante.....	60
Tabela V.15 – Especificações para flotação com cal usando como coletor amido amina.....	61
Tabela V.16 – Resultados químicos para flotação com cal utilizando amido amina.	62
Tabela V.17 – Especificações para flotação com cal usando como coletor amido amina e complexante SI 7020.....	63
Tabela V.18 - Resultados químicos para flotação com cal utilizando amido amina e complexante SI 7020.....	64
Tabela V.19 – Especificações para flotação com cal usando como coletor Flotigam 5806.	64
Tabela V.20 – Resultados químicos para flotação com cal usando como coletor Flotigam 5806.	65
Tabela V.21 – Especificações para flotação com cal usando complexante EDTA.	66
Tabela V.22 – Resultados químicos para flotação com cal complexante EDTA.	66
Tabela V.23 - Especificações para flotação com dosagem estagiada.	67
Tabela V.24 – Resultados químicos para flotação com dosagem estagiada... ..	68

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Localização do município de Conceição do Mato Dentro (Fonte IBGE, 2016).	1
Figura 1.2 – Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento e transporte do minério (Fonte: Gerência de Desenvolvimento de Processos e Tratamento de Minério - Vale, 2012).....	2
Figura 3.1 – Potencial zeta do quartzo e da hematita em função do pH (Vieira, 1995).....	15
Figura 3.2 – Estrutura da molécula de amilopectina (Turrer 2004).	16
Figura 3.3 – Estrutura da molécula de amilose (Turrer 2004).....	17
Figura 3.4 – Amina (Nomenclatura: nome do radicalAMINA) (Silva, 2004).	18
Figura 3.5 – Curva esquemática de dissociação para aminas primárias, em função do pH (Peres, 2003).	20
Figura 3.6 – Modelo de estruturação das moléculas surfatantes na película da água (Veras, 2010).	23
Figura 3.7 – Efeito do EDTA na flotação catiônica do quartzo com 2,5 mg/L de amina em presença de 650 mg/L de espécies de Al em pH 10 e 100 mg/L de espécie de Al em pH 7,5 (Araujo e Coelho, 1992).	24
Figura 3.8 – Distribuição de carga na dupla camada e potencial zeta antes e depois da adição de Ca^{2+} (Wills, B.A, 2016).	26
Figura 3.9 – Mecanismo de geração de carga na superfície do quartzo.....	27
Figura 3.10 – Representação esquemática da DCE e da distribuição de potencial. (a) carga da superfície (b) Plano de Stern (c) Camada difusa (Fuerstenau e Palmer, 1976).	28
Figura 3.11 – Modelo da dupla camada elétrica na adsorção não específica: (a) esquema da DCE; (b) distribuição do potencial eletrostático (Parks, 1975). ...	29

Figura 3.12 – Modelo de Stern da dupla camada elétrica, contemplando adsorção específica superequivalente: (a) esquema da DCE; (b) distribuição do potencial eletrostático (Parks, 1975).....	30
Figura 3.13 – Adsorção de cálcio na superfície do quartzo, em função de pH para solução de 100 ppm de Ca^{2+} (Fuerstenau e Palmer, 1976).....	31
Figura 4.1 – Fluxograma do circuito piloto de britagem.	33
Figura 4.2 – Fluxograma da moagem, classificação e deslamagem em escala piloto.	33
Figura 4.3 – Fluxograma do estudo de cal.....	34
Figura 4.4 – Moinho piloto Nordberg AM 435.....	35
Figura 4.5 – Divisor rotativo.	37
Figura 4.6 – Peneirador Suspenso e Mastersizer 2000.	38
Figura 4.7 – Loop de deslamagem Akaflex de 1,5”.....	39
Figura 4.8 – Célula de flotação em bancada.....	40
Figura 5.1 – Fotomicrografias evidenciando a ocorrência de hematitas granulares, lamelares e sinuosas.....	46
Figura 5.2 – Fotomicrografias evidenciando a ocorrência de quartzo.....	47

Lista de Equações

Equação 3.1.....	14
Equação 3.2.....	25

Lista de Gráficos

Gráfico 5.1 – Distribuição Granulométrica do britado a menos 25,00mm.	45
Gráfico 5.2 – Quantificação mineralógica do produto moído em 0,150mm.....	45
Gráfico 5.3 – Distribuição granulométrica dos fluxos da britagem, moagem e deslamagem.....	48
Gráfico 5.4 – Estudo de reagentes com e sem cal variando pH de flotação e dosagem de amina.....	53
Gráfico 5.5 – Estudo de reagentes com cal variando pH de deslamagem.....	55
Gráfico 5.6 – Estudo de reagentes com cal utilizando o espumante Montanol 800.....	57
Gráfico 5.7 – Estudo de reagentes com cal variando o pH de adição de cal... ..	59
Gráfico 5.8 – Estudo de reagentes com cal utilizando o complexante Flotisor SI 7020.....	61
Gráfico 5.9 – Estudo de reagentes com cal utilizando coletor amido amina... ..	63
Gráfico 5.10 – Estudo de reagentes com cal utilizando os coletores amido amina e complexante Flotisor SI 7020.....	64
Gráfico 5.11 – Estudo de reagentes com cal utilizando o coletor Flotigam 5806.....	65
Gráfico 5.12 – Estudo de reagentes com cal utilizando o complexante EDTA.....	67
Gráfico 5.13 – Estudo de reagentes com cal dosagem estagiada.....	68
Gráfico 5.14 – Estudo de reagentes para flotação com cal – Melhores resultados.....	69

“O conhecimento dirige a prática; no entanto, a prática aumenta o conhecimento.” – (Thomas Fuller).

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por sempre estar ao meu lado, me capacitar e ter me dado força para avançar com este trabalho.

A minha mãe Ulda, exemplo de vida pessoal e profissional, a minha esposa Barbara pelo incentivo e amparo em todos os momentos.

À Vale S/A, na pessoa de Marco Túlio Santiago Ferreira, gerente de Desenvolvimento de Processos de Tratamento de Minérios, por todo o apoio.

Agradeço à equipe do Centro de Pesquisas Tecnológicas – CPT – VALE pela execução dos ensaios e análises.

Agradeço também, em especial, o Engenheiro Armando Rodrigues e a Engenheira Tatiane Gonçalves, ambos da Gerência de Desenvolvimento de Processos de Tratamento de Minérios – VALE, pela paciência e troca de informações durante o desenvolvimento deste estudo.

Aos professores Galéry e Toninho pela amizade, dedicação e disponibilidade na orientação da pesquisa.

Resumo

O atual cenário do minério de ferro apresenta diferentes desafios, os depósitos de hematita estão próximos de serem exauridos e com isso tem início a exploração dos depósitos de itabirito, em paralelo a esse movimento o aproveitamento máximo dos atuais ativos das usinas de beneficiamento é um objetivo. O projeto Serra da Serpentina, desenvolvido pela Vale, é um importante vetor no aproveitamento de itabiritos pobres do Quadrilátero Ferrífero. O ponto crítico nesta opção de projeto é o transporte do minério (através de mineroduto) entre a mina e a usina, localizadas a uma distância de 150km. Os problemas mais sérios em um sistema de bombeamento de polpa a longa distância como esse são a obstrução e compactação do material sedimentado dentro da tubulação (formação de *plug*). Uma alternativa para prevenir a ocorrência desses problemas é a adição de cal à polpa transportada. Porém, este reagente pode trazer efeitos deletérios aos processos subsequentes, mormente a flotação, devido à presença de cátions Ca^{2+} . Para tal, foi avaliado o emprego de diferentes tipos de coletores (EDA-C, Amido Amina MDB 1520, 1521 e 1325, Flotigam 5806) complexante (Flotisor SI 7020) e espumante (Montanol 800) na flotação com cal e estudos de pH com a melhor condição de dosagem dos reagentes, buscando máxima flotabilidade. O ensaio de flotação padrão rougher/cleaner utilizado como referência sem cal, produziu um pellet feed com teor de 0,66% sílica no concentrado e 29,81% de ferro no rejeito. Com a adição da cal, há impacto direto na qualidade do produto, sendo que nenhum ensaio apresentou a condição de $\text{SiO}_2 < 1,00\%$ no concentrado. Dentre todos os reagentes testados, destaca-se a aplicação do complexante EDTA em conjunto com a amina EDA-C e o griz de milho, o mesmo consegue baixar o teor de sílica no concentrado e reduz a partição de ferro no rejeito, ficando os teores respectivamente 0,61% e 23,96%. Os resultados mostraram ser possível obter um concentrado com a qualidade das premissas do projeto, SiO_2 menor que 1,00%, mesmo após a adição da cal.

Palavra chave: Cátion Ca^{2+} , flotação catiônica, minério de ferro

Abstract

The current iron ore scenario presents various challenges; the hematite deposits are close to being depleted and, thereby, the exploitation of the itabirite deposits begins. Concomitant with this movement, the maximum use of the current processing plants units is a goal. The Serra da Serpentina Project, developed by Vale, is an important vector for the reclamation of low grade itabirites from the Iron Quadrangle. The critical point in this project option is the transportation of the ore (through a pipeline) between the mine and the plant, separated by a distance of 150km. The most serious issues in a long distance pulp pumping system like this are the obstruction and compaction of the settled material inside the pipe (plug formation). An alternative for preventing the occurrence of these problems is the addition of lime to the transported pulp. However, this reagent can bring deleterious effects on subsequent processes, especially on flotation, due to the presence of Ca^{2+} cations. To do so In order to achieve this goal, an evaluation of the use of different types of collectors (EDA-C, MDB 1520, 1521 e 1325, Flotigam 5806), complexants (Flotisor SI 7020) and frothers (Montanol 800) on flotation with lime and pH studies with the best condition of reagent dosing were performed, aiming maximum floatability. The standard rougher/cleaner flotation test used as reference without lime produced a pellet feed with grades of 0.66% silica on the concentrate and 29.81% iron on the tailings. The addition of lime affects the product quality directly, once none of the tests presented results with $\text{SiO}_2 < 1.00\%$ on the concentrate. Among the reagents that were tested, the use of the EDTA complexant with the EDA-C amine and the corn grits stands out. It can lower the silica grade on the concentrate and reduces the iron partition on the tailings, resulting in grades of 0.61% and 23.96%, respectively. The results showed that it is possible to obtain a concentrate with the quality in the project assumptions, SiO_2 lower than 1.00%, even after the addition of lime to pump the ground material.

Keywords: Ca^{2+} , cationic flotation, iron ore

1. INTRODUÇÃO

O atual cenário do minério de ferro apresenta diferentes desafios, os depósitos de hematita estão próximos de serem exauridos e com isso tem início a exploração dos depósitos de Itabirito, em paralelo a esse movimento o aproveitamento máximo dos atuais ativos das usinas de beneficiamento é um objetivo. O projeto Serra da Serpentina, desenvolvido pela Vale, é um importante vetor no aproveitamento de itabiritos pobres do Quadrilátero Ferrífero, o mesmo será uma alternativa potencialmente atrativa para a continuidade da capacidade produtiva de ferrosos na Vale.

O projeto Serpentina está localizado na região central do estado de Minas Gerais, figura 1.1, no município de Conceição do Mato Dentro, a cerca de 164km de Belo Horizonte e 150km de Itabira. O município está inserido em antiga área de mineração, marcada pela extração de ouro e diamante ao longo do século XVIII, também constituinte de uma importante rota do comércio de pedras preciosas até alcançar o Distrito Diamantino, situado a 145km quilômetros ao norte (Paula, 2007, p.282), o que nos remete à tradição mineradora do referido município.



Figura 1.1 – Localização do município de Conceição do Mato Dentro (Fonte IBGE, 2016).

Dentre as várias opções de projeto para o transporte do minério até Itabira o foco abordado neste estudo será o transporte a partir de Conceição do Mato Dentro por mineroduto, sendo necessária a adequação granulométrica do minério, P95 em 0,150mm, no referido município.

As operações unitárias em Conceição do Mato Dentro serão as seguintes: britagem primária até a terciária, moagem, espessamento e alimentação do mineroduto. Em Itabira serão: deslamagem, concentração e espessamento. A figura 1.2 apresenta o fluxograma simplificado.

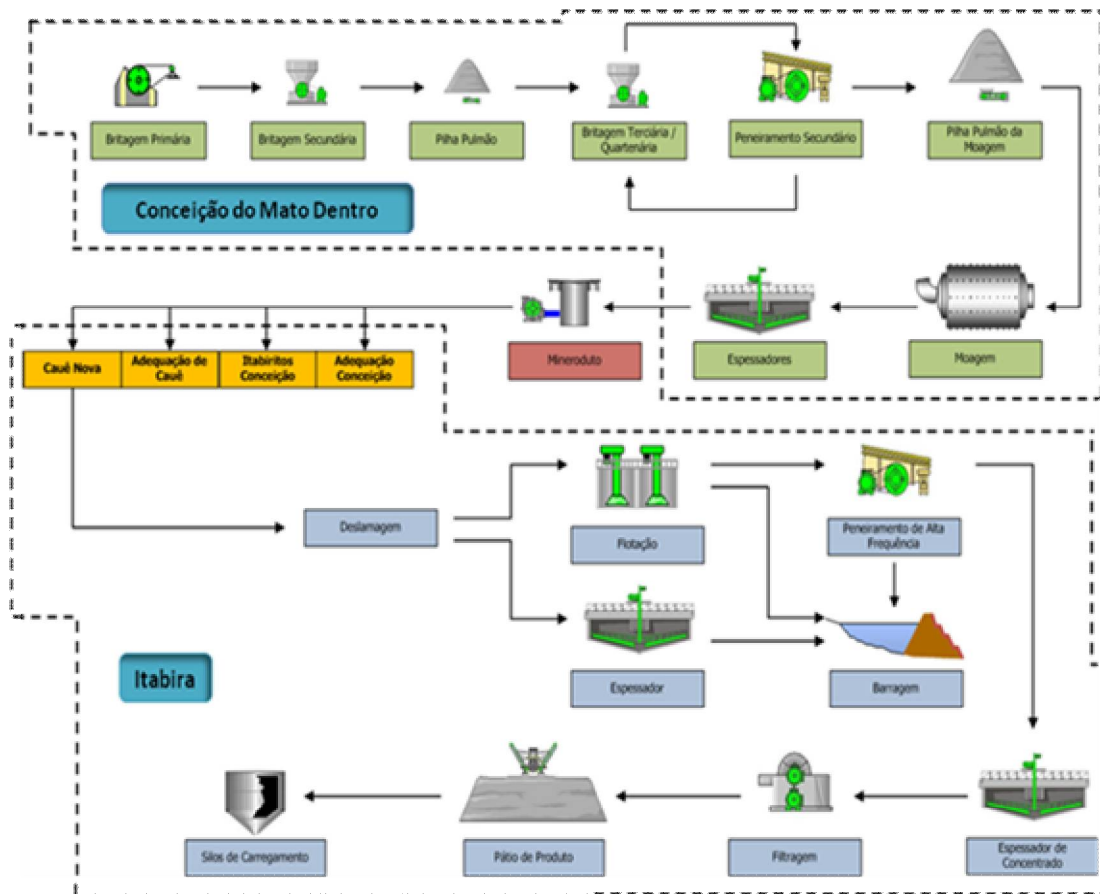


Figura 1.2 – Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento e transporte do minério (Fonte: Gerência de Desenvolvimento de Processos e Tratamento de Minério - Vale, 2012).

Os mais sérios problemas em um sistema de bombeamento de polpa a longa distância como esse são a obstrução e compactação do material sedimentado dentro da tubulação (formação de *plug*). Para minimizar tal efeito, que pode prejudicar muito o reinício da operação, adiciona-se cal à polpa de minério de ferro transportada pelo mineroduto. A cal foi escolhida neste caso específico como principal reagente devido a custo e sua ampla aplicação nas operações com mineroduto.

Com a adição desse reagente ocorre a alteração das características do material bombeado (adequação das condições de dispersão): evita o deslizamento do material nos trechos inclinados deixando uma camada fina de água sobre o minério sedimentado, que permite a repolpagem, e deixa o sedimento pouco compacto mesmo após um longo período de repouso (Bragança, 2008).

Porém um revés significativo de desempenho pode ser constatado na deslamagem e flotação, com a alteração físico-química adquirida pela polpa com a adição da cal. Neste trabalho de pesquisa estuda-se especificamente o efeito da adição de cal na flotação catiônica reversa de minério de ferro na presença de cátions Ca^{2+} .

A operação unitária de flotação é um processo que depende das características químicas da polpa, grau de hidrofobicidade das partículas, hidrodinâmica do sistema e dispersão do gás (Flint, 1973). Segundo Li *et al* (1993), os princípios básicos da flotação podem ser divididos em:

Química de superfície:

- Interações;
- Energia;
- Adsorção em interfaces;
- Molhabilidade natural de minerais;
- Hidrofobização das superfícies minerais através dos reagentes surfatantes.

Hidrodinâmica:

- Dispersão das bolhas de ar;
- Suspensão de sólidos;
- Colisão e adesão entre partículas minerais e bolhas de ar;
- Estabilidade do agregado partícula-bolha.

No caso específico do minério transportado através de mineroduto na forma de polpa, alguns desses fatores podem ser afetados pela presença de reagentes utilizados durante o processo, sendo neste caso a cal hidratada, que é adicionada à polpa de minério de ferro com o objetivo de adequar as condições de dispersão da mesma para melhor bombeamento.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é avaliar a influência, com possível ação mitigadora, dos cátions Ca^{2+} na flotação de minério de ferro após à adição da cal na polpa bombeada através do mineroduto.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar o emprego de diferentes tipos de coletores, complexantes e espumante na flotação com a presença de cátions Ca^{2+} ;
- Efetuar estudos de pH com a melhor condição de dosagem dos reagentes, buscando máxima flotabilidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É apresentada neste capítulo uma breve revisão da literatura técnica, compreendendo aspectos gerais sobre minérios de ferro, flotação e possíveis influências da cal hidratada neste último.

3.1. Minério de Ferro

A indústria é capaz de transformar matéria-prima em bens de consumo e produção. Sem a indústria, a nossa capacidade de transformação de matéria-prima seria limitada, e o abastecimento de grandes massas populacionais chegaria a ser inviável dentro da realidade em que hoje vivemos.

Dentro deste conceito, pode-se dizer que o minério de ferro como matéria-prima está diretamente associado ao desenvolvimento humano, possibilitando a sociedade grande avanço na vida moderna.

O maior e mais importante consumidor de ferro é a indústria siderúrgica (99%), onde é utilizado como principal matéria prima nos processos de obtenção de ferro primário (alto forno e redução direta). O ferro é empregado também (1%) como carga na indústria de ferro-liga, cimento e eventualmente na construção de estradas. O elevado teor de ferro dispensa em alguns casos, os processos de concentração, podendo o minério ser utilizado diretamente nos processos de redução apenas com a adequação granulométrica. Os procedimentos físicos para a preparação mecânica têm por finalidade a obtenção de minérios de composição e dimensões uniformes e adequação à boa operação nos reatores de redução (Quaresma, 1987).

A economicidade do aproveitamento dos minérios está também intrinsecamente ligada às condições geológicas e metalogênicas das jazidas. A mineralogia do minério, os teores de ferro, a estrutura e a textura das rochas que contém o mineral-minério, a paragênese e toda uma série de parâmetros

geológicos influem para que os empreendimentos minerários possam se tornar uma realidade econômica (Quaresma, 1987).

Até hoje, são conhecidos, na natureza, treze óxidos, oxihidróxidos e hidróxidos de ferro. Os mais importantes estão listados na Tabela III-1. Além deles, existem, ainda, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ e FeOOH de alta pressão. Todos os óxidos e oxihidróxidos consistem de Fe, O e/ou OH, diferindo em composição, na valência do Fe e, acima de tudo, na estrutura cristalina (Schwertmann e Cornel, 1991).

Segue, na Tabela III.1, uma revisão dos principais óxidos de ferro: hematita, martita, magnetita, goethita, limonita e do quartzo.

Tabela III.1 – Principais óxidos e oxihidróxidos de ferro (Schwertmann e Cornel, 1991).

Oxihidróxidos		Óxidos	
Fórmula	Mineral	Fórmula	Mineral
$\alpha\text{-FeOOH}$	Goethita	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
$\beta\text{-FeOOH}$	Akaganeita	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Maghemita
$\gamma\text{-FeOOH}$	Lepidocrocita	Fe_3O_4	Magnetita
$\delta\text{-FeOOH}$	Ferroxihita		
$\text{Fe}_5\text{HO}_8\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Ferrhidrita		

a) Hematita e Martita (Fe_2O_3)

Dados Gerais: Frequentemente é muito pura. O conteúdo de FeO, sem exceção, parece ser devido à magnetita misturada. Cristaliza-se no sistema hexagonal, classe escalenoédrica-hexagonal. Os cristais são de morfologias muito diferentes, podendo estar sob a forma de placas delgadas agrupadas em forma de rosetas; mais raramente podem ser nitidamente romboédricos; usualmente terrosa, também aparece em configurações botrioidais a

reniformes com estrutura radiada, minério em forma de rim; pode ser também micácea e laminada, minério especular. Chama-se martita quando em pseudomorfos octaédricos sobre a magnetita. Sua dureza varia de 5,5 a 6,5 e a densidade de 4,9 a 5,3 e é igual, em cristais puros, a 5,26. Sua cor varia de castanho a vermelhada a preta e seu traço é vermelho acastanhado. O brilho é metálico azul do aço, comumente variando de embaçado, nos cristais, a opaco nas variedades terrosas. Sua composição básica tem 70% de Fe e 30% de O, podendo também conter titânio. O seu nome deriva-se de uma palavra grega cujo significado é sangue, em alusão à cor do mineral pulverizado (Dana, 1981; Ramdohr, 1980).

Ocorrência: A hematita é um mineral amplamente distribuído em rochas de todas as idades e forma o minério de ferro mais abundante e importante. Pode ocorrer como produto de sublimação em conexão com as atividades vulcânicas. Ocorre nos depósitos metamórficos de contato e, como mineral acessório, nas rochas ígneas feldspáticas, tais como o granito. Substitui também em grande escala as rochas silícicas. É encontrada desde a forma de escamas microscópicas até a de massas enormes em relação com as rochas metamórficas regionais, onde pode ter se originado pela alteração da goethita, siderita ou magnetita. Tal como a goethita, pode ser formada em massas ou camadas irregulares como resultado da ação do tempo sobre as rochas contendo ferro. Os minérios oolíticos são de origem sedimentar e podem ocorrer em camadas de tamanho considerável. São encontrados nos arenitos vermelhos, como o material de cimentação, que liga entre si os grânulos de quartzo (Dana, 1981).

