



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



STEPHÂNIA DA CONSOLAÇÃO SILVA NOGUEIRA

AVALIAÇÃO DE NOVOS COLETORES PARA A FLOTAÇÃO CATIONICA REVER-  
SA DE MINÉRIO DE FERRO

OURO PRETO

2018

STEPHÂNIA DA CONSOLAÇÃO SILVA NOGUEIRA

AVALIAÇÃO DE NOVOS COLETORES PARA A FLOTAÇÃO CATIONICA REVER-  
SA DE MINÉRIO DE FERRO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Tratamento de minérios.

Orientador: Ma. Francielle Câmara Nogueira

Coorientador: Me. Vanderson Eney de Matos

OURO PRETO

2018

N778a Nogueira, Stephânia da Consolação Silva.  
Avaliação de novos coletores para a flotação catiônica reversa de minério de ferro [manuscrito] / Stephânia da Consolação Silva Nogueira. - 2018.

42f.: il.: color; grafis; tabs; mapas.

Orientador: Profa. MSc. Francielle Câmara Nogueira.  
Coorientador: MSc. Vanderson Eney Matos.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

CDU: 622.765



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

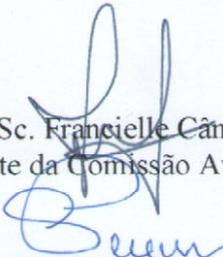
Aos 23 dias do mês de julho de 2018, às 08h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “**AVALIAÇÃO DE NOVOS COLETORES PARA FLOTAÇÃO CATIONICA REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO**”, pela aluna **Stephânia da Consolação Silva Nogueira**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. M.Sc. Francielle Câmara Nogueira (orientadora)**, **Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira** e **Eng. de Minas Isabela dos Santos Stopa**.

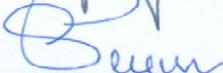
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela APROVA DA..... da candidata, com a nota 9,5... concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 23 de julho de 2018.

  
Prof. M.Sc. Francielle Câmara Nogueira  
Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora

  
Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Eng. de Minas Isabela dos Santos Stopa  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Stephânia da Consolação Silva Nogueira  
Stephânia da Consolação Silva Nogueira

  
Prof. M.Sc. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

Dedico esse trabalho aos meus pais Osvaldo e Consola, à minha irmã Stella e ao  
Vanderson.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sempre guiar meus caminhos e iluminar minhas escolhas concedendo-me força e sabedoria.

À empresa Pietschemicals pelo apoio e estímulos profissionais proporcionando desenvolvimento pessoal e profissional.

À Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade de engrandecimento científico

À Francielle Câmara Nogueira pela orientação, atenção, amizade e apoio.

Ao Vanderson Eney de Matos pela coorientação, troca de conhecimentos e pelo incentivo ao longo dessa jornada.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas pelos ensinamentos.

Ao professor Carlos Alberto Pereira pelo carinho e pelas diversas oportunidades ao longo desses anos.

Aos meus queridos pais Osvaldo e Consola e à minha irmã Stella pelo amor incondicional e por acreditarem em mim.

Ao Vanderson pelo companheirismo, parceria e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus amigos e colegas de curso.

## RESUMO

A flotação catiônica reversa é o processo mais utilizado para a concentração de minério de ferro oxidado de baixo teor, como aqueles encontrados no Quadrilátero Ferrífero. As eteraminas são os surfatantes mais amplamente utilizados como coletores de quartzo nesse processo. Esse trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de três coletores alternativos distintos, comparados a duas eteraminas convencionais, através de ensaios de microflotação em tubo de Hallimond modificado e testes de flotação em bancada. Os resultados mostraram que o coletor alternativo não-eteramina Flotasil PCD-CL apresentou o melhor resultado de flotabilidade de quartzo nos testes de microflotação para a concentração de 3 mg/L no pH 10,0. O mesmo coletor obteve os melhores resultados de teor de sílica no concentrado, recuperação metálica e índice de seletividade nos testes de flotação em bancada. Dessa forma, esse reagente está indicado para ser testado como coletor alternativo em testes em escala piloto ou em processos industriais.