Comportamento na microscopia de luz refletida: É muito brilhante e branca. Em comparação com sulfetos amarelos, e especialmente com o ouro, a hematita aparece embaçada e muito mais azul-acinzentada do que dá a impressão, quando em contrastes normais. Reflexões internas: vermelho intenso - no ar são visíveis ocasionalmente; no óleo e/ou com nicóis cruzados são abundantes (Ramdohr, 1980).

b) Magnetita (Fe_3O_4)

Dados Gerais: Cristaliza-se no sistema isométrico, classe hexaoctaédrica. Frequentemente ocorre em cristais de hábito octaédrico, geminados ocasionalmente. Os dodecaedros são mais raros, bem como outras formas. Os dodecaedros podem ser estriados paralelamente à interseção com as faces do octaedro. Usualmente é maciça granular, com granulação grossa ou fina. Apresenta dureza igual a 6 e densidade igual a 5,18. É fortemente magnética, comportando-se como um ímã natural. Tem cor e traço pretos, brilho metálico, com perceptíveis tons variados de marrom ou cinza, azul do aço em partes intemperizadas. Em sua composição básica apresenta 72,4% de Fe e 27,6% de O. A sua composição normalmente corresponde àquela mostrada pela fórmula, contudo, algumas análises mostram alguns traços de magnésio e manganês bivalente. No que concerne à estrutura, parece que a fórmula da magnetita seria mais apropriadamente escrita como $\text{Fe}^{\text{III}}(\text{Fe}^{\text{II}} \text{Fe}^{\text{III}})\text{O}_4$. Nas formas de alta temperatura, Fe^{II} pode ser substituído por Mg, Mn, Zn, Ni, Ti; e Fe^{III} por Al, Ti, V, Cr. O seu nome deriva-se, provavelmente, da localidade Magnesia, nos limites da Macedônia (Dana, 1981; Ramdohr, 1980).

Ocorrência: A magnetita é um mineral de ferro comum. Encontra-se distribuída, sob a forma de um mineral acessório, em muitas rochas magmáticas. Em certos tipos de rocha, através de segregação magmática, torna-se um dos principais constituintes e pode, assim, formar grandes corpos de minério. Esses corpos são, muitas vezes, altamente titaníferos. A magnetita está associada, mais comumente, com rochas metamórficas cristalinas; ocorre também, frequentemente, em rochas ricas de minerais ferro-magnesianos, a saber, dioritos, gabros e peridotitos. Ocorre também sob a forma de camadas ou lentes imensas incluídas em rochas metamórficas antigas. Encontra-se nas areias pretas das praias. Aparece em placas delgadas e sob a forma de crescimentos dendríticos entre as lâminas das micas. Associa-se intimamente, muitas vezes, com o coríndon, para formar o material conhecido como esmeril (Dana, 1981).

Comportamento na microscopia de luz refletida: A refletividade é moderada; a primeira impressão de cor é um cinza, com tonalidades variáveis de marrom claro (Ramdohr, 1980).

c) Goethita (FeO.OH)

Dados Gerais: A goethita é um mineral do sistema ortorrômbico, classe bipiramidal. Seus cristais apresentam habitus acicular e também agregados maciços, reniforme, estalactítico e agregados fibrosos radiais. O mineral, a que se dá o nome de minério do pântano, é geralmente de pouca consistência e de textura porosa. A sua dureza varia de 5 a 5,5 e sua densidade é 4,37, podendo chegar a 3,3 para material impuro. Apresenta brilho adamantino a opaco, podendo ser sedoso em algumas variedades finamente escamosas ou fibrosas. Sua cor varia de castanho-amarelada a castanho escuro; amarelo a vermelho-alaranjada em seções delgadas. O seu traço é castanho amarelado. Além da fórmula básica FeO.OH, pode conter quantidades variáveis de água adsorvida, bem como Al₂O₃, CaO, BaO, SiO₂. Sua composição básica tem 62,9% de Fe, 27% de O e 10,1% de H₂O. O manganês está muitas vezes presente em quantidade acima de 5%. As variedades maciças contêm, muitas vezes, água adsorvida ou água capilar. O seu nome é uma homenagem a Goethe, o poeta alemão (Dana, 1981; Deer et al, 1977; Ramdohr, 1980).

Ocorrência: A goethita comumente ocorre, sob condições de oxidação, como um produto de intemperismo de minerais portadores de ferro, tais como siderita, magnetita, pirita e outros. Forma-se, também, como um precipitado direto, inorgânico ou biogênico, existente na água, sendo amplamente disseminado como depósito em pântanos e fontes. A goethita forma o “gossan” ou “chapéu de ferro”, sobre os filões ou vieiros metalíferos. Encontram-se grandes quantidades de goethita como mantos lateríticos residuais, resultantes da intemperização de serpentinas. Os depósitos, conhecidos pelo nome de minério de ferro do pântano, são formados por solução, transporte pela ação das águas superficiais e nova precipitação de minerais de ferro pré-existentes. A dissolução é realizada por pequenas quantidades de ácido carbônico

existente na água. O ferro é transportado como um carbonato até a superfície e depois levado pelas águas correntes para os brejos e depressões com água estagnada. Aí, o carbonato transforma-se em óxido pela evaporação da água e consequente perda do ácido carbônico e através dos agentes de ação redutora da matéria carbonosa. O óxido separa-se formando inicialmente uma espuma iridescente na superfície da água e depois vai para o fundo. Essa separação é também auxiliada pelas bactérias conhecidas como ferruginosas que absorvem o ferro da água e depois o depositam como hidróxido férrico. Nesse processo, sob condições favoráveis, as camadas de goethita impura podem ser formadas no fundo de brejos e pântanos. Tais depósitos são muito comuns, porém raramente são de suficiente pureza para serem explorados comercialmente, dado os materiais estranhos associados. Os depósitos de goethita são também encontrados com calcários portadores de ferro. O conteúdo de ferro do calcário pode ser gradualmente dissolvido por águas circulantes e, sob condições favoráveis, vir a substituir por metassomatismo o carbonato de cálcio da rocha, como goethita. Localizadas na argila, acima da formação calcárea, podem ser encontradas massas residuais de hidróxido férrico, resultado do intemperismo gradual e da solução do calcário. Esses depósitos são frequentemente de dimensões consideráveis e, dada a sua maior pureza, mais explorados que os depósitos de pântanos (Dana, 1981).

Comportamento na microscopia de luz refletida: A cor e os valores da refletividade variam bastante, dependendo do polimento, porosidade, tamanho de grão etc. Massas finamente granuladas têm, pela frequência de reflexões internas translúcidas, refletividade baixa. A birreflectância é pequena, mas sempre visível em grãos grossos. De modo geral, apresenta-se cinza com anisotropismo moderado (Derr et al, 1977; Ramdohr, 1980).

d) Limonita ($\text{FeOOH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$)

A limonita é amorfa ou criptocristalina, apresentando-se sob a forma de massas mamilares e estalactícias, concrecionar, nodular, terrosa e ocasionalmente vítrea. Apresenta dureza de 4,0 a 5,5, densidade 2,7 a 4,3 e cor variando de

amarelada, amarronzada, marron alaranjada etc. Seu traço varia de amarelo a marrom avermelhado. Ela é normalmente isotrópica, mas pode mostrar também birrefringência anômala. Em luz transmitida, é amarela, com tonalidades de marrom a vermelha, sendo vermelha amarronzada em luz refletida (Dana, 1981).

Embora considerada originalmente como tendo uma fórmula definida ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), tem sido mostrado que ela constitui-se principalmente de goethita criptocristalina ou lepidocrocita, contendo água adsorvida; alguma hematita deve também estar presente.

O nome limonita não é mais aceito como um nome de mineral, mas foi previamente usado na literatura de solos para descrever-se acumulações de óxidos de ferro marrons, da cor da ferrugem. Este nome é reservado como um termo de campo ou para descrever óxidos hidratados de ferro pobremente cristalinos e de identidade desconhecida (Shwertmann e Taylor, 1977).

e) Quartzo (SiO_2)

Ocorre na forma de cristais prismáticos, com romboedros em suas pontas, dando um efeito de bipirâmide hexagonal. Usualmente é transparente ou branco, mas frequentemente é colorido por impurezas, apresentando diferentes variedades. Pode apresentar fratura conchoidal. Tem dureza 7.0 e densidade 2.65 e o brilho é vítreo. A composição química do quartzo é geralmente próxima de 100.0% de SiO_2 . Podem apresentar nas análises químicas pequenas quantidades de outros óxidos, que são geralmente devidos a pequenas inclusões de outros minerais ou a líquidos que preenchem cavidades no seu interior (Klein e Hurlbut, 1985; Ramdhor, 1980; Deer et al, 1981).

3.2. Flotação

A flotação é um dos principais processos de concentração, de maneira simples implica na separação de várias partículas sólidas, através de propriedades diferenciadoras que lhes podem ser conferidas pela adição de

surfatantes. No caso específico da flotação catiônica reversa de minério de ferro, efetuada na faixa de pH 9 a 10,5, as aminas são utilizadas como coletores da ganga silicosa e o amido como depressor dos minerais de ferro.

Essa técnica é empregada há mais de um século, viabilizando a obtenção industrial de diversos bens minerais, como sulfetos, óxidos, fosfatos, carvão, sais, platina e outros. Na indústria de minérios de ferro, a flotação reversa de quartzo tem sido empregada com sucesso para obtenção de concentrados (*pellet feed*) com elevados teores de ferro (próximos de 69%) através de células mecânicas e colunas pneumáticas. Amidos de milho ou fécula de mandioca como depressores, aminas como coletores e hidróxido de sódio como modulador de pH são os principais reagentes atualmente empregados nos circuitos de flotação de minérios de ferro.

A seletividade do processo de flotação está baseada no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar diferentes graus de hidrofobicidade. O conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associado à sua umectabilidade ou “molhabilidade” pela água. Partículas mais hidrofóbicas são menos ávidas por água. Ao contrário, partículas hidrofílicas possuem grande afinidade com a água.

Em termos de polaridade, os compostos químicos dividem-se em polares e apolares, em função de apresentarem ou não um dipolo permanente. A importância da polaridade reflete-se no fato de que existe afinidade entre substâncias ambas polares ou ambas apolares (ou não-polares), não havendo, geralmente, afinidade entre uma substância polar e outra apolar. Nos sistemas de flotação, a fase líquida é sempre a água, uma espécie polar, e a fase gasosa é quase sempre o ar, constituído por moléculas apolares (Peres et al. 1980).

Para um circuito de flotação, o tamanho máximo da alimentação pode ser estabelecido em função do tamanho de liberação do mineral útil. Portanto, em alguns casos, este tamanho é limitado pela força de adesão entre partícula e bolha (Leja, 1982). Ou seja, o fluxo ascendente de bolhas não consegue carrear partículas muito grandes. O limite inferior da faixa granulométrica é fixado em função do tamanho em que iniciam efeitos deletérios ao sistema, como o recobrimento de partículas maiores por lamas ou o consumo exagerado de reagentes devido à grande área superficial específica das partículas menores (Monte e Peres, 2002).

Araujo e Peres (1995) ressaltam que a probabilidade de ocorrer a flotação de uma dada partícula mineral é descrita como sendo um produto de três probabilidades individuais, conforme apresentado na equação a seguir:

$$PF = P_C \times P_A \times P_D$$

Equação 3.1

Onde:

PF = probabilidade de flotação;

PC= probabilidade de colisão bolha-partícula;

PA = probabilidade de adesão entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar;

PD= probabilidade do rompimento bolha-partícula (transporte).

A probabilidade de adesão (PA) está relacionada ao ambiente químico predominante em um dado sistema de flotação, ou seja, essa probabilidade poderá ser influenciada pela mineralogia, reagentes e condições da polpa, sendo controlada predominantemente pelas forças superficiais. O tamanho da partícula, da bolha e a turbulência do sistema têm influência direta na probabilidade de colisão (PC). A probabilidade de transporte (PD) relaciona diretamente a adesão do agregado partícula-bolha com o ângulo de contato formado pelos mesmos, sendo que quanto maior tal ângulo, maior é a probabilidade de transporte.

Para o processo de flotação reversa de minério de ferro o pH chamado ótimo está na faixa de 9,5 a 10,5, onde a superfície do quartzo é altamente negativa e há a maior diferença das cargas superficiais entre a hematita e o quartzo (Numela e Iwasaki, 1986). A figura 3.1 ilustra a variação do potencial zeta da hematita e do quartzo em função do pH.

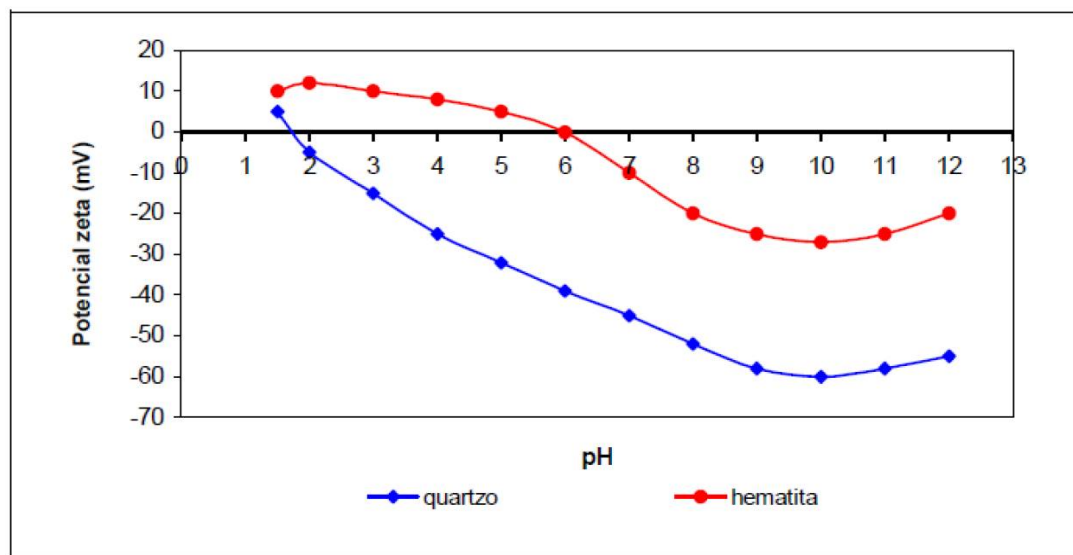


Figura 3.1 – Potencial zeta do quartzo e da hematita em função do pH (Vieira, 1995).

Pode se observar claramente na faixa de pH entre 9,5 e 10,5 a maior diferença entre as cargas superficiais da hematita e do quartzo.

Pelo fato de ambos os minerais apresentarem cargas negativas, essa diferença não é a única responsável para uma flotação efetiva, o que nos remete à adição dos surfatantes necessários.

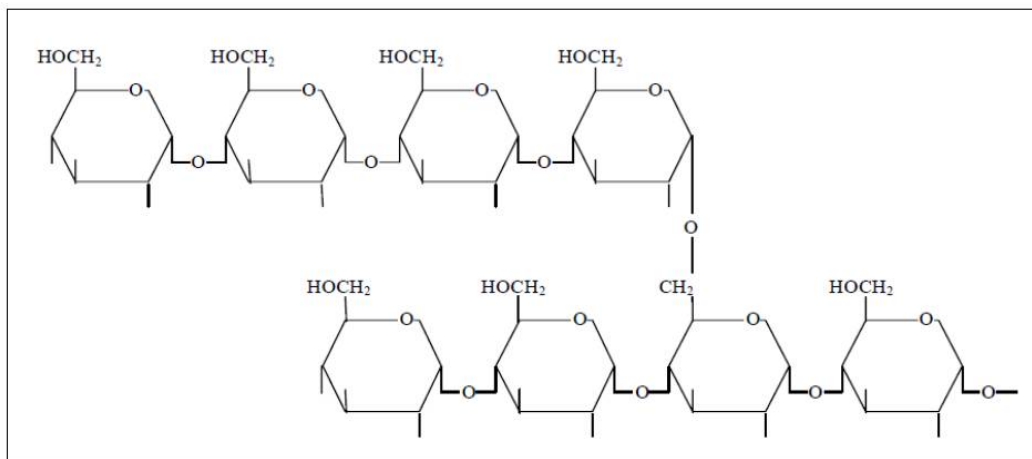
3.2.1. Reagentes Utilizados na flotação

Os reagentes são divididos de acordo com sua função específica em coletores, espumantes e modificadores ou reguladores.

3.2.1.1. Amido

O amido é um polímero de alto peso molecular (>300.000 dalton), que é encontrado em vários produtos de origem vegetal (milho, mandioca, batata, trigo, arroz, etc). Ele é formado pela condensação de moléculas de D-glicose, que podem sofrer polimerização linear (amilose, contendo de 200 a 1000 unidades de D-glicose) ou ramificada (amilopectina, contendo mais que 1500 unidades de D-glicose). A matéria ativa do amido de milho, principal depressor utilizado na depressão de óxidos de ferro, é constituída de, aproximadamente, 25% de amilopectina (polímero ramificado no qual as ramificações se unem a cadeia principal através de ligações α -1, 6 glicosídicas) e 75% de amilose (um polímero linear no qual as unidades α -D-glicose se unem através de ligações α -1, 4 glicosídicas), conforme ilustrados nas figuras 3.2 e 3.3 (Turrer, 2004).

Figura 3.2 – Estrutura da molécula de amilopectina (Turrer 2004).



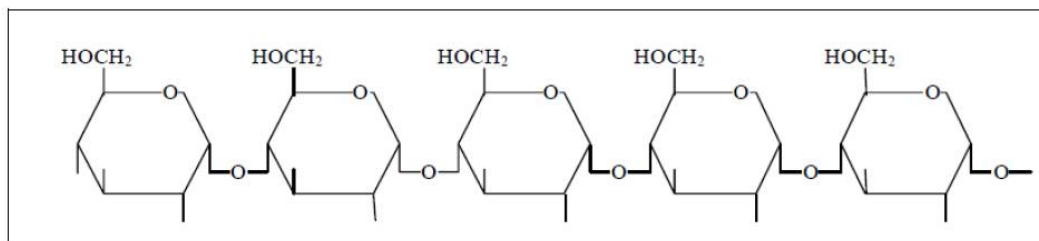


Figura 3.3 – Estrutura da molécula de amilose (Turrer 2004).

Tal matéria ativa encontra-se aprisionada dentro dos grãos de amido e, para que seja liberada, é necessário que o reagente seja submetido a um processo de preparação denominado gelatinização (Araujo et al., 2005; Whistler e Paschall, 1965).

A gelatinização do amido consiste na destruição da carapaça dos grãos e consequente liberação da matéria ativa (amilose e amilopectina) para a solução. O processo mais utilizado é o da lixiviação com hidróxido de sódio.

Os amidos não modificados contêm, além de substância amilácea (amilose + amilopectina), óleo, proteínas, umidade, fibras e matéria mineral. O óleo é inibidor de espuma, sendo recomendável que seu teor não ultrapasse 1,5%. Em comparação com amidos de milho, amidos de mandioca apresentam gomas com maior viscosidade, indicativo de maior peso molecular, e teor de óleo desprezível, reduzindo o risco de inibição da ação espumante (Peres, 2004).

3.2.1.2. Amina

Aminas são compostos orgânicos que tem como função a transformação dos minerais naturalmente hidrofílicos em minerais hidrofóbicos, suas moléculas possuem um grupo polar (“cabeça polar”) e uma cadeia hidrocarbônica não-polar.

Segundo Neder e Leal Filho (2006) a cadeia carbônica tem elevadas propriedades hidrofóbicas e a cabeça polar apresenta propriedades hidrofílicas reagindo com a água. Através da intensidade e natureza da carga iônica, pode-

se classificar os coletores em catiônicos (positivo), aniônicos (negativo), não iônicos (sem carga) e anfotéricos (positivos em pH ácido e negativo em pH alcalino). Para flotação de minério de ferro, os coletores catiônicos são os mais utilizados (Miller, 1999). Dentre estes os de maior importância são as aminas, sendo as primárias as mais usadas na indústria.

As aminas podem ser classificadas como primárias, secundárias, terciárias ou quaternárias dependendo do número de radicais hidrocarboneto ligados ao átomo de nitrogênio. Se apenas um grupo hidrocarboneto está presente com 2 átomos de hidrogênio, a amina é denominada amina primária. Da mesma forma, aminas contendo 2, 3 ou 4 grupos hidrocarboneto são denominadas aminas secundárias, terciárias ou quaternárias (Fuerstenau et al, 1985). São compostos orgânicos derivados da amônia (NH₃), conforme mostrado na Figura 3.4.

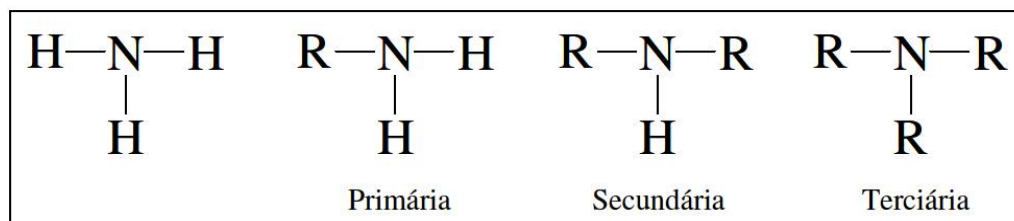


Figura 3.4 – Amina (Nomenclatura: nome do radicalAMINA) (Silva, 2004).

O grau de neutralização das aminas primárias, e também das éteraminas, é variável. Os produtos industriais normalmente são manufaturados com graus de neutralização desde 30 até 70%.

A neutralização com ácido acético é a mais comum por razões econômicas, sendo a obtenção de sal tipo cloreto (ou brometo) também viável tecnicamente. As aminas secundárias R₁R₂NH e terciárias R₁R₂NR₃ não são tradicionalmente empregadas como coletores de flotação, apesar de apresentarem boa potencialidade para a função. Os sais quaternários de amônio têm sido utilizados em escala de laboratório, especialmente quando se deseja investigar o efeito de um coletor catiônico completamente dissociado em toda a faixa de pH. Os reagentes empregados na flotação apresentam de C6 a

C20 carbonos na cadeia; homólogos mais curtos que C6 não apresentam suficiente atividade superficial, enquanto aqueles superiores a C20 tornam-se excessivamente insolúveis, chegando em alguns casos, a se tomarem pastosos. (Peres, 2003).

Tabela III.2 – Coletores catiônicos (Lelis, 2014 adaptado de Smith e Akhtar, 1976).

Coletor	Fórmula Estrutural
Sal de amida graxa primária	$\text{RNH}_3^+\text{Cl}^-$
Sal de amida graxa secundária	$\text{RR}'\text{NH}_2^+\text{Cl}^-$
Sal de amida graxa terciária	$\text{R}(\text{R}')_2\text{NH}^+\text{Cl}^-$
Diamina graxa	$\text{R-NH}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Éter-diamina	$\text{R-O}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Éteramina	$\text{R-O}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Sal de eteramina	$[\text{R-O}(\text{CH}_2)_3-\text{NH}^+][\text{CH}_2\text{COO}^-]$
Sal de sulfônico	$\text{RS}(\text{R}')_2\text{Cl}$
Sal de amônio quaternário	$\text{R}(\text{R}')_3\text{NCl}$

R – Cadeia hidrocarbônica com 10 átomos de carbonos.

R' – Cadeia de alquila curta, usualmente metil.

Baltar (2010) pondera que a adsorção da amina depende a princípio dos sítios negativos disponíveis na superfície mineral (por exemplo, carga na superfície do quartzo devido a ruptura das ligações), portanto, só poderá ocorrer acima do ponto isoelétrico. Em meio muito alcalino, apesar da maior disponibilidade de sítios negativos na superfície do quartzo, a relação $\text{RNH}_3^+/\text{RNH}_2$ diminui progressivamente, resultando em baixa recuperação do mesmo. A figura 3.5 apresenta a curva esquemática de dissociação para as aminas primárias, mostrando o ponto de inflexão da curva justamente no pH 10 onde a relação iônica/molecular começa a diminuir.

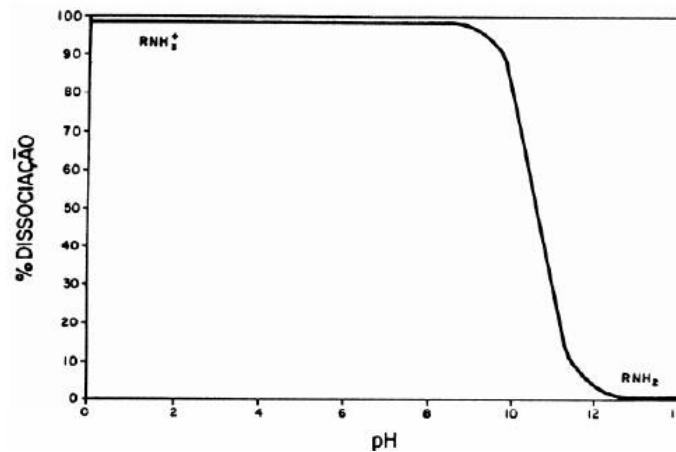


Figura 3.5 – Curva esquemática de dissociação para aminas primárias, em função do pH (Peres, 2003).

Teorias têm sido propostas para explicar os mecanismos de adsorção de coletores em superfície de minerais classificados como não sulfetos. Dentre estas merecem destaque as seguintes:

- a. Adsorção iônica ou da formação de hemi-micelas;
- b. Solubilidade;
- c. Formação de complexos ionomoleculares.

a) Teoria da adsorção iônica ou da formação de hemi-micelas

Gaudin e Fuerstenau, admitem que os coletores são adsorvidos de acordo com dois mecanismos principais:

- Interação eletrostática de íons coletores e a superfície do mineral de acordo com a teoria da dupla camada elétrica;
- Associação das cadeias hidrocarbônicas dos íons coletores por forças laterais de van der Waals, formando hemi-micelas.

Considerando-se que ocorre uma adsorção física não específica a adsorção individual de íons coletores é observada em baixas concentrações. Basicamente ocorre uma simples troca iônica na dupla camada elétrica.

Quando a adsorção de íons atinge um valor crítico, CHMC (“critical hemimicelle concentration”) ocorre a formação de hemimicelas.

Para que haja a coleta é necessária a condição: $CHMC < CMC$. Óxidos e silicatos flutam bem com coletores catiônicos em pH maior que aquele onde ocorre a reversão do sinal do potencial zeta. Isto significa dizer que o mecanismo é proposto pela teoria da adsorção iônica, pois a atração inicial será entre espécies de cargas de sinais contrários, a superfície do mineral negativa e o íon coletor positivo (Silva, 2008).

b) Teoria da solubilidade

Foi sugerida por Taggart e colaboradores, em 1930. Esta teoria assume que a adsorção de coletores nos minerais é devida a ligações químicas que seguem as leis que governam a precipitação de substâncias de baixa solubilidade.

A estrutura cristalina, as propriedades elétricas de superfície e os fenômenos de adsorção física são usualmente desconsiderados por esta teoria. Muitos exemplos mostram uma estreita relação entre a solubilidade dos complexos metal-coletor, a adsorção de coletores e flotação.

c) Teoria de formação de complexos ionomoleculares

Admite-se a adsorção de moléculas neutras e íons de um mesmo coletor. Há então uma interação entre as cadeias hidrocarbônicas das moléculas neutras e iônicas na solução (co-adsorção) através de ligações de van der Waals, posteriormente ocorre a adsorção na interface sólido-líquido. A formação destes complexos foi considerada como o principal mecanismo responsável pela adsorção de coletores em alguns óxidos e silicatos.

3.2.1.3. Espumantes

As implicações e importância das espumas durante o processo de flotação são várias, a correta estabilidade deste sistema pode promover uma melhor separação entre os minerais.

Os espumantes são reagentes tensoativos que atuam na interface líquido/gás. Pelo fato de diminuir a tensão superficial da água, os mesmos ajudam a manter as bolhas razoavelmente estáveis, formando a espuma. Os surfatantes empregados como espumantes em sistemas de flotação são compostos não iônicos, geralmente pertencentes à classe dos álcoois ou dos éteres. (Peres, 2003).

Esses tipos de tensoativos possuem cadeia hidrocarbônica curta (C_5-C_8) e ramificadas em sua estrutura molecular. Em uma extremidade têm-se o radical hidrocarbônico e na outra um grupo polar não iônico, esse arranjo propicia que as moléculas dos espumantes se abriguem na interface líquido/gás.

O radical com moléculas orgânicas se posiciona em direção ao ar e o radical polar se posiciona para água (Comley *et al.*, 2002). A figura 3.6 ilustra a disposição das moléculas do tensoativo na interface líquido/gás e seu efeito na tensão superficial.

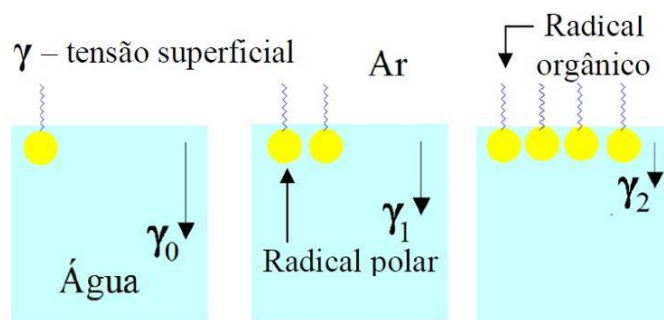


Figura 3.6 – Modelo de estruturação das moléculas surfatantes na película da água (Veras, 2010).

A adição de espumantes no sistema de flotação ocasiona modificações na formação da espuma, na estabilidade, na drenagem, no tamanho das bolhas na taxa de colapso e na seletividade em relação aos minerais de interesse. Alguns desses espumantes utilizados no processo de flotação adsorvem tanto na interface líquido-ar, como interagem com o coletor adsorvendo também na interface sólido-líquido. Esta interação entre coletor e espumante pode agir no consumo de reagentes e poder de coleta no sentido de diminuir o primeiro e aumentar o segundo (Silva, 2004).

3.2.1.4. Complexantes

A complexação é uma atração eletrostática entre um íon e um agente quelante de modo que não há transferência de elétrons entre estes. Quanto às cargas, a estrutura final terá como carga o somatório das cargas individuais de cada participante do complexo (Lin e Neto, 1998).

Os agentes complexantes também são chamados de ionóforos, que significa transportadores (foros) de íons. Eles podem ser substâncias orgânicas cíclicas ou acíclicas contendo átomos como oxigênio, nitrogênio, enxofre, etc., que possuem elétrons livres, ou seja, pares eletrônicos não compartilhados. De acordo com a posição desses heteroátomos, obtém-se uma conformação que apresenta uma cavidade, permitindo a entrada de íons metálicos. (Lin e Neto, 1998). O EDTA (ácido etilenodiaminotetracético) pode ser considerado o

reagente complexométrico (agente quelante) mais utilizado devido a sua faixa de aplicação.

Araujo e Coelho (1992) avaliaram o efeito do EDTA na flotação de quartzo e da hematita, com amina na presença de espécies de alumínio. Após a adição do EDTA a flotação catiônica de quartzo foi reativada, ou seja, minimizou o efeito depressor dos íons de alumínio na flotação reversa de minério de ferro. Conforme pode ser observado pela figura 3.7 a quantidade de agente complexante necessária para reativação do quartzo varia com o pH e concentração de Al. Aumentando a presença do agente complexante é observado proporcionalmente um aumento da flotabilidade do material neste caso específico.

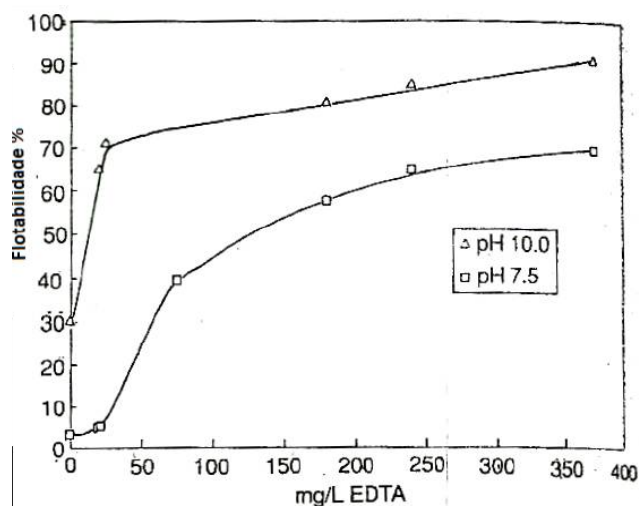


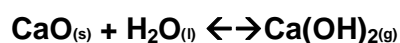
Figura 3.7 – Efeito do EDTA na flotação catiônica do quartzo com 2,5 mg/L de amina em presença de 650 mg/L de espécies de Al em pH 10 e 100 mg/L de espécie de Al em pH 7,5 (Araujo e Coelho, 1992).

3.3. Efeito da dosagem de cal hidratada na polpa e flotação

Conforme supracitado, no projeto Serra da Serpentina o minério será transportado através de mineroduto na forma de polpa de Conceição do Mato Dentro até Itabira. O reagente utilizado durante o processo de bombeamento, para garantir as propriedades reológicas da polpa é cal hidratada, a mesma é

adicionada à polpa de minério de ferro com o objetivo de adequar as condições de dispersão da mesma.

A cal adicionada neste processo reage com água e forma hidróxido de cálcio, conforme equação 3.2. O mesmo se dissocia em Ca^{2+} e CaOH^+ , liberando íons OH^- alterando o pH da solução.



Equação 3.2

Scott e Smith (1993) estudaram efeitos os cátions Ca^{2+} na flotação de quartzo e magnetita usando diamina, e averiguaram que para concentrações de CaCl_2 acima de 0,1 mol/L a recuperação na flotação, tanto para o quartzo como para a magnetita, diminui. Isso pode ser atribuído à adsorção de cátions Ca^{2+} na dupla camada das duas espécies minerais.

Há uma série de interações que regem o fenômeno da coagulação/dispersão da polpa. As duas principais são originárias das forças de van der Waals e das forças entre as duplas camadas elétricas das partículas.

De uma maneira geral, no tratamento de minérios a maioria das polpas é alcalina e a carga na superfície mineral tende a ser aniônica. A carga na superfície da partícula afeta diretamente a distribuição de íons do soluto. Na figura 3.6, pode se distinguir a carga superficial fixada à superfície, camada de Stern (bound layer) formada pelos íons contrários mais próximos ou em contato com a superfície e camada de Gouy ou difusa (diffuse layer) formada por íons na fase aquosa próxima à superfície, seguindo a distribuição de Boltzmann em relação à distância da superfície.

Na figura 3.8 (a e b) é observado o efeito na queda no valor do potencial zeta quando o cátion Ca^{2+} é adicionado o sistema. Em determinada

concentração, o potencial é reduzido tendendo a zero, diminuindo assim a repulsão eletrostática formando agregados no sistema.

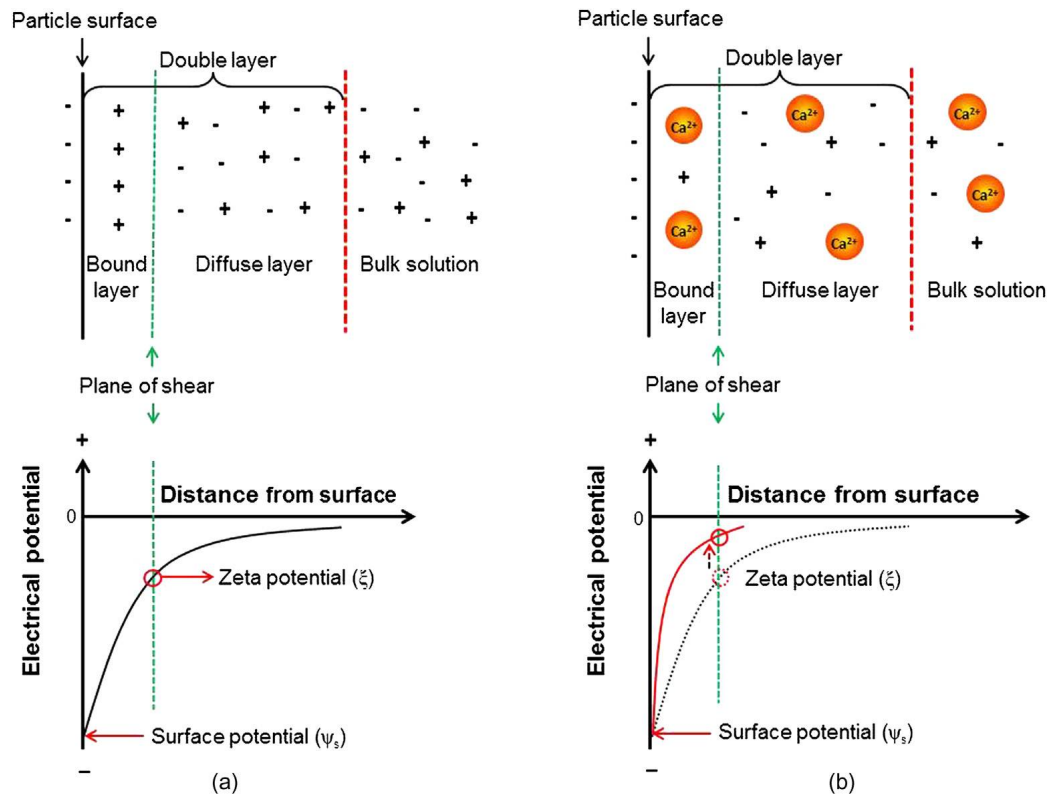


Figura 3.8 – Distribuição de carga na dupla camada e potencial zeta antes e depois da adição de Ca^{2+} (Wills, B.A, 2016).

A adsorção física dos coletores catiônicos, aminas, é caracterizada por não haver transferência de carga elétrica, sendo a força responsável pela adsorção a atração eletrostática entre a carga negativa na interface sólido-líquido e a carga positiva dos íons do coletor. Neste mecanismo de adsorção, a formação da película hidrofóbica adsorvida ocorre por etapas.

As forças de van der Waals para duas partículas de mesma natureza, em água ou outro solvente, são sempre atrativas. A intensidade depende da natureza da partícula e do solvente, e da distância entre as partículas, mas não depende da carga das partículas, do valor do pH do meio nem significativamente da concentração de eletrólito da solução. A atração entre as

partículas será mais fraca quando as partículas e o meio de dispersão forem semelhantes quimicamente.

Partículas sólidas adquirem uma carga elétrica superficial quando postas em contato com uma fase aquosa (meio polar). No caso de minerais, essa carga superficial é resultante da ruptura das ligações iônicas e covalentes pela moagem e pela subsequente adsorção de íons presentes no meio aquoso.

Outros mecanismos de geração de cargas na superfície de partícula sólidas em meio aquoso são através da adsorção e dessorção de íons da rede cristalina, dissolução não estequiométrica ou defeitos na rede cristalina.

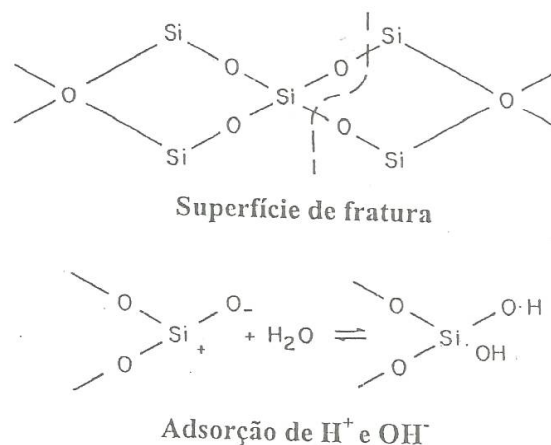


Figura 3.9 – Mecanismo de geração de carga na superfície do quartzo (Fuerstenau et al., 1985).

Essa carga superficial adquirida em meio aquoso influencia a distribuição no meio polar dos íons próximos a ela, pois atrai uma atmosfera iônica de cargas contrárias (contra íons), gerando uma dupla estrutura de cargas conhecida como dupla camada elétrica, (DCE), Parks (1975). A Figura 3.10 apresenta a DCE e o potencial eletrostático de Stern.

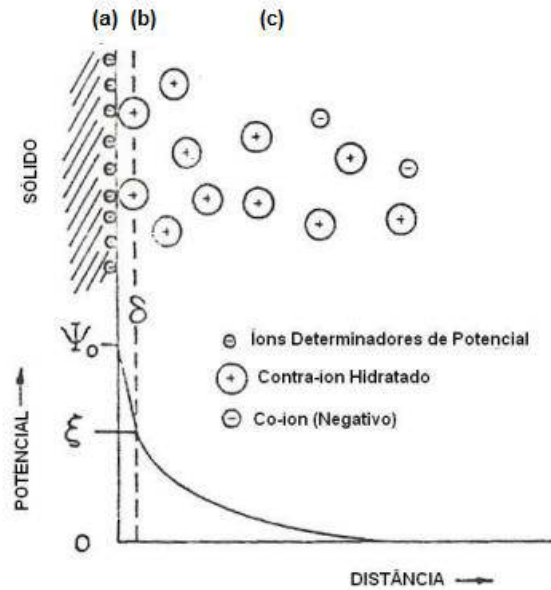


Figura 3.10 – Representação esquemática da DCE e da distribuição de potencial. (a) carga da superfície (b) Plano de Stern (c) Camada difusa (Fuerstenau e Palmer, 1976).

De acordo com Parks (1975), a DCE pode ser visualizada de duas formas diferentes, dependendo da presença de adsorção específica ou não específica.

Adsorção não específica: ocorre quando a adsorção decorre unicamente de interação de natureza eletrostática (na ausência de qualquer ligação forte ou química).

Apenas duas zonas de carga estão presentes. Uma destas é a própria carga de superfície e a outra é a carga de camada difusa.

A carga de superfície é devida a íons determinadores de potencial (IDP). Neste caso de adsorção, o plano de Stern é o plano através dos centros dos íons contrários mais próximos à superfície do sólido. Ver figura 3.11.

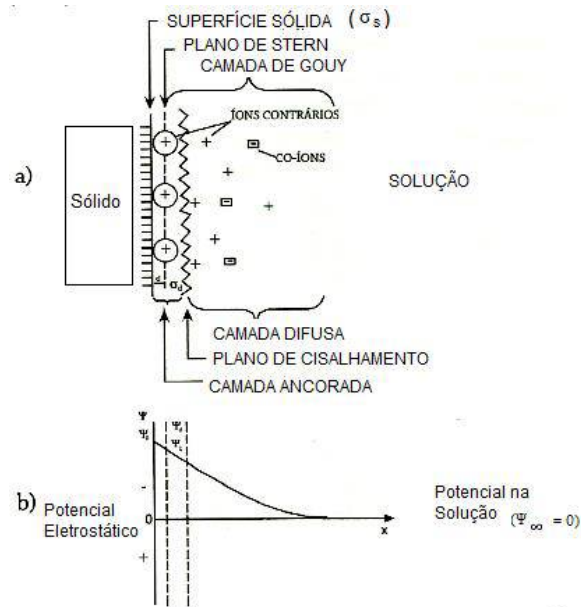


Figura 3.11 – Modelo da dupla camada elétrica na adsorção não específica: (a) esquema da DCE; (b) distribuição do potencial eletrostático (Parks, 1975).

Adsorção específica: a adsorção é dita específica quando predominam mecanismos que independem da atração eletrostática. Íons adsorvidos especificamente podem aumentar, reduzir, neutralizar ou reverter a carga elétrica efetiva do sólido.

A adsorção de espécies neutras é sempre específica. A adsorção específica geralmente é mais lenta, menos prontamente reversível e, conseqüentemente, uma situação de equilíbrio é mais difícil de ser atingida.

A união dos centros das espécies adsorvidas especificamente define o plano interno de Helmholtz. Pode ocorrer por mudanças no estado de hidratação do sólido ou adsorvato, interações entre moléculas de adsorvado ou seus íons, ligados covalentes, de van der Waals, de hidrogênio entre o adsorvato e o sólido. Ver figura 3.12.