**Palavras-chave:** Surfatantes. Aminas. Flotação catiônica. Minério de ferro. Eteraminas.

## ABSTRACT

The cationic reverse flotation is the process used for the concentration of oxidized iron ore of low content, such as those found in the Cuadrilátero Ferrífero. The etheramines obtained the best results of silica content in the concentrate, metal recovery and selectivity index flotation tests on countertop. Thus, this reagent is stated to be tested as alternative collector in pilot-scale tests or in industrial processes are the most widely used surfactants as quartz sinks in this process. This study aimed to evaluate the performance of three different alternatives collectors compared the two conventional etheramines, through microflotation tests on modified Hallimond tube and flotation tests on bench flotation. The results showed that the alternative non-collector eteramine Flotasil PCD-CL presented the best result of floatability of quartz microflotation tests for concentration of 3 mg/L at pH 10.0. The collector has obtained the best results of silica content in the concentrate, metal recovery and selectivity index flotation tests on countertop. Thus, this reagent is stated to be tested as alternative collector in pilot-scale tests or in industrial processes.

**Keywords:** Surfactants. Amines. Cationic flotation. Iron ore. Etheramines.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. OBJETIVOS .....	11
2.1 Objetivos específicos .....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 Processo de flotação na concentração de minério de ferro .....	12
3.2 Reagentes de flotação .....	14
3.4 Aminas .....	16
3.4.1 Eteramina.....	18
4. METODOLOGIA .....	20
4.1 Preparação das amostras minerais .....	20
4.2 Preparação dos reagentes .....	21
4.4 Testes de microflotação .....	22
4.5 Testes de flotação em bancada .....	24
4.6 Análise de resultados .....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
5.1 Caracterização das amostras minerais.....	27
5.2 Resultados dos testes de microflotação .....	27
5.2.1 Avaliação das eteraminas convencionais .....	27
5.2.2 Avaliação de eteraminas alternativas .....	30
5.2.3 Avaliação do coletor alternativo não eteramina .....	32
5.3 Testes de flotação em bancada .....	34
6. CONCLUSÕES .....	38
REFERÊNCIAS .....	39

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Solução de coletores utilizados.....	21
Figura 2 - Tubo de Halimond modificado.....	23
Figura 3- Flotabilidade do quartzo em função da concentração para as eteraminas convencionais (pH 10,0).....	28
Figura 4– Flotabilidade do quartzo em função do pH para as eteraminas convencionais (Concentração 1 mg/L).....	29
Figura 5– Flotabilidade do quartzo em função do pH para as eteraminas convencionais (Concentração 3 mg/L).....	29
Figura 6– Flotabilidade do quartzo em função da concentração para as eteraminas alternativas em relação à eteramina convencional C10R20 (pH 10,0).....	30
Figura 7– Flotabilidade do quartzo em função do pH para as eteraminas alternativas em relação a eteramina convencional C10R20 (Concentração 1 mg/L).....	31
Figura 8– Flotabilidade do quartzo em função do pH para as eteraminas alternativas em relação a eteramina convencional C10R20 (concentração 3 mg/L).....	31
Figura 9– Flotabilidade do quartzo em função da concentração para o coletor não eteramina PCD-CL em relação às eteraminas alternativas e a convencional C10R20 (pH 10,0).....	32
Figura 10– Flotabilidade do quartzo em função do pH para o coletor não eteramina PCD-CL em relação às eteraminas alternativas e a convencional C10R20 (concentração 1 mg/l). .....	33
Figura 11– Flotabilidade do quartzo em função do pH para o coletor não eteramina PCD-CL em relação às eteraminas alternativas e a convencional C10R20 (concentração 3 mg/l) .....	33
Figura 12– Resultados de %SiO <sub>2</sub> no concentrado nos testes de flotação em bancada.....	34
Figura 13– Resultados de %Fe no rejeito nos testes de flotação em bancada. ....	35
Figura 14– Resultados de recuperação em peso nos testes de flotação em bancada. ....	35
Figura 15– Resultados de recuperação metálica nos testes de flotação em bancada. ....	36
Figura 16– Resultados dos índices de seletividade nos testes de flotação em bancada.....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de surfatantes coletores utilizados.....	21
Tabela 2 – Composição química da amostra e quartzo.....	27
Tabela 3- Composição química da amostra de minério de ferro.....	27

## 1. INTRODUÇÃO

A flotação é um processo físico-químico de concentração mineral que utiliza reagentes químicos no controle das propriedades superficiais das partículas tornando-as mais susceptíveis às interações com a água ou com o ar. Esse princípio permite que minerais com características de hidrofiliidade ou hidrofobicidade naturalmente similares possam ser separados de forma seletiva.