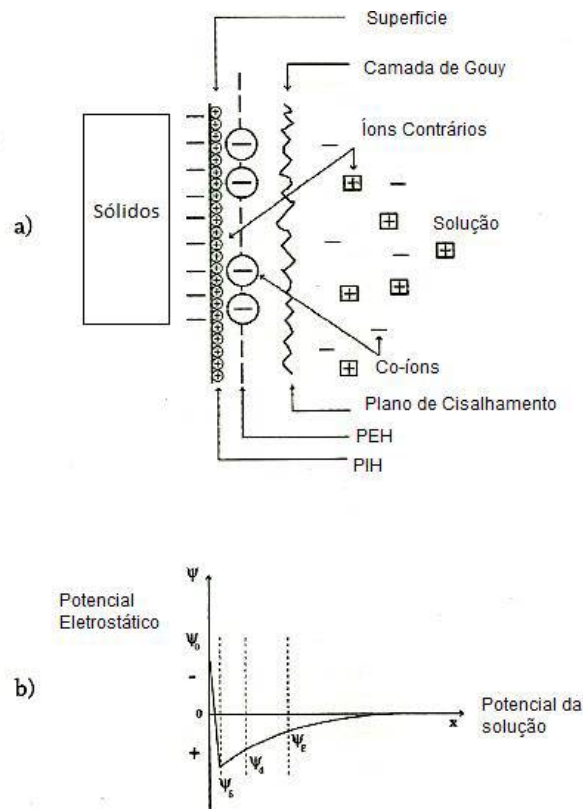


Figura 3.12 – Modelo de Stern da dupla camada elétrica, contemplando adsorção específica superequivalente: (a) esquema da DCE; (b) distribuição do potencial eletrostático (Parks, 1975).

Fouad et al. (1994), estudaram o efeito dos surfatantes catiônicos e aniônicos na superfície do quartzo e cassiterita na presença de cátions polivalentes, e constataram que a curva de pH do potencial zeta para ambos os minerais na presença de diferentes sais (FeCl_3 , AlCl_3 , LaCl_3 , CeCl_3 e ThCl_4) modificava fortemente a carga da superfície dos óxidos, devido à adsorção dos cátions livres e de seus hidroxicomplexos sobre a superfície dos óxidos.

Na prática, todo processo de adsorção é uma resultante entre interações eletrostáticas e químicas, não existindo adsorção totalmente específica ou não específica (Lima, 2001). Na Figura 3.13 é representado a curva de adsorção do cátion Ca^{+2} sobre a superfície do quartzo.

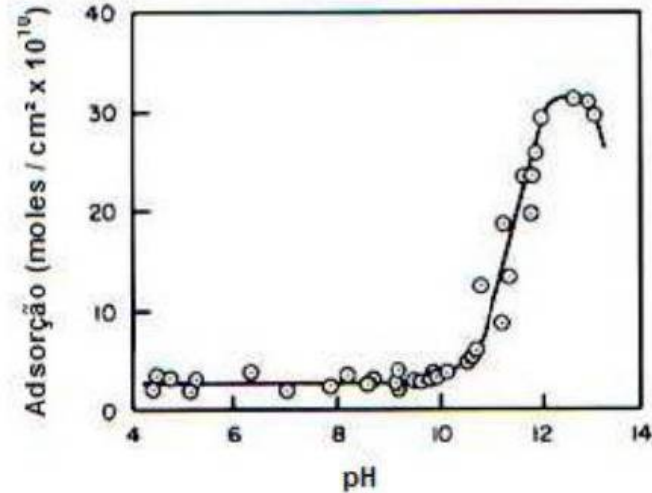


Figura 3.13 – Adsorção de cálcio na superfície do quartzo, em função de pH para solução de 100 ppm de Ca^{2+} (Fuerstenau e Palmer, 1976).

No gráfico é mostrado o início da inflexão da curva no pH onde usualmente é feita a flotação catiônica reversa de minério de ferro. Isso leva a crer que neste ponto a atração dos cátions Ca^{2+} pela superfície do quartzo, prejudique a adsorção da amina nos mesmos e por consequente o processo de flotação em si.

Carvalho (2003) efetuou estudos da interferência de Ca^{2+} (adição de cal hidratada em várias concentrações) na flotação em escala de bancada de minério do ferro. Os resultados mostraram que houve aumento do teor de SiO_2 no concentrado, o autor atribuiu à ineficiência da etapa de deslamagem em consequência do baixo nível de dispersão da polpa devido à ação coagulante da cal hidratada pela atração dos cátions Ca^{2+} pela superfície dos minerais de ganga silicatada que possuem cargas negativas elevadas em valores de pH acima de 10,5 na flotação reversa de minério de ferro.

Dessa maneira um estudo mais detalhado sobre o tema merece atenção, pois a viabilidade do projeto, em um dos seus cenários, depende do material bombeado através do mineroduto e sua concentração no outro extremo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é abordada a metodologia de preparação e caracterização das amostras: análise granulométrica, mineralógica e química. Serão apresentados os ensaios tecnológicos realizados: testes de flotação com vários tipos de coletores, complexantes e espumante na flotação com cal.

4.1.Recebimento e Caracterização Inicial das Amostras

A rota de processo deste estudo consiste basicamente em britagem, moagem, deslamagem e flotação. Para embasar as definições do projeto e avaliar o comportamento do minério frente à rota de processo definida, quando ocorre o bombeamento da polpa pelo mineroduto com adição de cal, foi proposto o estudo com amostras de furos de sonda representativas do recurso.

As amostras recebidas no Centro de Pesquisas Tecnológicas – Vale, possuíam massa aproximada de 100t da litologia itabirito friável. Inicialmente foi realizada a homogeneização das pilhas via pá carregadeira de médio porte, sendo efetuadas três operações de re-empilhamento antes da divisão da massa para a realização do trabalho. Conforme apresentado na figura 4.1 a seguir, o itabirito friável foi britado no circuito piloto em 25,0mm. Em seguida foram retiradas alíquotas da fração -25,0mm para a distribuição granulométrica, e análise química. Posteriormente a amostra foi encaminhada para o circuito de moagem piloto.

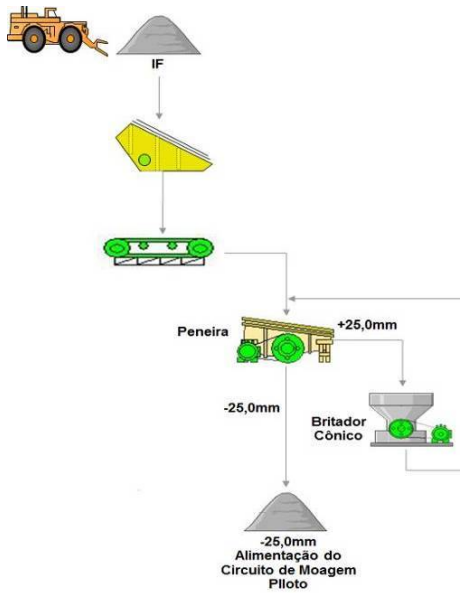


Figura 4.1 – Fluxograma do circuito piloto de britagem.

4.2. Fluxo simplificado dos testes

A amostra britada em 25,0mm foi submetida à moagem piloto, especificação da moagem abaixo, em estágio único (moagem direta) em circuito fechado com um estágio de classificação e um estágio de deslamagem. O estágio de classificação ocorreu em hidrociclone de 4 polegadas da Akaflex modelo fundo plano, e o estágio de deslamagem foi executado em hidrociclone loop de 40mm de diâmetro, o underflow do loop alimenta a flotação, que foi feita em bancada. O circuito de moagem, classificação e deslamagem operou em linha, sendo seu fluxograma ilustrado na figura 4.2.

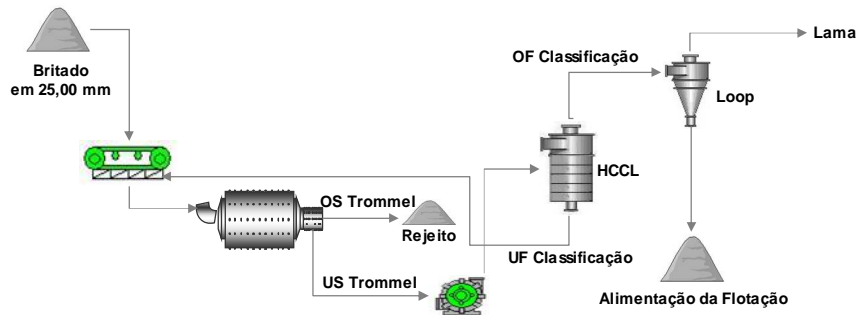


Figura 4.2 – Fluxograma da moagem, classificação e deslamagem em escala piloto.

Para avaliar o impacto da cal no processo de flotação, foram feitos ensaios de deslamagem em loop e flotação em laboratório. A figura 4.3 abaixo apresenta o fluxo dos ensaios realizados.

Anteriormente a deslamagem a polpa é ajustada para o percentual de sólidos de 67%, em seguida a cal é adicionada até o pH desejado, deixa-se o material em repouso por 16 horas. Após este tempo a polpa é diluída até o percentual de sólidos de 25% utilizando água com pH ajustado (mesmo valor que foi ajustado inicialmente), sendo direcionada para a deslamagem no loop e em seguida flotada. A tabela IV.1 apresenta estimativa de dosagem da cal hidratada para cada porcentagem de sólidos.

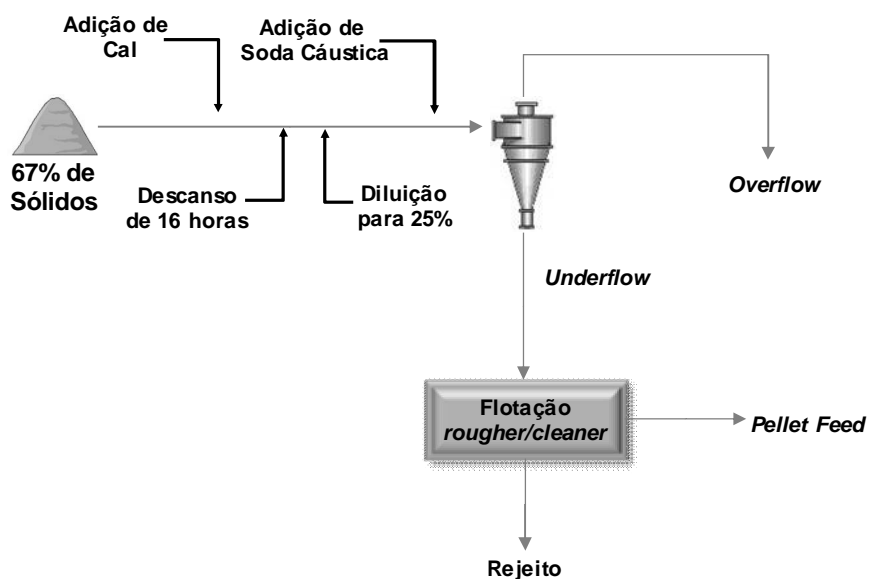


Figura 4.3 – Fluxograma do estudo de cal.

Tabela IV.1 – Determinação da dosagem de cal para cada faixa de pH da deslamagem.

Determinação da dosagem de cal - Alimentação do Loop								
Ensaio	Volume de polpa (l)	Sólidos %	Densidade polpa g/cm ³	Massa Sólidos (g)	pH inicial polpa	pH Deslamagem	Massa (g) (Concentração 5 %)	Dosagem g/t
1	1250,00	67,00	1,98	1658	8,00	8,50	1,04	31,39
2	1250,00	67,00	1,98	1658	8,00	9,50	2,79	84,05
3	1250,00	67,00	1,98	1658	7,90	10,50	6,87	207,09
pH após 16hs								
1	1250,00	25,00	1,23	384	8,20	8,50	0,14	18,73
2	1250,00	25,00	1,23	384	8,70	9,50	0,41	53,67
3	1250,00	25,00	1,23	384	9,40	10,50	1,10	142,78

4.3. Teste piloto de moagem

Nos testes piloto de moagem deste estudo, foi utilizado um moinho de bolas Nordberg modelo AM 435 com descarga por overflow e dimensões externas aproximadas de 5ft de diâmetro e 4ft de comprimento, sendo o mesmo acionado a 22rpm, que corresponde a 64,5% de sua velocidade crítica (34,09rpm). A figura 4.4 a seguir apresenta imagens do moinho piloto.



Figura 4.4 – Moinho piloto Nordberg AM 435.

A moagem foi realizada a úmido. As dimensões internas do moinho e a carga de bola para um grau de enchimento de 33% são apresentadas nas tabelas IV.2 e IV.3 respectivamente.

Tabela IV.2 – Dimensões internas do moinho piloto.

Configuração Moinho		
Parâmetro	Unidade	Medida
Comprimento livre	mm	950
Distância vale a vale	mm	1570
Distância crista a crista	mm	1510
Diâmetro	mm	1540

Tabela IV.3 – Carga de bolas.

Carga de Bolas		
Diâmetro (mm)	Massa (kg)	Massa (%)
76,0	420,5	15,5
63,5	529,0	19,5
50,8	1021,4	37,7
38,1	439,5	16,2
25,4	189,9	7,0
19,1	67,8	2,5
12,7	31,2	1,2
9,5	13,6	0,5

Durante os testes piloto de moagem os fluxos da planta foram amostrados mediante uso de amostradores com abertura de dimensões mínimas de três vezes o tamanho da maior partícula do fluxo, realizando-se corte transversal ao fluxo de polpa. Foi adotado um incremento (4 cortes) de 15 em 15 minutos, perfazendo 3 incrementos consecutivos em todos os pontos de amostragem. Em seguida, efetuam-se as amostragens para medição de massa e volumes por unidade de tempo, com cortes que devem acumular o fluxo por 10 segundos, ou superior no caso em que as vazões são muito pequenas, ou inferior para casos em que a vazão é muito grande. Aguarda-se pelo menos 20 minutos para a retomada das amostras de análise, a fim de que o regime de

operação do circuito seja restabelecido. Salienta-se que toda e qualquer amostragem é executada somente após checagem do estado de equilíbrio do circuito, ou seja, somente quando a massa de entrada é igual à massa de saída. O moinho pode ser operado em circuito fechado direto com hidrociclone de 4" de diâmetro em classificação simples. Os parâmetros operacionais do moinho e hidrociclone foram ajustados para obtenção da configuração granulométrica desejada, p95 em 0,150 mm.

4.4. Homogeneização e quartejamento de amostras de pequeno volume

As etapas de homogeneização e quartejamento foram realizadas em divisores rotativos com 60,0 kg, 6,0 kg ou 1,0 kg de capacidade (Dialmática), operando conforme a NBR ISO 3082 - Minérios de Ferro - Procedimentos de Amostragem e Preparação de Amostras, cuja operação consiste basicamente nas seguintes etapas: foi acionado o tambor e posteriormente a correia mantendo a rotação de ambos, ajustada para no mínimo 20 voltas do carrossel. Ao final do quartejamento, as massas dos coletores diametralmente opostos foram coletadas até que a massa necessária ao processo subsequente fosse atingida. Em caso de necessidade fez-se uso de divisores de menor capacidade para ajuste da massa. A figura 4.5 apresenta um divisor rotativo com capacidade de 60 kg, utilizado no Centro de Pesquisa Tecnológica – Vale, utilizado durante o referido processo.



Figura 4.5 – Divisor rotativo.

4.5. Distribuição Granulométrica

Seguindo procedimento interno do Centro de Pesquisa Tecnológica – Vale, para os materiais que se encontravam acima de 6,35mm, a alíquota obtida foi submetida ao divisor carrossel para análise de granulometria a um corte a seco nesta malha, sendo o material retido nesse peneiramento direcionado à análise série macro a úmido, utilizando vibrador de peneiras (Dialmática). Posteriormente o passante em 6,35mm do corte e da análise granulométrica do material da série macro foi submetido a um peneirador série micro a úmido (Dialmática).

O material correspondente a cada uma das frações granulométricas foi seco em estufa a 105°C de temperatura. Os demais produtos do estudo que se encontram abaixo de 6,35mm já foram direcionados para a série micro a úmido. Para a microanálise granulométrica efetuou-se corte granulométrico em outra alíquota da amostra, na malha de 0,045mm. O material passante no corte foi então submetido à agitação mecânica, sendo sifonada uma alíquota para a realização da microanálise granulométrica utilizando granulômetro a laser (Mastersizer Malvern – modelo 2000). A figura 4.6 apresenta as fotos dos equipamentos.



Figura 4.6 – Peneirador Suspenso e Mastersizer 2000.

4.6. Deslamagem em *loop*

Os testes de deslamagem em loop do estudo de cal foram realizados em hidrociclone de 1,5 polegadas da Akaflex modelo convencional, com apex de 5,0mm e vortex de 11,0mm, conforme figura 4.7, a pressão foi 1 kgf/cm². Esta configuração do hidrociclone foi utilizada de acordo com os objetivos do ensaio com relação a granulometria dos produtos (obter percentual passante em 0,010 mm próximo a 4% no underflow e 80% no overflow). O percentual de sólidos para o teste foi ajustado para 25% utilizando água com pH ajustado para o mesmo valor colocado anteriormente a polpa ficar em “repouso” com cal. O pH da polpa para o ensaio foi ajustado por meio de adição de NaOH (soda cáustica, a 5% de concentração), para se obter maior grau de dispersão das partículas. Após a realização do ensaio, todos os fluxos (alimentação, underflow e overflow) são caracterizados química e granulometricamente, além de se determinar a partição em massa de cada um deles. Antes da realização da deslamagem em loop, acrescentou cal nos pH's 8,5, 9,5 e 10,5 conforme tabela IV.1, esta polpa ficou em repouso por 16 horas, após este tempo foi realizado a deslamagem.



Figura 4.7 – Loop de deslamagem Akaflex de 1,5”.

4.7. Flotação em Bancada

Com o underflow do estágio de deslamagem, foram executados os ensaios de flotação em bancada. Os mesmos foram realizados em célula mecânica MacDarma D12, conceito Denver, com cuba de 1250 mL de volume útil, e rotor fechado com rotação de 1100 RPM. Foi utilizado como depressor o farelo de milho – Kowalski gelatinizado com soda cáustica (NaOH) na relação de 10:1, e como coletor foi aplicada amina Flotigam EDA-C (etermonoamina – coletor catiônico de cadeia média, ramificada, com grau de neutralização de 50%), fornecida pela Clariant. Como modulador de pH foi utilizada soda cáustica a 50%. A dosagem de depressor foi fixada em 500 g/t e coletor variou de 300 a 700 g/t SiO₂ dosagem específica ou 101 a 242 g/t, com percentual de sólidos de 50% e pH 8,5, 9,5 e 10,5, os ensaios contemplaram as etapas rougher/cleaner. Como complemento ao estudo, foram aplicados também os coletores Flotigam 5806 da Clariant e Amido Amina MDB 1325, 1520 e 1521 da AkzoNobel, o espumante Montanol 800, complexante Flotisor SI 7020 da Clariant e EDTA Dissolvine – E 39 da AkzoNobel.



Figura 4.8 – Célula de flotação em bancada.


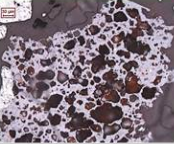

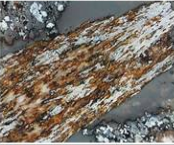
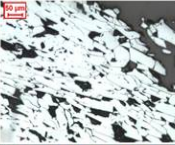
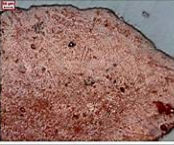
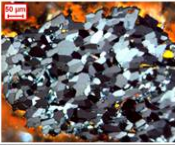
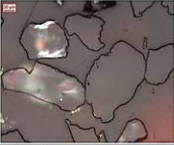
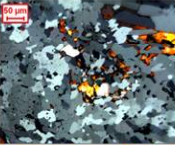

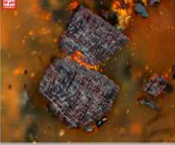


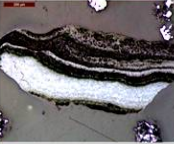
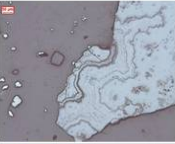


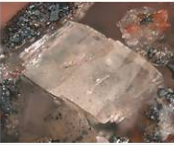
4.8. Análise Química

As análises químicas referentes as amostras foram realizadas no laboratório químico interno Vale da mina de Alegria, pelo método de fluorescência de raios X, sendo analisados os seguintes elementos: Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, TiO₂, CaO e MgO. O valor de PPC é obtido via gravimetria, e pode ser negativo quando o material apresenta compostos não totalmente oxidados e há ganho de massa (oxigênio) durante a calcinação. A alíquota para a análise química foi homogeneizada e dividida em quarteador tipo rifles sendo retirada uma alíquota de aproximadamente 30g que foi pulverizada e encaminhada ao laboratório químico.

4.9. Mineralogia

A quantificação mineralógica modal foi feita por estimativa de área, realizado varredura de 25 campos na seção polida. Os produtos abaixo de 0,150mm foram deslamados em becker anteriormente a confecção da seção polida, para a remoção de partículas ultrafinas que prejudicam a análise, devido à aglomeração durante o embutimento. Para a obtenção de fotomicrografias foi empregado analisador de imagens conectado ao software Qwin (LEICA). A tabela a seguir apresenta um descritivo dos minerais quantificados segundo o padrão do Centro de Pesquisas Tecnológicas – CPT, Vale.

Tabela IV.4 – Classificação dos minerais segundo padrão CPT.