Os minérios de ferro itabiríticos são constituídos majoritariamente pelos minerais quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que em meio aquoso possuem superfície carregada negativamente, exibindo caráter hidrofílico (afinidade pela água). Na flotação catiônica reversa, o uso de amidos depressores reforçam a hidrofiliidade da hematita, mantendo-a na fase polpa, enquanto surfatantes coletores adsorvem-se preferencialmente na superfície do quartzo tornando-a hidrofóbica, permitindo sua transferência para a fase espuma, formada pela a passagem de ar na polpa em suspensão.

Além da escolha adequado dos reagentes, o sucesso do processo de flotação depende de ajustes das condições operacionais e de processo (dosagens de coletor, dosagens de depressor, pH, % de sólidos, entre outros), de forma a garantir a máxima produtividade ou recuperação metalúrgica de ferro, atendidas as especificações de qualidade praticadas no mercado.

Vários produtos químicos podem ser utilizados como reagentes, entretanto as ete-raminas são os surfatantes catiônicos mais amplamente utilizados como coletores de flotação em processos de concentração mineral. Com a redução dos teores de ferro nas jazidas e a necessidade de flotar minérios com granulometrias menores, em função da diminuição das faixas de liberação dos minerais, o consumo de aminas tende a aumentar e a demanda por produtos mais eficientes e com custos mais atrativos será uma constante no tratamento de minérios.

Esse cenário abre oportunidade para o desenvolvimento de produtos inovadores como alternativas ao uso dos coletores convencionais, ampliando o *range* de opções para a flotação, aumentando o nível de desempenho dos reagentes, a produtividade

do processo e conseqüentemente a manutenção da competitividade das empresas fornecedoras desses insumos.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho de novos agentes surfatantes como coletores de quartzo no processo de concentração de minério de ferro por flotação catiônica reversa.

### **2.1 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos foram:

- a) avaliar o desempenho dos novos coletores na flotabilidade do quartzo através da realização de testes de microflotação em tubo de Hallimond;
- b) avaliar a eficiência dos novos coletores no desempenho da flotação de um minério de ferro oriundo de uma mina do Quadrilátero Ferrífero através de testes em escala de bancada.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão baseada na literatura, contextualizando os temas pertinentes a este trabalho.

#### 3.1 Processo de flotação na concentração de minério de ferro

O ferro é o quarto elemento químico mais abundante na natureza sendo antecedido pelo oxigênio, silício e alumínio e encontrando-se como o segundo metal mais presente na crosta terrestre (SALES, 2012). Os maiores depósitos de minério de ferro no Brasil são constituídos pelas formações ferríferas bandadas, compostas por itabirito que em sua mineralogia contém como elementos principais minerais de hematita e quartzo (QUARESMA, 2001).

Devido à exaustão das jazidas de elevados teores e a necessidade de concentração de minérios finos, de baixos teores, e de elevada complexidade textural/estrutural e químico-mineralógica, torna-se imprescindível o entendimento das características das espécies minerais, como é o caso das propriedades de superfície, que são fundamentais para a flotação e que afetam toda a sua dinâmica, bem como a atuação e seletividade dos reagentes de flotação (LIMA, 2001).

A flotação catiônica reversa é a rota mais utilizada para a flotação de minério de ferro no Brasil apesar de existirem outros processos de pré-concentração convencional de minério por métodos gravíticos ou por separação magnética. Esse método de concentração apresenta alta versatilidade por tratar minérios com características distintas em uma ampla faixa granulométrica (MATOS 2017).

Segundo Reis (2015), no processo de flotação catiônica “reversa” de minério de ferro, ao contrário do processo de flotação “direta”, as espécies flotadas são os minerais de ganga, principalmente o quartzo. Os minerais-minério (óxidos e hidróxidos de ferro) representam um maior volume sendo deprimidos no fundo da célula de flotação e seguem para o concentrado posteriormente. Isto também ocorre devido uma maior densidade apresentada pelos minérios de ferro o que auxilia na sua sedimentação.

O produto gerado na flotação de minério de ferro é o *pellet feed*. Sua qualidade química deve conter o maior teor de ferro e os menores teores de contaminantes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , P, Mn) dentro do possível, como forma de atender adequadamente os processos de aglomeração (pelotização) e redução subsequentes (REIS, 2015).

Iwasaki (1983) destaca três fatores para esse papel primordial da flotação:

- a) a flotação é o principal processo utilizado para a concentração de minérios oxidados de baixos teores;
- b) o processo possibilita a redução dos teores em sílica de concentrados magnéticos obtidos por separação magnética, principalmente quando a liberação extremamente fina da sílica impede o bom desempenho da separação magnética;
- c) a flotação é o processo mais indicado para a produção de superconcentrados, destinados aos processos metalúrgicos de redução direta.

Segundo Gaudin (1939), três requisitos básicos devem ser atendidos para que o processo de flotação ocorra, sendo eles:

- a) liberabilidade das partículas de diferentes espécies (quartzo e hematita, por exemplo) obtida através das operações de fragmentação e cominuição;
- b) diferenciabilidade entre as superfícies das partículas minerais, onde as mesmas devem apresentar diferentes graus de hidrofobicidade;
- c) separabilidade dinâmica relacionada à capacidade dos equipamentos de manter a polpa aerada e em suspensão permitindo a separação seletiva das fases de interesse e ganga.

De acordo com Turrer (2004), a concentração de minérios de ferro por flotação é utilizada mundialmente para partículas minerais na faixa de 10 a 250  $\mu\text{m}$ . Este tamanho da partícula que alimenta um sistema de flotação é determinado pela granulometria de liberação dos grãos do mineral que se almeja flotar. Porém, se a granulometria de liberação for maior que aquela que assegure o transporte das partículas pelas bolhas de ar, esse fator passa a dominar o tamanho máximo na alimentação, tornando o fluxo ascendente de bolhas incapaz de carrear partículas muito grandes (LEJA, 1982; PERES & ARAUJO, 2009).

Por outro lado, lamas (partículas abaixo de 10  $\mu\text{m}$ ) prejudicam o processo de flotação causando perdas de recuperação mássica e de seletividade. Segundo Peres & Salum (2004), este fenômeno é denominado *slimes coating*, no qual a atuação de forças intermoleculares de longo alcance promove o recobrimento da superfície de um mineral por lamas de outras espécies, mudando suas características superficiais, alterando a rigidez da espuma, interferindo no contato bolha-mineral e tornando pouco efetiva a atuação dos reagentes, por suas interações com as lamas, que possuem elevadas áreas superficiais quando comparadas com as das partículas de minério. De acordo com Aplan & Fuerstenau (1962) *apud* Reis (2015), a flotação catiônica é dez vezes mais influenciada por esse fenômeno que a flotação aniônica.

De acordo com Peres & Araujo (2009), a seletividade do processo de flotação se baseia no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade. Partículas mais hidrofóbicas são menos ávidas por água enquanto partículas hidrofílicas possuem grande afinidade com a água. O diferencial da flotação está no fato dessas características poderem ser induzidas pela ação dos reagentes.

### 3.2 Reagentes de flotação

Segundo Peres *et al.*, (1980), reagentes de flotação são compostos orgânicos e inorgânicos empregados objetivando o controle das características das interfaces envolvidas no processo. Os reagentes são classificados como coletores, espumantes e modificadores ou reguladores de acordo com seu papel específico na flotação.

A utilização de amina como coletor/espumante e amido de milho como depressor, no processo de flotação reversa de minério de ferro é de suma importância em todas as grandes usinas brasileiras produtoras de *pellet-feed* (SANTANA, 2012).

Espumantes são compostos não iônicos pertencentes às classes dos álcoois, éteres e seus derivados contendo grupos óxido de etileno e óxido de propileno, óleo de pinho e “ácidos cresílicos”. O que difere os espumantes dos coletores é o caráter funcional do grupo polar, na qual o radical dos coletores é quimicamente ativo e interage com a superfície do mineral a ser coletado, enquanto o radical liofílico dos espu-

mantes tem grande afinidade com a água. Alguns coletores acumulam a função espumante como é o caso das aminas (PERES e ARAUJO, 2006).