Mineral	Fórmula Química	Cor	Principais Feições	Fotomicrografia	Mineral	Fórmula Química	Cor	Principais Feições	Fotomicrografia
Hematita Compacta Microcristalina	Fe ₂ O ₃	Cinza, branco	Cristais de granulação inferior a 0,010 mm, de aspecto granular.		Goethita Compacta Alveolar	FeO.OH	Cinza azulada	Elevada porosidade, na forma de alvéolos.	
Hematita Compacta Especular	Fe ₂ O ₃	Cinza, branco	Cristais compactos, lateralmente retilíneos, com relação entre comprimento e largura maior que 5:1		Goethita Compacta Anfibolítica	FeO.OH	Cinza azulada	Apresenta o habitus típico dos anfibólios, aproximadamente prismático ou acicular.	
Hematita Compacta Lamelar	Fe ₂ O ₃	Cinza, branco	Semelhante à hematita especular, porém com relação entre comprimento e largura menor que 5:1		Goethita Terrosa	FeO.OH.nH ₂ O	Marrom claro, amarelado, avermelhado	Consistência terrosa, com granulometria muito fina (<0,010 mm).	
Hematita Compacta Granular	Fe ₂ O ₃	Cinza, branco	Cristais de aspecto granular, equidimensionais, com contatos retilíneos e junções triplícies.		Quartzo	SiO ₂	Incolor	Bordas facilmente distinguíveis. Cristais geralmente compactos, com contatos irregulares.	
Hematita Compacta Sinuosa	Fe ₂ O ₃	Cinza, branco	Cristais com forma amebóide e contatos sinuosos, imbricados, entrelaçados.		Gibbsita	Al(OH) ₃	Incolor a marrom pálido	Aspecto sacaróide. Contatos irregulares, pode ocorrer nos poros de outros minerais.	
Hematita Martítica	Fe ₂ O ₃	Cinza, branco	Apresenta microporosidade, e geralmente preserva relictos de magnetita. Pode apresentar estrutura em treliça.		Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	incolor a amarelo pálido	Aspecto terroso, sem distinção de cristais. Pode ocorrer como massa terrosa nos poros de outros minerais.	
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Rósea a cinza	Pode ocorrer na forma de cristais de habitus octaédrico, ou na forma de relictos em hematita.		Óxidos de Manganês	Várias	Incolor, branco, marrom	Diversos minerais. Geralmente de aspecto terroso e de granulação muito fina (<0,010 mm).	
Goethita Compacta Maciça	FeO.OH	Cinza azulada	Baixa porosidade (inferior a 30%).		Micas	Várias	Incolor	Diversos minerais do grupo das micas, além de talco e minerais do grupo da clorita. Habitus tabular.	
Goethita Compacta Botrioidal	FeO.OH	Cinza azulada	Agregados botrioidais, de formato arredondado.		Outros	Várias	Várias	Sulfetos, carbonatos (foto), outros silicatos e óxidos, etc.	

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados e discutidos neste capítulo os resultados obtidos, na caracterização granulométrica, química e mineralógica. E resultados obtidos nos ensaios tecnológicos de flotação.

5.1. Caracterização Inicial das Amostras

Foi recebido no Centro de Pesquisas Tecnológicas – CPT, Vale em Mariana cerca de 100t de ROM da litologia itabirito friável, este material teve que ser britado e sua granulometria adequada como passante na malha de 25,00mm, em seguida foram retiradas alíquotas desta fração para a distribuição granulométrica, e análise química. Posteriormente a amostra foi encaminhada para o circuito de moagem, deslamagem e flotação.

A tabela V.1 apresenta análise química por faixa do material britado em 25,0mm. Analisando a distribuição de Fe por faixa granulometria, pode-se verificar que nas frações mais grossas há uma tendência de teores mais baixos. Para todas as frações o principal deletério é a sílica. Os contaminantes Mn, TiO₂, CaO e MgO apresentam teores significativamente baixos. A participação de Al₂O₃ alcança valor acima de 2,0% apenas na fração - 0,045mm. O P é mais expressivo nas frações acima de 16,0mm. O PPC é baixo tendo valor 1,0%.

Tabela V.1 – Granuloquímica da fração britado a - 25,00mm.

Malha (microns)	Retido Simples (%)	Análise Química (%)								
		Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
31.500,0	1,44	43,34	36,50	0,084	1,08	0,084	0,053	0,164	0,101	0,72
25.000,0	3,38									
19.000,0	1,74	35,65	47,16	0,070	0,48	0,085	0,016	0,153	0,229	0,38
16.000,0	0,87	36,14	45,71	0,101	0,62	0,042	0,025	0,263	0,245	0,49
12.500,0	4,07	54,55	19,81	0,054	1,18	0,060	0,041	0,061	0,098	0,77
10.000,0	1,72	54,06	20,60	0,059	0,83	0,050	0,035	0,067	0,083	0,68
8.000,0	3,29	60,41	12,40	0,063	0,94	0,045	0,050	0,052	0,026	0,69
6.350,0	2,22	59,43	12,49	0,076	1,17	0,076	0,049	0,055	0,035	1,33
5.750,0	0,35	58,73	13,38	0,065	1,09	0,137	0,053	0,056	0,026	0,94
4.000,0	1,14									
3.400,0	1,37									
2.400,0	3,16									
1.000,0	3,24									
840,0	5,31	61,36	9,71	0,056	1,20	0,174	0,060	0,038	0,001	0,98
710,0	1,14									
500,0	0,94									
420,0	2,33	41,83	38,91	0,034	0,53	0,118	0,029	0,024	0,013	0,68
300,0	1,34									
210,0	3,39									
150,0	4,73									
106,0	6,30	23,90	64,59	0,026	0,36	0,042	0,010	0,016	0,028	0,45
75,0	6,47									
45,0	16,69									
37,0	3,64	58,40	12,44	0,076	2,37	0,104	0,066	0,029	0,004	1,48
25,0	6,80									
15,0	5,99									
10,0	2,68									
6,0	2,00									
5,0	0,48									
4,0	0,46									
3,2	0,34									
-3,2	1,00									
Global	100	45,07	32,97	0,063	1,43	0,149	0,041	0,049	0,033	1,00

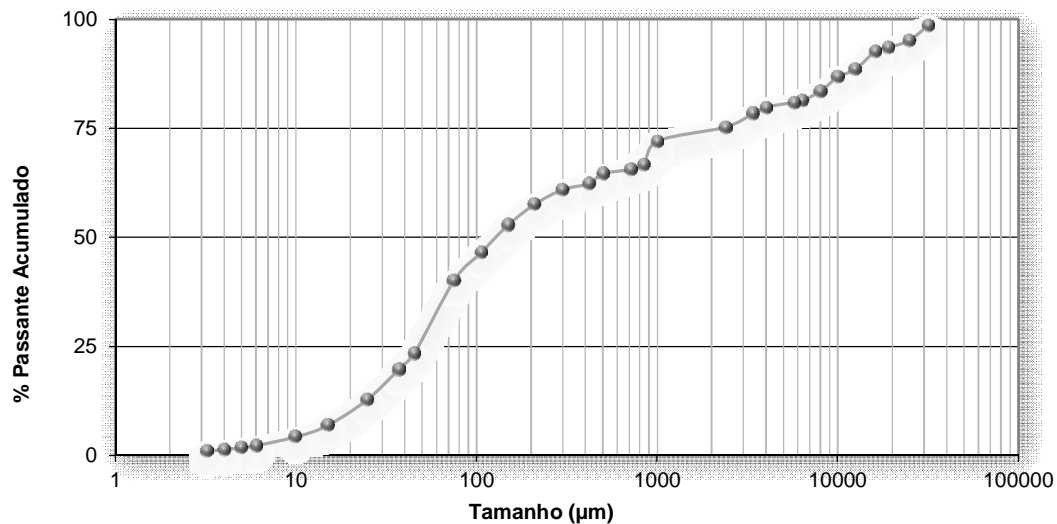


Gráfico 5.1 – Distribuição Granulométrica do britado a menos 25,00mm.

Respeitando as premissas do projeto Serra da Serpentina, o material foi moído buscando um P95 em 0,150mm. O gráfico 5.2 apresenta a quantificação mineralógica deste produto. A amostra de itabirito friável apresenta as hematitas compactas como mineral ferroso predominante. O percentual de goethita tanto terrosa quanto maciça é abaixo de 4%, e o principal mineral de ganga é o quartzo. A magnetita, óxido de manganês, gibbsita e outros minerais não identificados em luz refletida são raros.

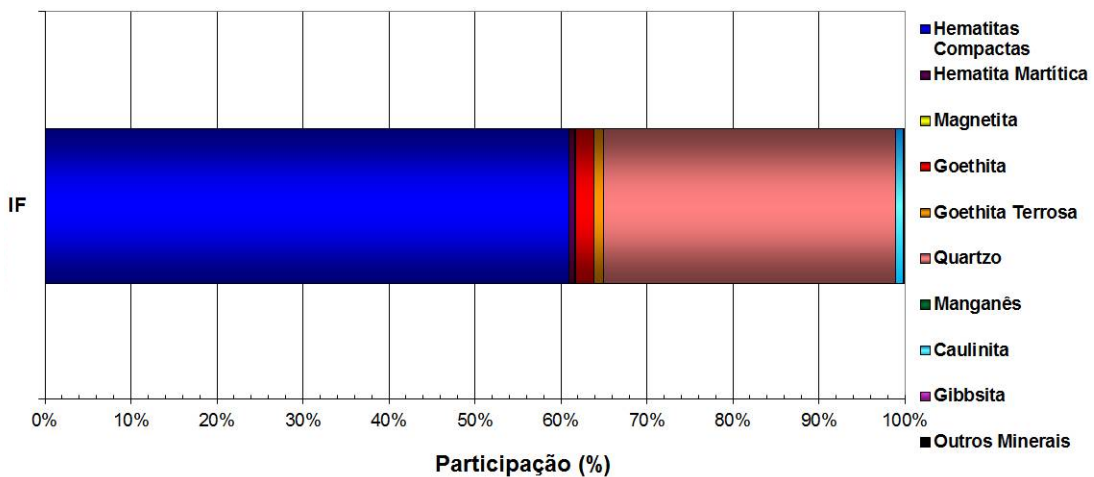


Gráfico 5.2 – Quantificação mineralógica do produto moído em 0,150mm.

Em relação a quantificação mineralógica, verifica-se pouca variabilidade na assembleia mineralógica. As fotomicrografias abaixo, figura 5.1, apresentam as características das hematitas compactas. Estas quando ocorrem predominam a morfologia granular, com aproximadamente 50% de sua composição total, sendo o restante como lamelar, sinuosa e especular nessa ordem de % constituinte.

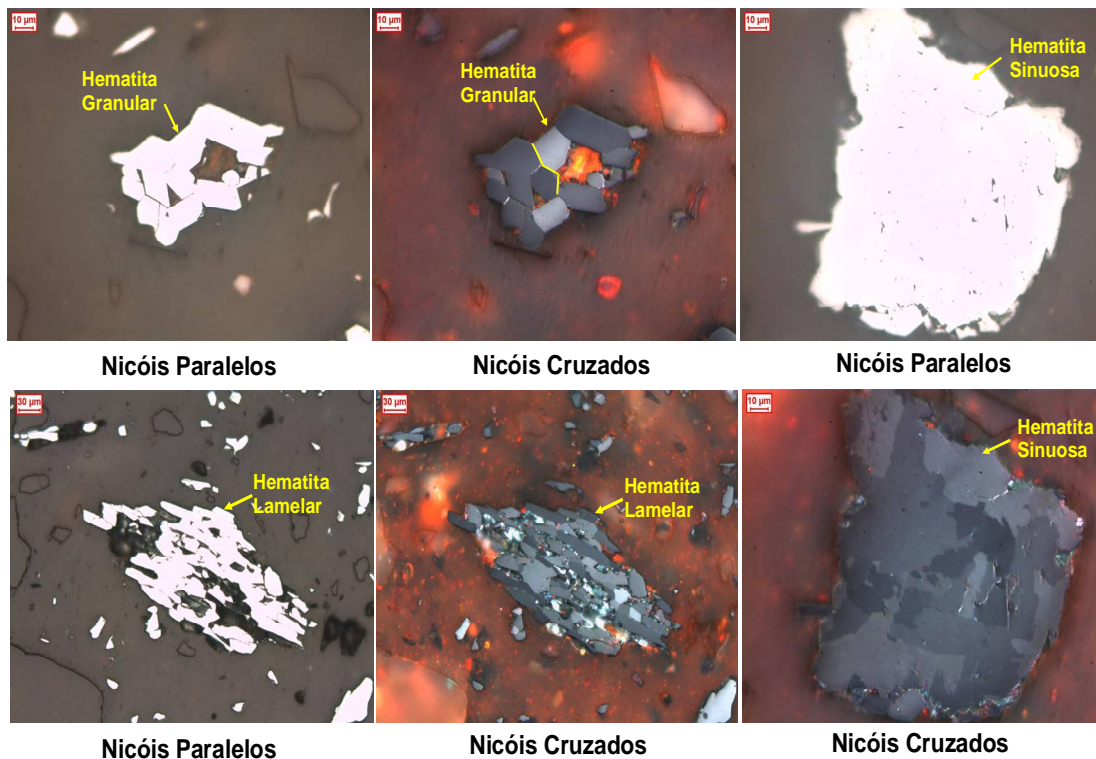


Figura 5.1 – Fotomicrografias evidenciando a ocorrência de hematitas granulares, lamelares e sinuosas.

As fotomicrografias a seguir, figura 5.2, apresentam as características do quartzo, e suas variações em relação a morfologia, o mesmo é identificado no microscópio ótico em tonalidade cinza escuro e pode apresentar reflexões internas. Este mineral possui bordas facilmente distinguíveis e são compactos e geralmente encontram-se livres de associações e raramente associado as hematitas compactas. Comumente os cristais de quartzo aparecem com granulometria maior do que à dos minerais ferrosos.

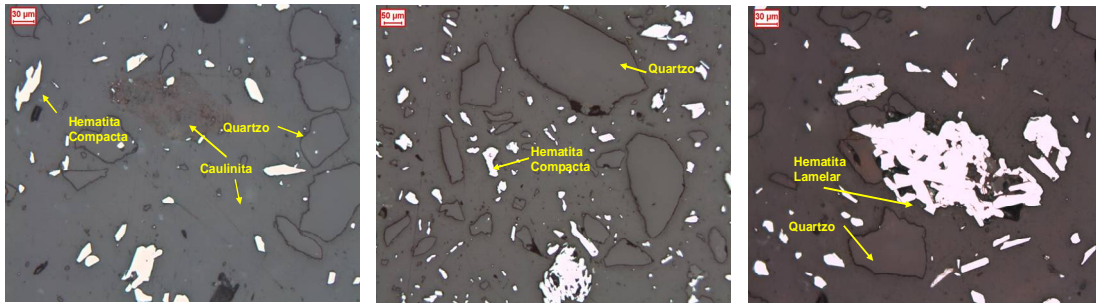


Figura 5.2 – Fotomicrografias evidenciando a ocorrência de quartzo.

A tabela V.2 apresenta o balanço granulométrico do teste de moagem. A alimentação da deslamagem apresenta 95,67% passante na malha de 0,150mm.

Tabela V.2 – Balanço granulométrico da moagem.

Malha (µm)	Passante Acumulado (%)		
	Britado 25,00mm	Produto Moído	Alimentação Deslamagem
25.000,0	95,20	100,00	100,00
19.000,0	93,47	100,00	100,00
16.000,0	92,20	100,00	100,00
12.500,0	88,14	100,00	100,00
10.000,0	86,42	99,96	100,00
8.000,0	83,14	99,85	100,00
6.350,0	80,92	99,73	100,00
5.600,0	80,57	98,72	100,00
4.800,0	79,38	98,27	100,00
3.400,0	78,08	97,59	100,00
2.400,0	74,99	96,70	100,00
1.000,0	71,92	95,68	100,00
840,0	66,32	95,35	100,00
710,0	65,05	94,97	100,00
500,0	64,12	93,83	100,00
420,0	61,66	92,72	100,00
300,0	60,31	88,77	98,94
210,0	56,95	80,17	97,69
150,0	52,28	68,89	95,67
105,0	46,05	53,83	85,47
75,0	39,68	41,29	78,92
45,0	22,97	27,72	58,90
15,0	8,62	6,61	17,55
10,0	5,91	3,77	9,72
6,0	3,62	2,07	5,25
5,0	3,00	1,68	4,25
4,0	2,38	1,27	3,26
3,2	1,88	0,96	2,47
-3,2	0,00	0,00	0,00

O gráfico 5.3 apresenta a comparação entre as curvas granulométricas dos produtos da britagem, moagem e alimentação da deslamagem. A premissa de produto moído com 5% retido em 0,150mm foi atendida.

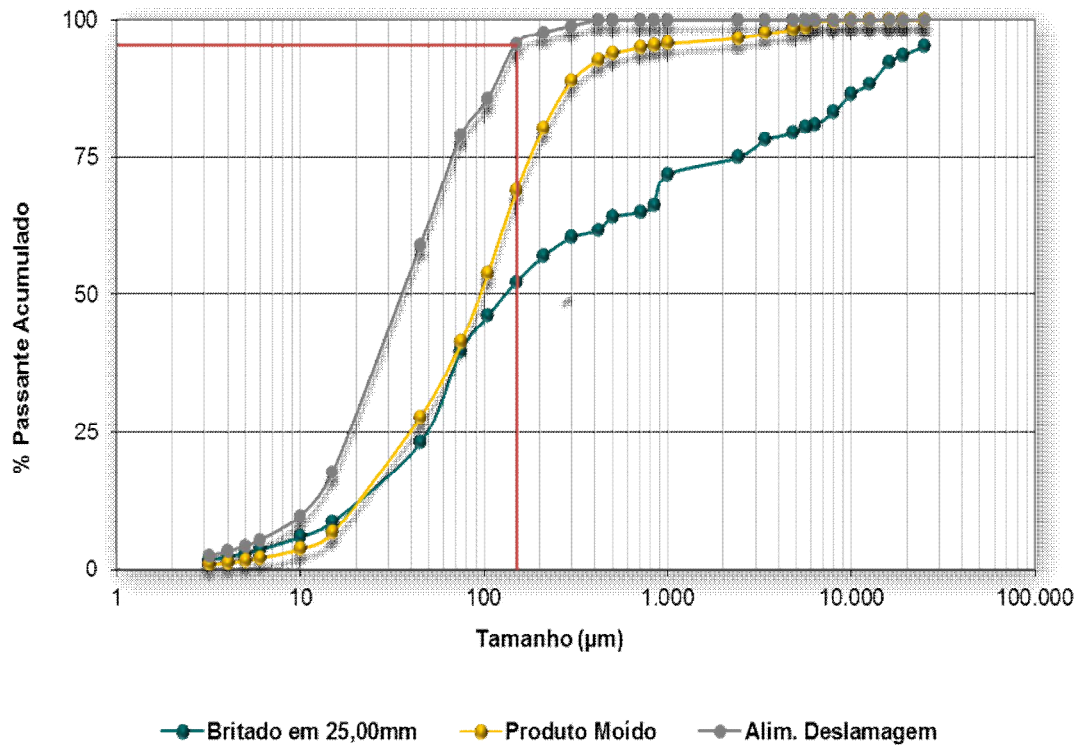


Gráfico 5.3 – Distribuição granulométrica dos fluxos da britagem, moagem e deslamagem.

5.2. Deslamagem

Os testes de deslamagem em loop do estudo atingiram percentual passante em 0,010mm próximo a 4% (variando de 4,67 a 5,95) no underflow e 80% (variando de 70,56 a 74,76) no overflow. O percentual de sólidos para o teste foi ajustado para 25% utilizando água.

Foram realizados ensaios sem adição de cal anteriormente a deslamagem e adicionando a mesma. Os pH's de adição de cal foram 8,5, 9,5 e 10,5 e para

a realização dos ensaios utilizaram os pH's 9,8 e 10,5. Como forma de tentar reproduzir o tempo de interação da cal com a polpa (condicionamento e bombeamento) após a dosagem a mesma ficou em repouso por 16 horas. Os valores de pH foram testados buscando os melhores resultados obtidos nos testes reológicos, atendendo os parâmetros de penetração, ângulo de escorregamento e repouso da polpa ao ser bombeado através do mineroduto.

O pH da polpa para o ensaio foi ajustado por meio de adição de NaOH (soda cáustica, a 5% de concentração), para se obter maior grau de dispersão das partículas. Após a realização do ensaio, todos os fluxos (alimentação, underflow e overflow) são caracterizados química e granulometricamente, além de se determinar a partição em massa de cada um deles. De acordo com os resultados, tabela V.3, não se observa diferenças significativas entre os ensaios, logo percebe-se que adição destes produtos não impacta diretamente na deslamagem em loop.

Tabela V.3 – Balanço da deslamagem em loop.

Amostra	Fluxo	Recuperação Mássica (%)	Análise Química (%)									%<0,010mm
			Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	
Sem Adição de Cal	AL	100,00	44,46	33,79	0,054	1,27	0,103	0,042	0,032	0,001	0,78	11,37
	UF	95,38	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56	4,67
	OF	4,62	41,63	22,41	0,333	9,27	0,455	0,150	0,070	0,198	6,26	72,30
Adição de Cal pH 10,5 Deslamagem pH 10,5	AL	100,00	44,46	33,79	0,054	1,27	0,103	0,042	0,032	0,001	0,78	11,37
	UF	95,97	44,78	34,60	0,043	0,88	0,088	0,033	0,061	0,017	0,61	5,95
	OF	4,03	41,61	23,17	0,320	9,36	0,440	0,143	0,456	0,211	6,08	70,56
Adição de Cal pH 10,5 Deslamagem pH 9,8	AL	100,00	44,46	33,79	0,054	1,27	0,103	0,042	0,032	0,001	0,78	11,37
	UF	94,89	44,64	33,70	0,034	0,80	0,087	0,036	0,033	0,001	0,69	5,14
	OF	5,11	41,96	21,61	0,319	9,36	0,426	0,167	0,145	0,062	6,87	74,76
Adição de Cal pH 8,5 Deslamagem pH 10,5	AL	100,00	44,46	33,79	0,054	1,27	0,103	0,042	0,032	0,001	0,78	11,37
	UF	95,56	44,08	34,61	0,034	0,76	0,087	0,036	0,030	0,001	0,77	5,91
	OF	4,44	42,00	22,08	0,332	9,15	0,426	0,142	0,084	0,037	6,27	73,01
Adição de Cal pH 9,5 Deslamagem pH 10,5	AL	100,00	44,46	33,79	0,054	1,27	0,103	0,042	0,032	0,001	0,78	11,37
	UF	96,37	44,65	33,69	0,041	0,99	0,094	0,031	0,039	0,042	0,59	5,87
	OF	3,63	40,85	22,91	0,330	10,17	0,426	0,148	0,234	0,220	6,28	72,54

5.3. Flotação

Após a deslamagem, a amostra foi encaminhada para a flotação. Os ensaios contemplaram apenas a etapa *rougher/cleaner* e a dosagem de depressor (amido) foi a mesma para todas as amostras sendo 500 g/t. A tabela V.4 apresenta a distribuição granulometria dos produtos, da alimentação nova até alimentação da flotação.

Tabela V.4 – Distribuição granulometria dos fluxos.