As ações dos modificadores são bem distintas, comparadas aos coletores e espumantes cujas funções são bem definidas por Peres & Araujo (2009):

- a) modulação do pH - efetuada mediante a adição de ácidos e bases. Deve-se atentar para o fato de que o ânion do ácido e o cátion da base poderão, em alguns sistemas, adsorverem-se especificamente e alterar as características das interfaces envolvidas;
- b) controle do estado de agregação da polpa – efetuado mediante a adição de dispersantes e agregantes (coagulantes e floculantes). Em geral, uma polpa dispersa favorece a flotação. Uma floculação seletiva dos minerais que se dirigem ao afundado poderá ter um efeito benéfico (ex.: flotação catiônica reversa de minérios itabiríticos). Os polímeros naturais e sintéticos têm poder floculante no caso de apresentar alto peso molecular e são dispersantes quando possuem baixo peso molecular;
- c) ativação – efetuada através da adição de reagentes capazes de tornar mais eficaz e/ou seletiva a ação dos coletores;
- d) depressão – efetuada mediante a adição de reagentes capazes de inibir a ação do coletor e hidrofilar a superfície dos minerais que se destinam ao afundado. Entre os depressores orgânicos destacam-se os polissacarídeos, em especial o amido de milho. Outros depressores orgânicos são os taninos e seus derivados, em especial o quebracho, os derivados de celulose (a carboximetilcelulose é o principal representante) e os lignossulfonatos.

Amidos são polímeros naturais de fórmula química  $(C_6H_{10}O_5)_n$  e são utilizados como depressores universais na flotação de minério de ferro. A composição dos grânulos consiste de dois carboidratos principais sendo eles a amilose e a amilopectina (MATOS, 2017).

Dentre todas as espécies vegetais em que o amido está presente, as mais atrativas são o milho e a mandioca. 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 a inibição da ação espumante (AGUIAR, 2014).

Coletores são tensoativos que agem nos compostos sem afinidade alterando a tensão superficial dos mesmos. Devido à importância no processo de flotação de minério de ferro e de interesse nesse estudo, será explicado mais detalhadamente no item 3.3.

### 3.4 Aminas

As aminas e seus derivados são produtos químicos extremamente importantes no processo de flotação sendo responsáveis pela concentração de minérios. No Brasil, as aminas são utilizadas em processos de concentração dos seguintes minerais:

- a) hematita (ferro) extraída das minas do quadrilátero ferrífero no estado de Minas Gerais;
- b) pirocloro (nióbio) extraídas pela CBMM em Araxá – MG e pela Anglo American na cidade de Catalão – GO;
- c) willemita e calamina (zinco) nas minas da Votorantim em Vazante –MG;
- d) apatita (fosfato) pela mineração Galvani Fertilizantes que atua em Serra do Salitre e Lagamar ambas as cidades do estado de Minas Gerais e em Angico dos Dias cidade do estado da Bahia;
- e) silvita (cloreto de potássio) extraída na usina de Taquari/Vassouras – SE;
- f) ouro na Kinross em Paracatu – MG;
- g) cobre nas minas de Caraíba – BA.

As aminas se dissociam por hidrólise e influenciada pelo pH da solução, afetando a atividade superficial através da predominância da espécie iônica ou molecular (PERES *et al.*, 2012).

A dissociação das aminas ocorre em solução aquosa conforme as Equações 1 e 2:

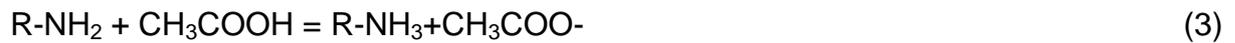


$$K_b = \frac{[\text{RNH}_3^+][\text{OH}^-]}{[\text{RNH}_2(\text{aq})]} = 4,35 \times 10^{-4} \text{ (25}^\circ\text{C) para n-dodecilamina} \quad (2)$$

Aminas primárias, secundárias e terciárias são bases fracas, portanto sua ionização depende do pH. Já as aminas quaternárias são bases fortes, ionizando-se em toda faixa de pH.

A neutralização dos coletores catiônicos (Equação 3) é comumente realizada adicionando ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), deixando a amina na forma de sal facilitando sua solubilidade em água e sua manipulação. O ácido acético é mais recomendado de ser usado por se tratar de um ácido menos corrosivo que outros ácidos, como os ácidos clorídrico, bromídrico (MAPA, 2006).

A reação de neutralização das aminas graxas primárias:



Aminas com graus de neutralização entre 30% a 70% são usadas no mercado, mas estudos revelaram que aminas que apresentam menor grau de neutralização (entre 25% e 30%) são mais seletivas (MAPA, 2006).