Malha (μm)	Passante Acumulado (%)				
	Alimentação Nova	Produto Moído	Alimentação Deslamagem	Lama	Alimentação Flotação
25.000,0	95,20	100,00	100,00	100,00	100,00
19.000,0	93,47	100,00	100,00	100,00	100,00
16.000,0	92,20	100,00	100,00	100,00	100,00
12.500,0	88,14	100,00	100,00	100,00	100,00
10.000,0	86,42	99,96	100,00	100,00	100,00
8.000,0	83,14	99,85	100,00	100,00	100,00
6.350,0	80,92	99,73	100,00	100,00	100,00
5.600,0	80,57	98,72	100,00	100,00	100,00
4.800,0	79,38	98,27	100,00	100,00	100,00
3.400,0	78,08	97,59	100,00	100,00	100,00
2.400,0	74,99	96,70	100,00	100,00	100,00
1.000,0	71,92	95,68	100,00	100,00	100,00
840,0	66,32	95,35	100,00	100,00	100,00
710,0	65,05	94,97	100,00	100,00	100,00
500,0	64,12	93,83	100,00	100,00	100,00
420,0	61,66	92,72	100,00	100,00	100,00
300,0	60,31	88,77	98,94	100,00	99,06
210,0	56,95	80,17	97,69	100,00	97,51
150,0	52,28	68,89	95,67	100,00	95,17
105,0	46,05	53,83	85,47	99,99	84,30
75,0	39,68	41,29	78,92	99,99	76,49
45,0	22,97	27,72	58,90	99,99	55,08
15,0	8,62	6,61	17,55	83,11	10,74
10,0	5,91	3,77	9,72	68,43	4,68
6,0	3,62	2,07	5,25	47,71	2,04
5,0	3,00	1,68	4,25	40,88	1,58
4,0	2,38	1,27	3,26	33,38	1,15
3,2	1,88	0,96	2,47	26,82	0,81
-3,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Os ensaios iniciais de flotação não tiveram adição de cal, obtendo assim o valor de referência do concentrado e rejeito para esta amostra. Nestes ensaios foi variado apenas a dosagem do coletor (EDA-C) entre 300 a 700g/t SiO₂ ou 101 a 236 g/t e os pH's aplicados foram 8,5 e 10,5. O ensaio com 500g/t SiO₂ ou 171 g/t de coletor e pH de 8,5 fornece o menor teor de sílica no concentrado, logo foi decidido por utilizá-lo como teste base para a comparação com os demais.

Os primeiros ensaios realizados utilizando a cal foi aplicando o pH 10,5. Em seguida foram realizadas as flotações variando a dosagem de EDA-C de 300 a 700 g/tSiO₂ ou 101 a 236g/t e os pH's de flotação aplicados foram 8,5, 9,5 e 10,5. A tabela V.5 apresenta as condições dos testes realizados.

Tabela V.5 – Especificações para flotação com cal variando pH de flotação e dosagem de amina.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor			Depressor			pH Trabalho	
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor	Tipo	g/t		Fornecedor
1	Não	Não	9,8	EDA-C	300	102	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
2	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
3	Não	Não	9,8	EDA-C	700	239	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,52
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,51
5	Sim	10,5	9,8	EDA-C	300	101	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
6	Sim	10,5	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,51
7	Sim	10,5	9,8	EDA-C	700	236	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
8	Sim	10,5	9,8	EDA-C	300	101	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,51
9	Sim	10,5	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,50
10	Sim	10,5	9,8	EDA-C	700	236	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,52
11	Sim	10,5	9,8	EDA-C	300	101	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,50
12	Sim	10,5	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,51
13	Sim	10,5	9,8	EDA-C	700	236	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,56

Na tabela V.6 é indicado os resultados das análises químicas de cada ensaio, referente aos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito.

Tabela V.6 – Resultados químicos para flotação com cal variando pH de flotação e dosagem de amina.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
1 a 4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
5 a 13	44,64	33,70	0,034	0,80	0,087	0,036	0,033	0,001	0,69

Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
1	68,45	1,29	0,045	0,50	0,118	0,058	0,026	0,001	0,63
2	68,59	1,34	0,044	0,57	0,121	0,058	0,020	0,001	0,61
3	68,98	0,56	0,046	0,52	0,126	0,059	0,031	0,001	0,63
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
5	61,88	10,71	0,046	0,60	0,112	0,053	0,061	0,001	0,67
6	67,17	3,04	0,049	0,61	0,119	0,059	0,054	0,001	0,68
7	66,91	3,15	0,047	0,56	0,118	0,059	0,034	0,001	0,66
8	67,52	2,31	0,045	0,55	0,122	0,059	0,035	0,001	0,64
9	68,03	1,88	0,045	0,55	0,124	0,062	0,037	0,001	0,64
10	67,53	2,29	0,046	0,54	0,122	0,060	0,037	0,001	0,75
11	65,04	5,25	0,042	0,61	0,115	0,058	0,025	0,001	0,69
12	65,60	4,88	0,046	0,58	0,117	0,058	0,037	0,001	0,64
13	65,83	3,59	0,034	0,45	0,121	0,062	0,030	0,001	0,85

Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
1	22,97	64,64	0,039	1,16	0,051	0,010	0,036	0,053	0,64
2	26,71	59,72	0,042	1,20	0,057	0,017	0,039	0,055	0,69
3	28,70	57,23	0,040	1,06	0,058	0,019	0,034	0,043	0,81
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
5	20,95	68,52	0,038	1,23	0,047	0,010	0,036	0,059	0,82
6	21,12	66,90	0,041	1,40	0,048	0,012	0,040	0,074	0,68
7	21,72	66,27	0,038	1,19	0,047	0,012	0,034	0,066	0,74
8	20,38	68,10	0,039	1,31	0,046	0,012	0,031	0,070	0,77
9	23,12	64,12	0,039	1,19	0,046	0,014	0,033	0,063	0,75
10	23,84	63,11	0,037	1,10	0,044	0,013	0,033	0,057	0,69
11	21,26	67,54	0,042	1,39	0,049	0,015	0,037	0,082	0,83
12	20,18	68,70	0,038	1,28	0,046	0,010	0,033	0,057	0,78
13	20,78	68,66	0,038	1,28	0,048	0,013	0,035	0,061	0,74

Conforme pode ser observado no gráfico 5.4 a adição de cal, a partir do quinto ensaio, afetou a qualidade da flotação elevando o teor de sílica no pellet feed. O ensaio 4, sem adição de cal, foi utilizado como base. O mesmo teve como resultado 0,66% de SiO₂ no concentrado e 29,81% de Fe no rejeito. Esse teste foi escolhido para referência, pois apresenta resultados muito próximos ao ensaio 3 com 700 g/t SiO₂ mas com uma dosagem menor de coletor. Após a comparação do melhor resultado obtido quando adicionada a cal, é destacado o ensaio 9 com 1,88% SiO₂ no concentrado e 23,12% Fe no rejeito. Pode-se observar que ocorre a flotação do quartzo, apesar da influência das espécies catiônicas – Ca²⁺ presentes no processo, porém com piora da qualidade química do concentrado obtido, elevando o teor de sílica no pellet feed.

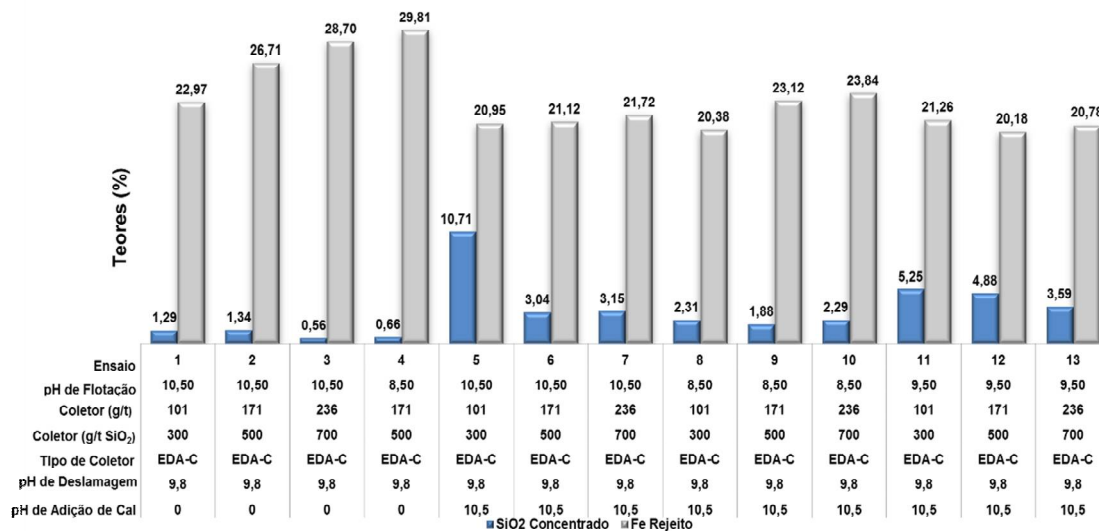


Gráfico 5.4 – Estudo de reagentes com e sem cal variando pH de flotação e dosagem de amina.

Novos ensaios foram feitos avaliando o impacto da mudança no pH da deslamagem, alterando o mesmo de 9,8 para 10,5. Lembrando que estes ensaios foram realizados utilizando cal. É constatado que a elevação do pH nos ensaios de deslamagem reduz o teor de sílica no pellet feed. Na tabela V.7 há um resumo das especificações para cada ensaio.

Tabela V.7 – Especificações para flotação com cal variando pH de deslamagem.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor				Depressor			pH Trabalho
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,51
9	Sim	10,5	9,8	EDA-C	500	169	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,50
14	Sim	10,5	10,5	EDA-C	300	104	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
15	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,51
16	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	242	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
17	Sim	10,5	10,5	EDA-C	300	104	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,54
18	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,57
19	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	242	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,56
20	Sim	10,5	10,5	EDA-C	300	104	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,55
21	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,58
22	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	242	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,55

Na tabela V.8 estão ordenados os resultados das análises químicas de cada ensaio, referente aos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito.

Tabela V.8 – Resultados químicos para flotação com cal variando pH de deslamagem.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
9	44,64	33,70	0,034	0,80	0,087	0,036	0,033	0,001	0,69
14 a 22	44,78	34,60	0,043	0,88	0,088	0,033	0,061	0,017	0,61
Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
9	68,03	1,88	0,045	0,55	0,124	0,062	0,037	0,001	0,64
14	67,29	2,25	0,046	0,55	0,122	0,056	0,042	0,001	0,68
15	67,43	1,98	0,050	0,56	0,125	0,058	0,041	0,001	0,74
16	66,18	3,70	0,049	0,56	0,126	0,059	0,054	0,001	0,75
17	67,41	1,82	0,046	0,54	0,126	0,057	0,037	0,001	0,72
18	67,87	1,62	0,049	0,55	0,128	0,058	0,035	0,001	0,69
19	67,87	1,36	0,047	0,53	0,130	0,059	0,028	0,001	0,70
20	67,05	2,43	0,049	0,56	0,122	0,059	0,039	0,001	0,74
21	67,54	2,09	0,049	0,55	0,126	0,060	0,033	0,001	0,68
22	67,42	1,57	0,048	0,59	0,122	0,057	0,051	0,001	0,63
Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
9	23,12	64,12	0,039	1,19	0,046	0,014	0,033	0,063	0,75
14	17,98	72,90	0,033	1,29	0,043	0,008	0,029	0,074	0,59
15	17,87	72,72	0,034	1,33	0,046	0,009	0,030	0,079	0,65
16	23,19	64,61	0,036	1,25	0,049	0,012	0,038	0,066	0,62
17	21,31	67,39	0,040	1,32	0,050	0,013	0,041	0,066	0,64
18	23,33	64,68	0,038	1,18	0,047	0,012	0,038	0,065	0,64
19	24,86	62,34	0,037	1,16	0,049	0,013	0,035	0,059	0,61
20	18,99	71,69	0,032	1,23	0,043	0,008	0,024	0,078	0,58
21	20,02	69,93	0,035	1,25	0,045	0,008	0,035	0,072	0,69
22	20,19	70,02	0,035	1,18	0,044	0,008	0,034	0,059	0,60

Ao analisar o ensaio 9, referência com cal, aplicando amina EDA-C no qual o pH de flotação foi 8,5 e dosagem de coletor de específica foi 500g/tSiO₂ ou 169g/t, ao elevar o pH da deslamagem para 10,50 o teor de sílica reduz de 1,88% para 1,62%, conforme evidenciado no gráfico 5.5. Logo este ensaio,18, tornou-se o teste base aplicando EDA-C e cal para comparar com os demais testes realizados. Não foi adotado como referência o ensaio 19 com 1,36% de SiO₂ no concentrado, pois o mesmo foi realizado com maior dosagem de amina e sendo a diferença de valores pequena foi decidido utilizar o outro ensaio.

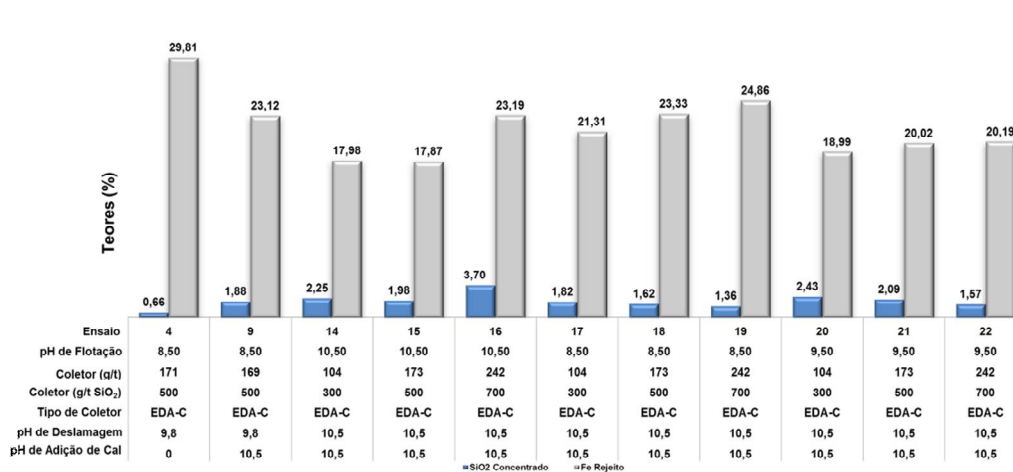


Gráfico 5.5 – Estudo de reagentes com cal variando pH de deslamagem.

No passo seguinte foi avaliado o emprego de espumante no estudo de cal, tendo como referência os ensaios 4 (sem cal) e 18 (com cal). Na tabela V.9 é apresentado um resumo das especificações iniciais para cada ensaio.

Tabela V.9 – Especificações para flotação com cal adição de espumante.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor			
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant
18	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant
23	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant
24	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant
25	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant
26	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	243	Clariant
27	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	243	Clariant
28	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	243	Clariant
29	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant

Ensaio	Depressor			Espumante			pH Trabalho
	Tipo	g/t	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	-	-	8,51
18	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	-	-	8,57
23	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	7	Clariant	8,50
24	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	14	Clariant	8,51
25	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	21	Clariant	8,51
26	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	7	Clariant	8,50
27	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	14	Clariant	8,51
28	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	21	Clariant	8,51
29	GRITZ Milho	500	Kowalski	Montanol 800	21	Clariant	6,52

Na tabela V.10 é observado os resultados das análises químicas de cada ensaio, referente aos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito.

Tabela V.10 – Resultados químicos para flotação com cal adição de espumante.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
18	44,78	34,60	0,043	0,88	0,088	0,033	0,061	0,017	0,61
23 a 29	44,27	34,65	0,044	0,94	0,091	0,036	0,047	0,032	0,70
Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
18	67,87	1,62	0,049	0,55	0,128	0,058	0,035	0,001	0,69
23	68,25	1,29	0,046	0,61	0,145	0,061	0,031	0,001	0,68
24	67,72	1,27	0,045	0,52	0,134	0,060	0,026	0,001	0,68
25	67,62	1,15	0,044	0,52	0,138	0,062	0,035	0,001	0,67
26	68,69	0,93	0,048	0,54	0,145	0,060	0,035	0,001	0,74
27	68,09	1,09	0,046	0,52	0,134	0,061	0,038	0,001	0,72
28	67,95	0,89	0,045	0,51	0,143	0,061	0,035	0,001	0,67
29	67,89	1,15	0,046	0,58	0,161	0,064	0,036	0,001	0,77
Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
18	23,33	64,68	0,038	1,18	0,047	0,012	0,038	0,065	0,64
23	30,18	54,65	0,042	1,15	0,052	0,019	0,037	0,050	0,66
24	28,95	56,46	0,039	1,13	0,052	0,020	0,032	0,055	0,69
25	29,89	55,79	0,042	1,19	0,055	0,020	0,035	0,056	0,70
26	30,56	54,15	0,040	1,13	0,053	0,020	0,033	0,056	0,71
27	28,15	58,02	0,040	1,14	0,052	0,020	0,032	0,061	0,67
28	30,78	53,88	0,040	1,16	0,054	0,022	0,034	0,056	0,69
29	33,93	49,79	0,041	1,06	0,052	0,024	0,034	0,052	0,60

A adição de espumante, Montanol 800, proporcionou uma diminuição na tensão superficial da interface ar-água, melhorando as condições de coleta. O teor de sílica no concentrado reduziu e todos os resultados ficaram com valor inferior a 1,30%. Porém para obter teor de SiO₂ abaixo de 1,0% além da aplicação de espumante foi necessário elevar a dosagem de amina (EDA-C) para 700 g/t SiO₂. Um ponto a destacar, é a elevação do teor de ferro no rejeito, que passou de 23,33% para 30,56% tendo como base de comparação o ensaio de referência e o que foi considerado o melhor resultado nestas condições, conforme detalhado no gráfico 5.6.

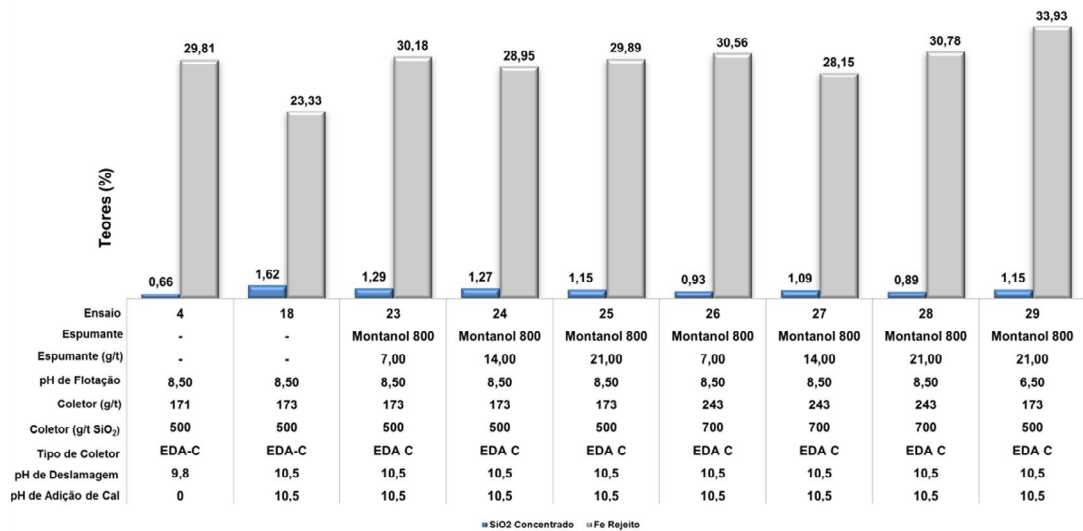


Gráfico 5.6 – Estudo de reagentes com cal utilizando o espumante Montanol 800.

Foi explorado também a redução do pH quando adicionado cal anteriormente a deslamagem. As especificações para flotação com cal variando esse fator é apresentado na tabela V.11.

Tabela V.11 – Especificações para flotação com cal adição anteriormente a deslamagem reduzindo pH.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor				Depressor			pH Trabalho
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,51
30	Sim	8,5	10,5	EDA-C	300	104	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
31	Sim	8,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
32	Sim	8,5	10,5	EDA-C	700	242	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
33	Sim	9,5	10,5	EDA-C	300	101	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,52
34	Sim	9,5	10,5	EDA-C	500	168	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,51
35	Sim	9,5	10,5	EDA-C	700	236	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,56
36	Sim	9,5	10,5	EDA C	300	101	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,51
37	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	168	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,52
38	Sim	9,5	10,5	EDA C	700	236	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,52
39	Sim	10,5	10,5	EDA-C	300	104	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
40	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,51
41	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	242	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,50
42	Sim	10,5	10,5	EDA-C	300	104	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,54
43	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,57
44	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	242	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,56
45	Sim	10,5	10,5	EDA-C	300	104	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,55
46	Sim	10,5	10,5	EDA-C	500	173	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,58
47	Sim	10,5	10,5	EDA-C	700	242	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,55

Resultados químicos dos testes são apresentados na tabela V.12, conforme abaixo. O ensaio 4 continua como base para comparação frente aos outros testes nessa outra configuração avaliada.

Tabela V.12 – Resultados químicos para flotação com cal adição anteriormente a deslamagem variando pH.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
30 a 47	44,78	34,60	0,043	0,88	0,088	0,033	0,061	0,017	0,61

Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
30	67,64	1,75	0,043	0,48	0,120	0,058	0,023	0,001	0,65
31	67,60	1,93	0,046	0,54	0,123	0,056	0,026	0,001	0,70
32	67,72	2,39	0,046	0,51	0,119	0,055	0,027	0,001	0,68
33	68,33	1,26	0,045	0,51	0,130	0,060	0,027	0,001	0,62
34	68,04	1,06	0,047	0,54	0,132	0,060	0,028	0,001	0,64
35	68,56	0,63	0,047	0,58	0,144	0,063	0,032	0,001	0,70
36	67,25	2,03	0,046	0,55	0,123	0,059	0,028	0,001	0,71
37	68,08	1,04	0,041	0,53	0,128	0,059	0,027	0,001	0,62
38	68,42	1,00	0,046	0,55	0,131	0,060	0,030	0,001	0,67
39	67,29	2,25	0,046	0,55	0,122	0,056	0,042	0,001	0,68
40	67,43	1,98	0,050	0,56	0,125	0,058	0,041	0,001	0,74
41	66,18	3,70	0,049	0,56	0,126	0,059	0,054	0,001	0,75
42	67,41	1,82	0,046	0,54	0,126	0,057	0,037	0,001	0,72
43	67,87	1,62	0,049	0,55	0,128	0,058	0,035	0,001	0,69
44	67,87	1,36	0,047	0,53	0,130	0,059	0,028	0,001	0,70
45	67,05	2,43	0,049	0,56	0,122	0,059	0,039	0,001	0,74
46	67,54	2,09	0,049	0,55	0,126	0,060	0,033	0,001	0,68
47	67,42	1,57	0,048	0,59	0,122	0,057	0,051	0,001	0,63

Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
30	18,43	71,28	0,027	1,09	0,033	0,004	0,029	0,053	0,63
31	18,12	73,14	0,027	1,11	0,034	0,005	0,031	0,063	0,55
32	18,32	71,93	0,026	1,03	0,033	0,003	0,029	0,069	0,57
33	25,60	60,65	0,041	1,23	0,053	0,015	0,032	0,068	0,73
34	28,25	58,20	0,041	1,27	0,055	0,020	0,039	0,059	0,67
35	29,70	55,48	0,041	1,21	0,054	0,021	0,038	0,058	0,66
36	23,53	63,81	0,039	1,37	0,047	0,014	0,035	0,069	0,66
37	26,65	60,27	0,043	1,32	0,054	0,020	0,041	0,065	0,67
38	25,60	60,18	0,040	1,28	0,051	0,017	0,037	0,061	0,68
39	17,98	72,90	0,033	1,29	0,043	0,008	0,029	0,074	0,59
40	17,87	72,72	0,034	1,33	0,046	0,009	0,030	0,079	0,65
41	23,19	64,61	0,036	1,25	0,049	0,012	0,038	0,066	0,62
42	21,31	67,39	0,040	1,32	0,050	0,013	0,041	0,066	0,64
43	23,33	64,68	0,038	1,18	0,047	0,012	0,038	0,065	0,64
44	24,86	62,34	0,037	1,16	0,049	0,013	0,035	0,059	0,61
45	18,99	71,69	0,032	1,23	0,043	0,008	0,024	0,078	0,58
46	20,02	69,93	0,035	1,25	0,045	0,008	0,035	0,072	0,69
47	20,19	70,02	0,035	1,18	0,044	0,008	0,034	0,059	0,60

O gráfico 5.7 apresenta estes resultados. Ao reduzir o pH para 9,5 e elevar a dosagem de EDA-C para 700g/t SiO₂ consegue-se resultados similares ao obtido sem a adição de cal.

Ao reduzir o pH de adição de cal para 8,5, observa-se que alterar este parâmetro não diminui expressivamente o teor de sílica no concentrado, conforme esperado.

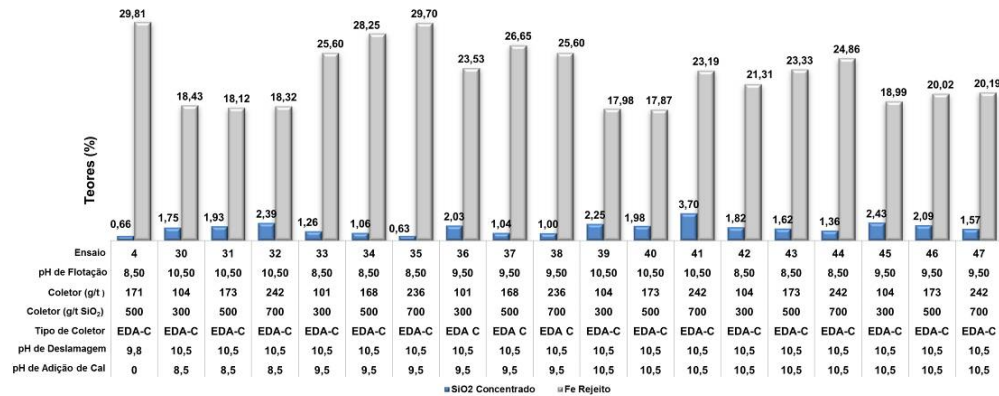


Gráfico 5.7 – Estudo de reagentes com cal variando o pH de adição de cal.

O estudo também contemplou a aplicação do complexante Flotisor SI 7020 em conjunto com a amina EDA-C. A tabela V.13 apresenta as especificações de cada ensaio com a adição de complexante.

A tabela V.14 e o gráfico 5.8 apresentam os resultados. Importante ressaltar que para os testes a partir deste momento foi utilizado pH de adição de cal igual a 9,5, pois após os ensaios reológicos com a polpa a ser bombeada através do mineroduto, esse valor de pH foi onde a mesma melhor respondeu nos quesitos de transporte e comportamento.

Tabela V.13 – Especificações para flotação com cal adição de complexante.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor			
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant
48	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	173	Clariant
49	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	173	Clariant
50	Sim	9,5	10,5	EDA C	700	243	Clariant
51	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	173	Clariant
52	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	173	Clariant
53	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	173	Clariant
54	Sim	9,5	10,5	EDA C	700	243	Clariant
55	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	173	Clariant

Ensaio	Depressor			Complexante			pH Trabalho
	Tipo	g/t	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	GRITZ Milho	500	Kowalski	-	-	-	8,51
48	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	50	Clariant	10,56
49	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	100	Clariant	10,51
50	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	70	Clariant	10,52
51	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	1.000	Clariant	10,51
52	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	50	Clariant	8,50
53	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	100	Clariant	8,53
54	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	70	Clariant	8,50
55	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	1.000	Clariant	8,52

Tabela V.14 – Resultados químicos para flotação com cal adição de complexante.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
48 a 55	44,27	34,65	0,044	0,94	0,091	0,036	0,047	0,032	0,70

Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
48	68,19	1,13	0,047	0,61	0,126	0,060	0,036	0,001	0,68
49	68,15	0,99	0,051	0,59	0,133	0,064	0,038	0,001	0,68
50	67,64	0,90	0,045	0,64	0,124	0,061	0,040	0,001	0,68
51	68,58	0,72	0,048	0,54	0,129	0,061	0,036	0,001	0,76
52	68,17	0,78	0,046	0,52	0,143	0,062	0,034	0,001	0,70
53	68,60	0,69	0,045	0,54	0,144	0,063	0,036	0,001	0,72
54	68,47	1,13	0,035	0,63	0,128	0,059	0,038	0,001	0,62
55	65,32	3,33	0,053	0,81	0,301	0,073	0,047	0,001	1,60

Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
48	24,34	62,49	0,042	1,43	0,054	0,015	0,036	0,079	1,08
49	25,10	61,43	0,040	1,24	0,056	0,016	0,035	0,071	0,77
50	25,36	61,72	0,041	1,27	0,057	0,017	0,038	0,074	0,75
51	20,97	68,21	0,038	1,33	0,048	0,013	0,039	0,092	0,69
52	29,31	56,53	0,040	1,12	0,051	0,021	0,034	0,063	0,74
53	31,13	53,72	0,042	1,15	0,057	0,022	0,041	0,052	0,68
54	31,30	52,97	0,039	1,07	0,054	0,018	0,037	0,053	0,56
55	42,71	36,21	0,040	0,82	0,072	0,035	0,032	0,001	0,75

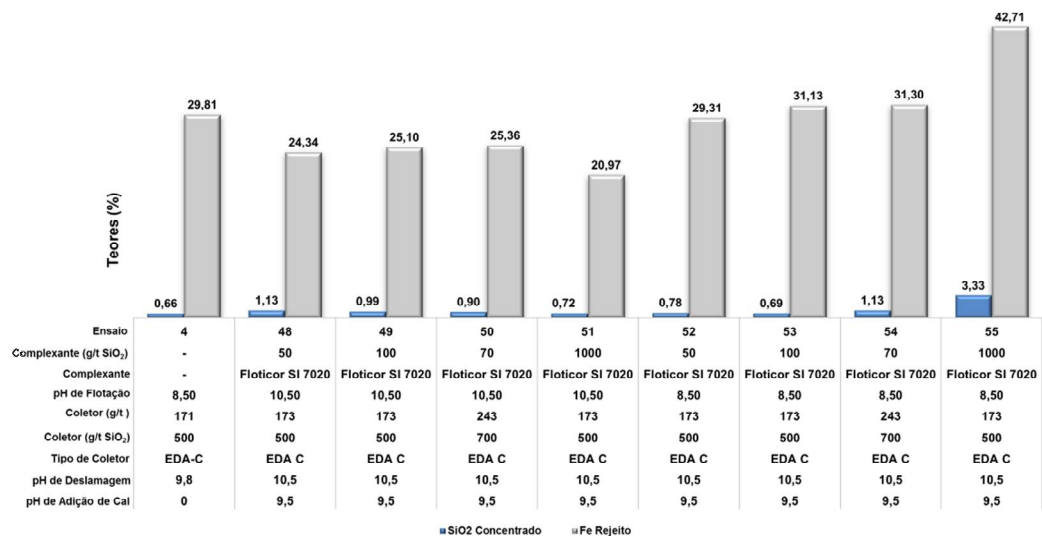


Gráfico 5.8 – Estudo de reagentes com cal utilizando o complexante Flotisor SI 7020.

Conforme gráfico 5.8, verifica-se que aplicando 50g/t SiO₂ de complexante, 500g/t SiO₂ ou 173 g/t de coletor EDA-C e pH de flotação 8,5 (ensaio 52), consegue-se teores de ferro no rejeito e sílica no concentrado semelhantes ao teste base, sem adição de cal, ensaio 4.

Na sequência dos trabalhos, foram realizados ensaios com os coletores amido amina MDB 1520, MDB 1521 e MDB 1325 da AkzoNobel. Conforme tabela V.15 abaixo.

Tabela V.15 – Especificações para flotação com cal usando como coletor amido amina.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor				Depressor			pH Trabalho
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,51
56	Sim	9,5	10,5	1325	300	101	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,53
57	Sim	9,5	10,5	1325	500	168	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,50
58	Sim	9,5	10,5	1325	700	236	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,50
59	Sim	9,5	10,5	1521	300	101	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,50
60	Sim	9,5	10,5	1521	500	168	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,50
61	Sim	9,5	10,5	1521	700	236	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,60
62	Sim	9,5	10,5	1520	300	101	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,53
63	Sim	9,5	10,5	1520	500	168	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,50
64	Sim	9,5	10,5	1520	700	236	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	8,51
65	Sim	9,5	10,5	1521	300	101	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	10,51
66	Sim	9,5	10,5	1521	500	168	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	10,51
67	Sim	9,5	10,5	1521	700	236	AkzoNobel	GRITZ Miho	500	Kowalski	10,51

Verifica-se que ao aplicar o pH 10,5 de flotação, todos os reagentes fornecem elevado teor de sílica no pellet feed, resultados químicos são apresentados na tabela V.16.

Já com a redução do pH de flotação para 8,5, é observado um decréscimo no teor de SiO₂ no concentrado. Entre os três reagentes o que demonstrou ser mais efetivo foi o amido amina MDB 1520, pois ao aplicar uma dosagem de 700g/t SiO₂ ou 236g/t, fornece qualidade no *pellet feed* próxima a praticada sem adição de cal, porém com alto teor de ferro no rejeito, conforme gráfico 5.9.

Tabela V.16 – Resultados químicos para flotação com cal utilizando amido amina.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
56 a 67	44,65	33,69	0,041	0,99	0,094	0,031	0,039	0,042	0,59
Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
56	47,62	30,90	0,035	0,58	0,088	0,037	0,037	0,022	0,51
57	62,12	9,70	0,045	0,59	0,126	0,054	0,039	0,003	0,65
58	67,56	2,31	0,051	0,76	0,159	0,062	0,051	0,001	0,73
59	67,36	2,44	0,045	0,67	0,134	0,059	0,040	0,001	0,68
60	68,21	1,18	0,048	0,73	0,137	0,061	0,055	0,001	0,68
61	68,14	1,43	0,051	0,79	0,152	0,062	0,055	0,001	0,71
62	55,84	17,76	0,040	0,71	0,110	0,048	0,043	0,001	0,56
63	67,59	1,73	0,050	0,71	0,159	0,063	0,046	0,001	0,73
64	67,56	0,88	0,056	0,87	0,215	0,066	0,051	0,001	0,93
65	48,86	28,12	0,040	0,64	0,100	0,041	0,035	0,022	0,57
66	48,71	27,95	0,041	0,60	0,101	0,041	0,045	0,024	0,57
67	60,23	12,11	0,045	0,59	0,126	0,054	0,039	0,003	0,65
Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
56	29,67	53,69	0,044	1,92	0,073	0,029	0,049	0,001	0,98
57	25,66	61,63	0,028	1,01	0,043	0,022	0,046	0,001	0,46
58	32,15	51,60	0,028	0,81	0,048	0,027	0,040	0,001	0,46
59	20,59	68,26	0,026	0,86	0,037	0,016	0,043	0,001	0,40
60	18,76	72,21	0,024	0,87	0,036	0,014	0,037	0,001	0,44
61	26,03	61,09	0,029	0,89	0,038	0,021	0,045	0,001	0,40
62	20,70	68,27	0,032	1,13	0,043	0,017	0,046	0,001	0,55
63	29,45	55,50	0,026	0,83	0,041	0,023	0,040	0,001	0,49
64	37,39	44,93	0,027	0,64	0,042	0,027	0,034	0,043	0,52
65	21,80	64,19	0,041	2,33	0,062	0,020	0,037	0,127	1,17
66	23,29	61,99	0,038	2,46	0,062	0,021	0,030	0,133	1,25
67	23,28	62,28	0,040	2,45	0,063	0,021	0,029	0,130	0,73

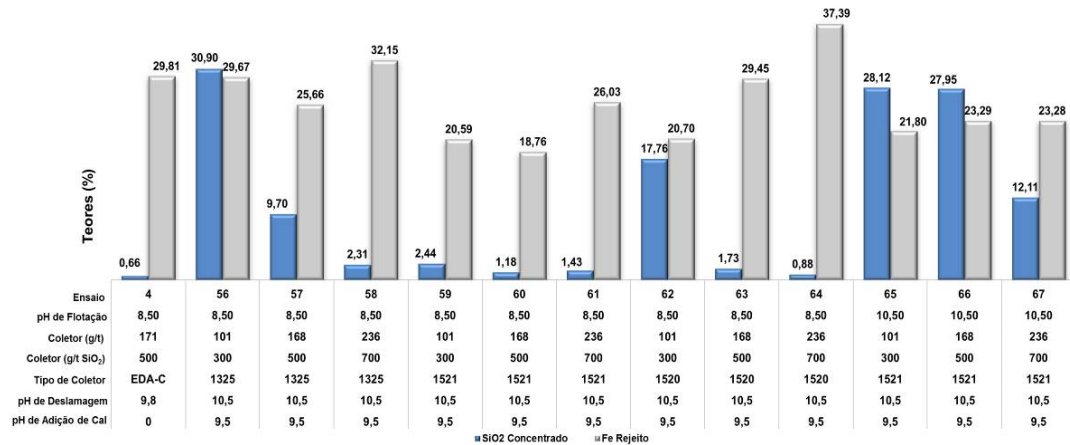


Gráfico 5.9 – Estudo de reagentes com cal utilizando coletor amido amina.

Com o melhor resultado de cada um dos três coletores amido amina, foi realizado ensaios de flotação acrescentando também o complexante Flotisor SI 7020.

Tabela V.17 – Especificações para flotação com cal usando como coletor amido amina e complexante SI 7020.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor			
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant
68	Sim	9,5	10,5	1325	300	101	AkzoNobel
69	Sim	9,5	10,5	1325	500	168	AkzoNobel
70	Sim	9,5	10,5	1325	700	236	AkzoNobel

Ensaio	Depressor			Complexante			pH Trabalho
	Tipo	g/t	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	GRITZ Milho	500	Kowalski	-	-	-	-
68	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	100	Clariant	10,50
69	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	100	Clariant	10,50
70	GRITZ Milho	500	Kowalski	Flotisor SI 7020	100	Clariant	10,50

Verifica-se que todos os ensaios forneceram elevado teor de sílica no concentrado, conforme resultados químicos da tabela V.18 e gráfico 5.10.

Tabela V.18 - Resultados químicos para flotação com cal utilizando amido amina e complexante SI 7020.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
68 a 70	44,65	33,69	0,041	0,99	0,094	0,031	0,039	0,042	0,59

Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
68	66,63	3,31	0,054	0,74	0,147	0,063	0,051	0,001	0,76
69	49,76	27,38	0,043	0,65	0,109	0,044	0,047	0,001	0,62
70	58,80	14,95	0,047	0,62	0,122	0,052	0,036	0,022	0,64

Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
68	19,77	69,18	0,028	1,09	0,040	0,014	0,030	0,082	0,68
69	19,98	67,20	0,032	2,21	0,045	0,016	0,018	0,122	1,11
70	18,77	69,97	0,030	1,46	0,042	0,014	0,023	0,102	0,79

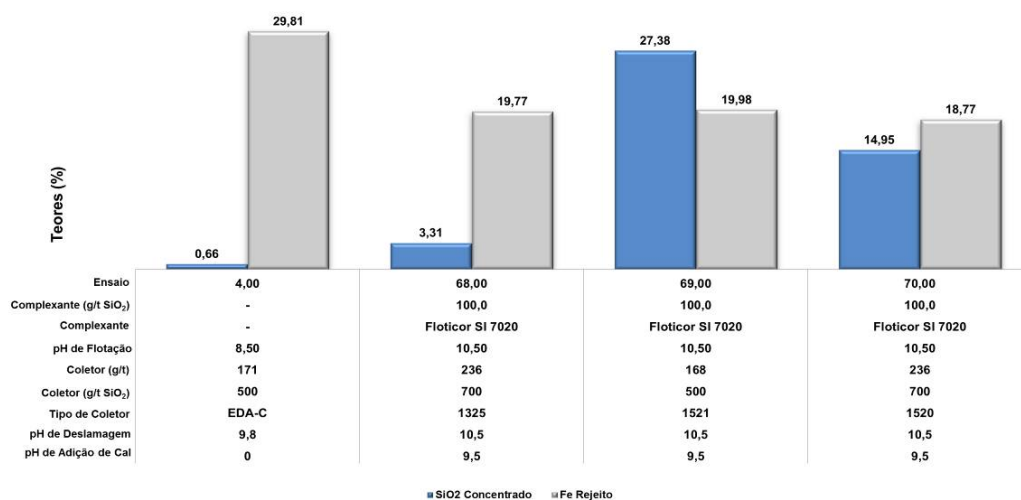


Gráfico 5.10 – Estudo de reagentes com cal utilizando os coletores amido amina e complexante Flotisor SI 7020.

As tabelas V.19 e 20 apresentam respectivamente as especificações para a flotação com o Flotigam 5806 e seus resultados químicos.

Tabela V.19 – Especificações para flotação com cal usando como coletor Flotigam 5806.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor				Depressor			pH Trabalho
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	8,51
71	Sim	9,5	10,5	FLOTIGAM 5806	500	173	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,45
72	Sim	10,5	10,5	FLOTIGAM 5806	700	243	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	9,50

Tabela V.20 – Resultados químicos para flotação com cal usando como coletor Flotigam 5806.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
71 e 72	44,27	34,65	0,044	0,94	0,091	0,036	0,047	0,032	0,70

Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
71	44,03	36,35	0,038	0,71	0,087	0,035	0,027	0,025	0,57
72	43,48	36,14	0,038	0,82	0,086	0,032	0,038	0,025	0,56

Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
71	47,55	20,61	0,195	6,20	0,132	0,059	0,261	0,213	3,46
72	50,42	19,92	0,163	4,05	0,125	0,058	0,199	0,114	2,46

O gráfico 5.12 apresenta os ensaios realizados com o coletor Flotigam 5806. Os ensaios tiveram baixa flotabilidade e apresentam elevado teor de sílica no pellet feed.

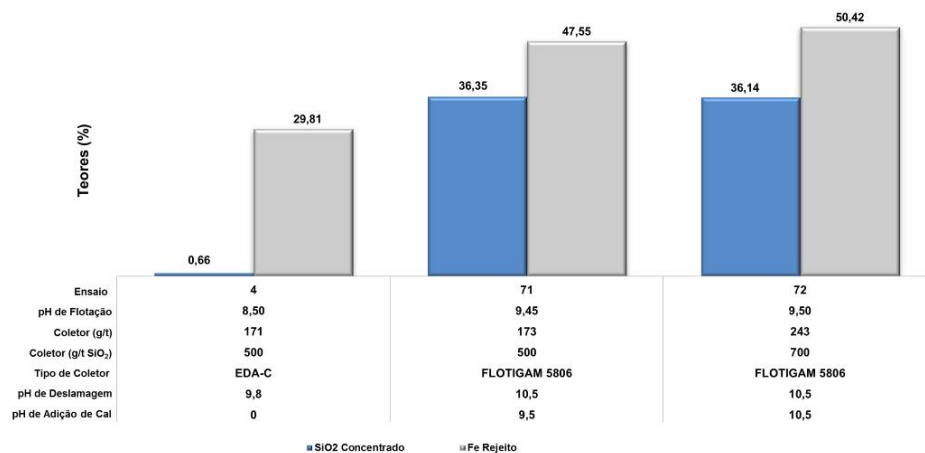


Gráfico 5.11 – Estudo de reagentes com cal utilizando o coletor Flotigam 5806.

Posteriormente foi estudado a aplicação do complexante EDTA em conjunto com o coletor EDA-C, conforme tabela V.21.

Tabela V.21 – Especificações para flotação com cal usando complexante EDTA.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor			
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant
73	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	168	Clariant
74	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	168	Clariant
75	Sim	9,5	10,5	EDA C	700	236	Clariant
76	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	168	Clariant
77	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	168	Clariant
78	Sim	9,5	10,5	EDA C	700	236	Clariant

Ensaio	Depressor			Complexante			pH Trabalho
	Tipo	g/t	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	GRITZ Milho	500	Kowalski	-	-	-	8,51
73	GRITZ Milho	500	Kowalski	EDTA	750	Clariant	10,51
74	GRITZ Milho	500	Kowalski	EDTA	1.000	Clariant	10,53
75	GRITZ Milho	500	Kowalski	EDTA	750	Clariant	10,53
76	GRITZ Milho	500	Kowalski	EDTA	750	Clariant	8,53
77	GRITZ Milho	500	Kowalski	EDTA	1.000	Clariant	8,51
78	GRITZ Milho	500	Kowalski	EDTA	750	Clariant	8,52

Os resultados químicos dos testes com o complexante EDTA podem ser observados na tabela V.22.

Tabela V.22 – Resultados químicos para flotação com cal complexante EDTA.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
73 a 78	44,27	34,65	0,044	0,94	0,091	0,036	0,047	0,032	0,70

Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
73	69,04	0,61	0,043	0,47	0,135	0,060	0,029	0,001	0,63
74	68,90	0,62	0,045	0,51	0,133	0,059	0,028	0,003	0,63
75	68,87	0,50	0,043	0,49	0,137	0,061	0,031	0,003	0,64
76	68,73	0,72	0,042	0,50	0,137	0,060	0,030	0,002	0,68
77	68,71	0,75	0,044	0,52	0,136	0,062	0,028	0,006	0,66
78	68,71	0,66	0,044	0,54	0,140	0,061	0,031	0,001	0,64

Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
73	23,96	62,62	0,037	1,22	0,056	0,020	0,035	0,087	0,75
74	24,71	61,66	0,037	1,16	0,062	0,020	0,032	0,076	0,75
75	27,69	58,68	0,040	1,22	0,064	0,023	0,045	0,104	0,70
76	27,22	58,51	0,039	1,16	0,061	0,023	0,030	0,077	0,76
77	26,49	59,23	0,038	1,26	0,060	0,021	0,031	0,075	0,75
78	26,07	60,20	0,037	1,13	0,054	0,021	0,032	0,078	0,69

O gráfico 5.12 apresenta os resultados. Em todas as condições, variando o pH de flotação, a dosagem de complexante e coletores, foi obtido teores de sílica no concentrado abaixo de 1,0%.

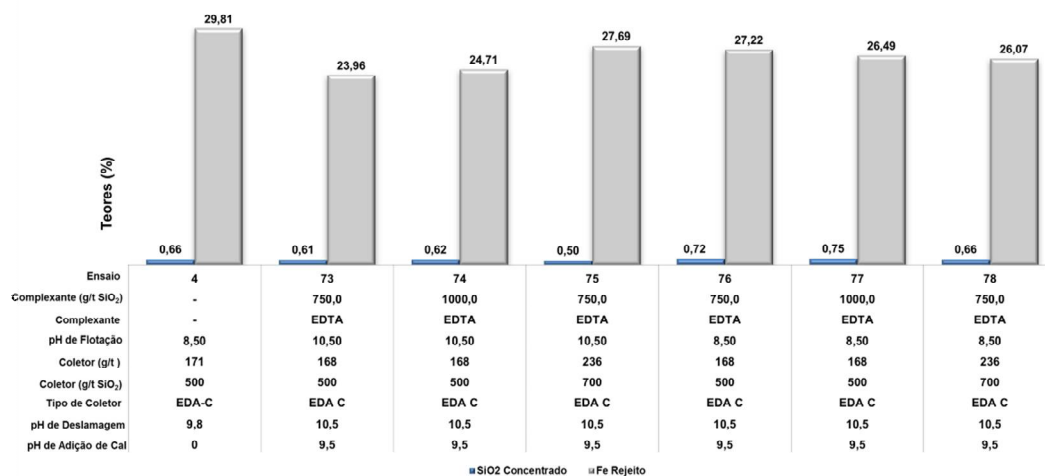


Gráfico 5.12 – Estudo de reagentes com cal utilizando o complexante EDTA.

Ensaios com dosagem estagiada foram realizados. Inicialmente o material foi flotado aplicando o pH 10,5 e 500g/t SiO₂ ou 168 g/t do coletor EDA-C, em seguida o concentrado deste processo foi flotado aplicando mais três tipos de surfatantes, sendo eles, EDA-C, coletor amido amina MDB 1521 e o complexante Flotisor SI 7020. Especificações dos ensaios conforme tabela V.23.

Tabela V.23 - Especificações para flotação com dosagem estagiada.

Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas de repouso)	pH de deslamagem no loop	Coletor				Depressor			pH Trabalho
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
4	Não	Não	9,8	EDA-C	500	171	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,51
79	Sim	9,5	10,5	EDA C	500	168	Clariant	GRITZ Milho	500	Kowalski	10,51
Ensaio	Adição de Cal Anteriormente a Deslamagem	pH após adição de cal (16 horas)	pH de deslamagem no loop	Coletor				Complexante			pH Trabalho
				Tipo	g/t SiO ₂	g/t Alim	Fornecedor	Tipo	g/t	Fornecedor	
80	Não	Não	Não	EDA C	500	8	Clariant	-	-	-	8,52
81	Não	Não	Não	Amido Amina 1521	500	8	Clariant	-	-	-	8,51
82	Não	Não	Não	EDA C	500	8	Clariant	Flotisor SI 7020	100	Clariant	8,52

Todos os concentrados após este processo fornecem teor de sílica com valor abaixo a 1,0%, conforme tabela V.24 e gráfico 5.13.

Tabela V.24 – Resultados químicos para flotação com dosagem estagiada.

Ensaio	Alimentação								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	44,40	34,11	0,034	0,76	0,088	0,034	0,023	0,001	0,56
79	44,65	33,69	0,041	0,99	0,094	0,031	0,039	0,042	0,59
80 a 82	68,14	1,64	0,048	0,66	0,134	0,060	0,046	0,014	0,60

Ensaio	Concentrado								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	68,74	0,66	0,042	0,53	0,131	0,061	0,038	0,001	0,62
79	68,14	1,64	0,048	0,66	0,134	0,060	0,046	0,014	0,60
80	68,90	0,62	0,045	0,51	0,133	0,059	0,028	0,003	0,63
81	68,87	0,50	0,043	0,49	0,137	0,061	0,031	0,003	0,64
82	68,84	0,54	0,043	0,46	0,156	0,061	0,038	0,002	0,60

Ensaio	Rejeito								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
4	29,81	54,99	0,039	1,08	0,055	0,021	0,031	0,050	0,63
79	25,43	61,50	0,039	1,18	0,061	0,023	0,039	0,079	0,69
80	64,22	6,27	0,058	0,94	0,074	0,057	0,055	0,023	0,78
81	63,03	6,93	0,066	1,13	0,082	0,060	0,069	0,022	0,81
82	65,30	5,39	0,056	0,90	0,068	0,058	0,045	0,020	0,61

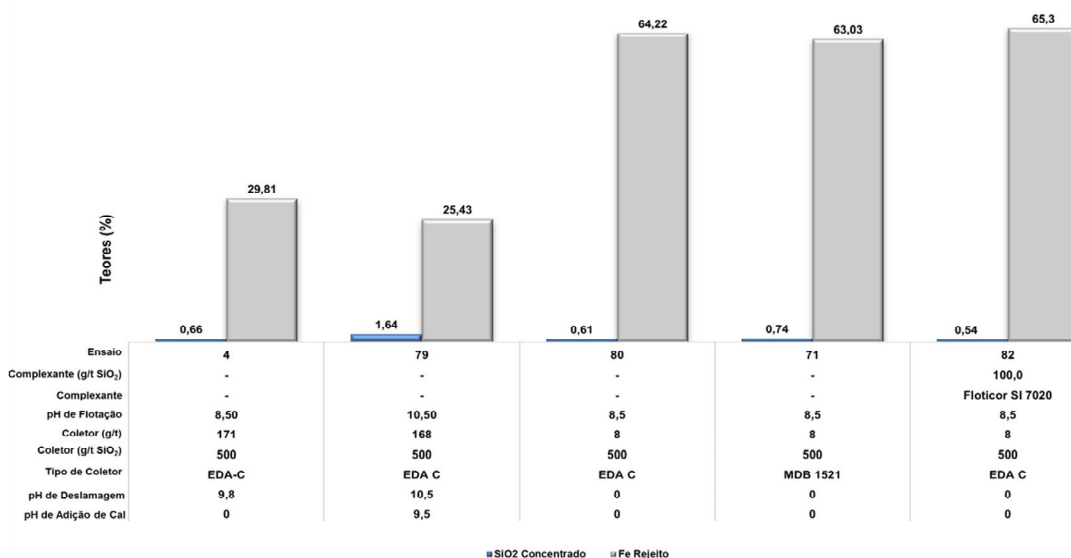


Gráfico 5.13 – Estudo de reagentes com cal dosagem estagiada.

O gráfico 5.14 apresenta um compilado dos melhores resultados obtidos. Sendo o primeiro ensaio a esquerda do gráfico, assim como em todos os casos acima, o teste base sem cal para comparação.

Ao utilizar o complexante EDTA nas condições do ensaio 73 conseguiu-se baixo teor de sílica no *pellet feed*, além de uma redução na participação de ferro no rejeito.

Com o complexante Flotisor SI7020, ensaio 52, foi obtido e um valor ligeiramente acima do teste de referência no que tange a sílica no *pellet feed* mas ainda aceitável e redução de ferro no rejeito.

Utilizando uma maior dosagem de EDA-C (40% maior que o teste de referência) no ensaio 35, foi obtido um valor no teor de sílica no *pellet feed* e também do ferro no rejeito ligeiramente abaixo do ensaio 04.

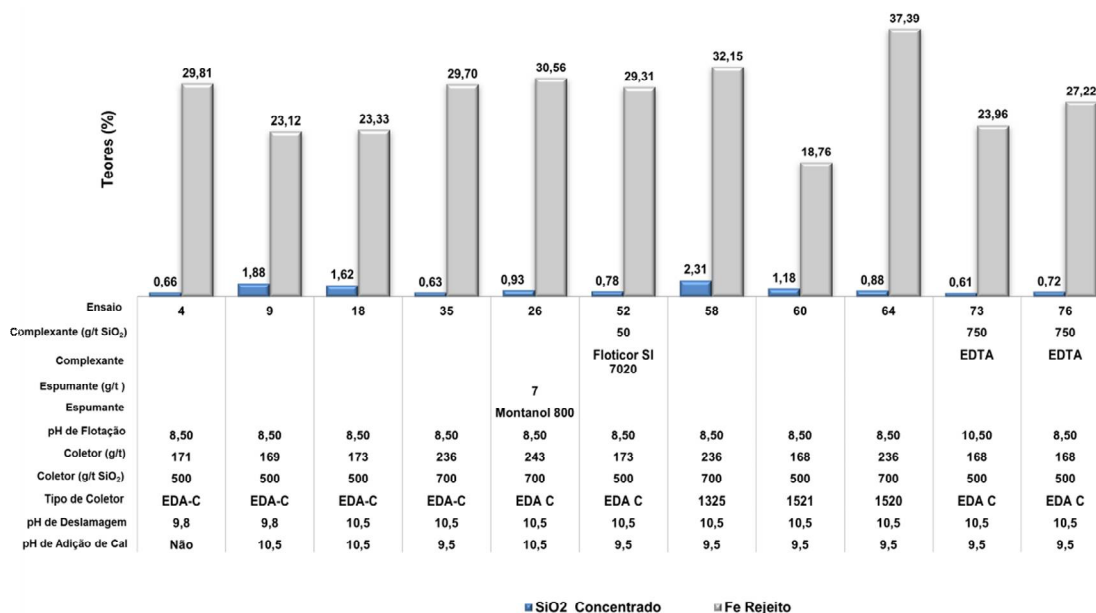


Gráfico 5.14 – Estudo de reagentes para flotação com cal – Melhores resultados.

6. CONCLUSÃO

- Na flotação em laboratório os ensaios sob condição padrão, ou seja, sem adição da cal hidrata, apresentaram resultados satisfatórios, sendo o teste 04 utilizado como referência devido sua dosagem e teor de sílica no concentrado de 0,66%. As especificações deste ensaio foram dosagem de coletor de 500g/t SiO₂ ou 171 g/t com EDA-C e depressor de 500g/t griz de milho, pH de trabalho em 8,51.

- Foi observado que a após a adição da cal, a partir do ensaio 5, e efetuando a flotação com amina, EDA-C e amido griz de milho a presença das espécies resultantes da dissociação – Ca²⁺ e CaOH⁺ colaboram fortemente para o aumento do teor de sílica no concentrado. Atingiu-se pico de 10,71%SiO₂ no concentrado com pH de flotação 10,50, amina 300g/tSiO₂ ou 101g/t e mínimo de 1,88%SiO₂ no concentrado com pH de flotação 8,50, amina 500g/t SiO₂ ou 171g/t em ambos os casos amido fixo em 500g/t, ambos os resultados insatisfatórios já que o objetivo é um *pellet feed* para redução direta – SiO₂<1,0%.

- Nos ensaios avaliou-se o impacto da mudança no pH da deslamagem, alterando o mesmo de 9,8 para 10,5. É constatado que a elevação do pH nos ensaios de deslamagem reduz o teor de sílica no *pellet feed*, mas sem atingir valores abaixo de 1,00% SiO₂, como referência o menor valor foi 1,88% SiO₂.

- Com a adição de espumante, Montanol 800, ocorre a redução do teor de sílica no concentrado, todos os resultados ficaram com valor inferior a 1,30%. Porém para obter teor de SiO₂ abaixo de 1,0% além da aplicação de espumante foi necessário elevar a dosagem de amina EDA-C para 700 g/t SiO₂ (ensaio 28). Um ponto a destacar é a elevação do teor de ferro no rejeito, que passou de 23,33% para 30,56%, tendo como base de comparação o ensaio 4 que é a referência.

- No estudo com complexante Flotisor SI 7020 aplicando 50g/t SiO₂ de complexante, 500g/t SiO₂ ou 173g/t de coletor EDA-C e pH de flotação 8,5 (ensaio 52) foram obtidos teores de ferro no rejeito e sílica no concentrado de, respectivamente, 29,31% e 0,78% semelhantes ao teste base sem adição de cal, ensaio 4.

- Os ensaios de flotação com os coletores amido amina MDB 1520, MDB 1521 e MDB 1325 em pH 8,5 apresentaram um decréscimo no teor de SiO₂ no concentrado. Entre os três reagentes o que demonstrou ser mais efetivo foi o amido amina MDB 1520, ao aplicar uma maior dosagem de amina 700 g/t SiO₂, obtêm-se qualidade no *pellet feed* próxima a praticada sem adição de cal, porém com alto teor de ferro no rejeito.

- O blend dos três melhores resultados obtidos com os coletores amido amina, com o complexante Flotisor SI 7020 e com o coletor Flotigam 5806 não apresentaram nenhum resultado com qualidade satisfatória.

- Com a adição do complexante EDTA em todos os ensaios foi obtido teores de sílica no concentrado abaixo de 1,0% o que evidencia a complexação dos cátions Ca²⁺ pelo reagente adicionado. A melhor condição foi apresentada no ensaio 73, pois além do baixo teor de sílica no *pellet feed*, há uma redução na partição de ferro no rejeito.

- Após flotação exaustão rougher/cleaner, a dosagem estagiada de coletor fazendo etapa recleaner apresenta resultados satisfatórios, teores de sílica no concentrado dentro do pretendido SiO₂<1,00%. Mas esse estágio não é uma premissa do projeto.

- Com a análise de cada condição de processo, pode-se verificar que é possível chegar a um *pellet feed* que atenda as necessidades do projeto, sendo a adição do complexante EDTA combinado com amina EDA-C e amido gritz de milho a melhor condição dentre as testadas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o efeito do amido e sua possível exclusão, variando o pH de deslamagem e flotação.
- Avaliar o desempenho do EDTA sem a presença de Ca^{2+} .

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A.C., COELHO, E.M. **Effect of Aluminum Aqueous Species on the Amine Flotation of Quartz. Transacions.** Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, INC, v. 290, Part A, 1992, p.1930-1934.

ARAUJO, A.C.; PERES, A.E.C. **Froth flotation: relevant facts and the Brazilian case.** Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1995. (Tecnologia Mineral, 70).

ARAUJO, A.C.; VIANA, P.R.M.; PERES, A.E.C. **Reagents in iron ore flotation. Minerals Engineering,** v. 18, p. 219 – 224, 2005.

BALTAR, C.A.M. **Introdução ao Tratamento de Minérios.** ed. 2, c. 4, 2010, p. 87-123, Recife, PE.

BATISTELI, G.M.B. **Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG, 93p, 2007.

BRAGANÇA, A.C.C.R., **Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, 2008.

BULATOVIC, S.M. **Handbook of flotation reagents. United Kingdom,** Ed. Elsevier Science e Technology Books, Netherlands, v. 1, 2007.

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

COMLEY, B.A., HARRIS, P.J., BRADSHAW, D.J. e HARRIS, M.C. **Frother characterization using dynamic surface tension measurements.** International Journal of Mineral Processing, v. 64, p. 81-100, 2002.

DANA, J.D. 1981, **Manual de mineralogia.** Rev. Cornelius S. Hurlbut, JR. Trad Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 667p.

DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J., 1977, **An introduction to the rock-forming minerals.** London: Longman, 628p.

DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J. **Minerais Constituintes das Rochas-Uma Introdução.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1981. 558p.

FLINT L.R. **Factors influencing the design of flotation equipment. Minerals Science Engineering.** 1973; 5(3):232-241

FOUAD, T., KHAIRY, M.E.A., MOHAMMED, B.S., MOUSTAFA, M.R.K. (1994). **Effect of Cationic and Anionic Surfactants on Electrokinetic Potentials of Cassiterite and Quartz in presence of Polyvalent Cations.** Qatar Univ. Sci. J. p. 183-188.

FUERSTENAU, M.C., MILLER, J.D., KUHN, M.C. (1985). **Chemistry of Flotation. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc.** New York, 177p.

FUERSTENAU, M.C., PALMER, B.R. (1976). **Anionic Flotation of Oxides and Silicates.** In: Fuerstenau, M. C. Flotation, A. M. Gaudin Memorial. New York: Ed. AIME, v. 1, p. 148-196.

IBGE CIDADES. **Histórico do município de Conceição do Mato Dentro.** Disponível em: <http://cod.ibge.gov.br/101W>. Acesso em: 20/11/2014

KLEIN, C., HURLBUT, JR., C.S. **Manual of Mineralogy.** 20 ed new York: John Wiley & Sons, 1985. 596p.

LI R., HOBERG H., CHNEIDER F. **Investigations on the influence of particle size in flotation.** In: **Proceedings of the 18th International Mineral Processing Congress;** 1993; Sydney. Parkville: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1993. p. 689-697. vol. 3.

LIMA, N.P., **Comportamento de Minérios Itabiríticos dos complexos Alegria e Fábrica Nova frente aos Processos de deslamagem e flotação.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, 2001.

LIN, W.O., NETO, J.T.X.B, **Agentes Complexantes: Podante, Coronante e Criptante Classificação e Nomenclatura.** Departamento de Química, Instituto Militar de Engenharia, 1998.

LEJA, J. **Surface chemistry of froth flotation.** New York: Plenum, 1982.

LELIS, D.F.L., **Influência de cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} E Mn^{2+} na flotação reversa de minério de ferro.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. UFOP, 89p, 2014

MILLER, **Advances in Flotation Technology.** Edited by B.K Parekh and J.D. Miller. 1999.

MONTE, M.B.M., PERES, A.E.C. **Química de superfície na flotação.** In: Luz, A.B. *et al.* Tratamento de minérios. 3.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002, Capítulo 9, p.339-407.

NUMELA, W. & IWASAKI, I. **Iron Ore Flotation.** In: **Advances in Mineral Processing.** Colorado: Ed. Littleton, SME, 1986, Chapter 18.

NEDER e LEAL FILHO (2006). **O uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios brasileiros**. Holos, Ano 22, maio 2006.

PARKS, G. (1975). **Adsorption in the Marine Environment**. In: Riley, J.P., SKIRROW, G. Chemical Oceanography. Academic Press, ed. 2, v. 1, c. 4, p. 241-308, London, New York, San Francisco.

PAULA, J.A. **A mineração do ouro em Minas Gerais do século XVIII**. In: RESENDE, M. E. F. L. & VILLALTA, L. C. (orgs.) As Minas Setecentistas, volume 1. Belo Horizonte: Autêntica, 2007.

PERES, A.E.C. **“Notas de aula de Flotação”** – PPGEM – UFMG, 2013.

PERES, A.E.C. **Apostila de Flotação, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas**. PPGEM – UFMG, 112p. 2003.

PERES, A.E.C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Editora UFMG, 171p. 2004.

PERES, A.E.C., COELHO, E.M., de ARAÚJO, A.C. (1980) **Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva**. In: COELHO, E.M. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia; In Memoriam Prof. Paulo Abib Andery. Recife: ITEP-CNPq, p. 205-286.

QUARESMA, L. Felipe. **O Mercado Brasileiro de Minério de Ferro: Sua Instabilidade e a Possibilidade de Associação dos Países Exportadores**. Dissertação de Mestrado. UNICAMP. Campinas, SP. 1987.

RAMDOHR, P., 1980, **The ore minerals and their intergrowths**. 2. ed. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1202p.

Relatório Técnico Gerência de Desenvolvimento de Processos e Tratamento de Minério **N0095_Serra da Serpentina_Rev 03**. Relatório Interno Vale, Belo Horizonte, 2012.

SCOTT, J. L., SMITH, R. W. **Calcium ion effects in amine flotation of quartz and magnetite**. Minerals Engineering, v. 6, n. 12, p. 1245-1255, 1993.

SILVA, R. R. R. **Sistemas de Reagentes Surfatantes na Flotação Catiônica Reversa de Minérios de Ferro**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, 120p. 2004.

SILVA, R. R. R. **Interação entre surfatantes na flotação de minérios de ferro**. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, 153p. 2008.

SCHWERTMANN, U.; CORNEL, R. M., 1991, **Iron oxides in the laboratory; preparation and characterization**. Weinheim: VCH, 137p.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M., 1977, **Iron Oxides. In: Minerals in soil environments**. Dixon, J. B. ed Wiscosin, p. 145 -180.

TURRER, H.D.G., **Utilização de poliacrilamidas de alto peso molecular na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG, 79p. 2004.

VIEIRA, A. M. **Flotação Alguns Tópicos**. Curso Interno SAMARCO, 1995.

VERAS, M.M., Influência do tipo de espumante nas características de espuma produzida na flotação. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, UFPE, 64p, 2010.

Wills, B.A., **Mineral Processing Technology**, Eighth edition, 2016, Pergamon Press, Oxford.

WHISTLER, R.L., PASCHALL, E.F. **Starch: chemistry and technology**. New York: Academic Press, 1965. v. 1. 579p.