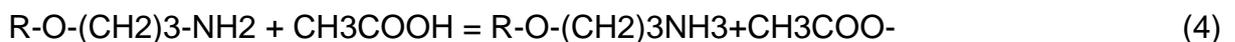
### 3.4.1 Eteramina

De acordo com Neder (2005), as eteraminas pertencem a uma classe de produtos dentre os derivados das aminas que apresentam maior importância entre todos os diferentes tipos de coletores catiônicos utilizados na mineração apesar de apresentarem elevado valor agregado.

As eteraminas são originadas através da reação entre o álcool e a acrilonitrila e consequente redução. Essas aminas são compostas por um átomo de oxigênio na cadeia hidrocarbônica, separado do nitrogênio por três átomos de carbono. A presença do oxigênio confere caráter hidrofílico ao grupo hidrofóbico, aumentando a solubilidade da molécula, e facilitando assim o acesso do reagente às interfaces sólido/líquido e líquido/gás (BULATOVIC, 2007; ARAUJO *et al.*, 2004).

Segundo Fernandes (2017), os surfatantes mais utilizados na flotação catiônica reversa de minério de ferro são as éter aminas parcialmente neutralizados com ácido acético, que se dividem em éter monoaminas ( $R-O(CH_2)_3NH_2$ ) e as éter diaminas ( $R-O(CH_2)_3NH(CH_2)_3NH_2$ ). As eteraminas ainda apresentam diferenças quanto às fontes de matéria-prima, grau de neutralização, tamanho e tipo da cadeia hidrocarbônica (Cassola *et al.*, 2011).

A neutralização das eteraminas primárias ocorre conforme Equação 4:



Segundo Matos (2015), as etermonoaminas comercialmente usadas na flotação reversa de minério de ferro têm cadeia hidrocarbônica entre 8 e 12 carbonos e as eterdiaminas possuem cadeias entre 12 e 18 carbonos. Esse autor relata a importância de investigar a influência do comprimento das cadeias de aminas para melhorar o desempenho da flotação.

Segundo Lima (1997), a adsorção da eteramina sobre a superfície do quartzo e da hematita acontece devido à atração eletrostática entre o grupo polar do acetato de eteramina e a superfície carregada negativamente destes minerais além da sofrer

influência também das ligações de van der Waals presentes nas cadeias hidrocarbônicas das eteraminas.

Matos (2017) estudou a influência de diferentes tipos de reagentes na seletividade do processo de flotação de um minério de ferro através de ensaios de bancada. Os resultados mostraram que a etermonoamina é mais seletiva para a flotação de finos enquanto a eterdiamina mostrou um maior desempenho para grossos.

## **4. METODOLOGIA**

Este capítulo descreve os materiais, equipamentos e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Os testes de microflotação foram realizados no Laboratório de Flotação do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto e os testes de flotação em bancada e as análises químicas foram realizados no Laboratório de Controle de Processo da empresa Samarco Mineração S.A.

### **4.1 Preparação das amostras minerais**

As amostras de quartzo puro utilizada para os ensaios de microflotação e as amostras de minério de ferro itabirítico utilizadas nos testes de flotação em bancada são oriundas da Samarco, Mina de Alegria/MG, situada no Quadrilátero Ferrífero.

As amostras de quartzo utilizadas nos testes de microflotação foram cominuídas sequencialmente em britador e moinho de laboratório e ajustadas em grau de porcelana para obtenção da granulometria requerida (+75-150  $\mu\text{m}$ ). Foram pesadas alíquotas de 1 g em massa para a realização dos testes de microflotação.

As amostras de minério de ferro utilizadas nos testes de flotação em bancada foram coletadas na alimentação da flotação convencional do concentrador I da empresa em questão, na forma de polpa sendo posteriormente filtradas, secas em estufa, homogeneizadas e quarteadas para formação de alíquotas fracionadas de 1500 g.

## 4.2 Preparação dos reagentes

Os surfatantes coletores avaliados nesse trabalho são produtos experimentais desenvolvidos e cedidos pela empresa Pietschemicals. Essas amostras foram identificadas nesse trabalho como A, B, C, D e E e sucintamente descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação de surfatantes coletores utilizados

Denominação	Nome do coletor	Descrição
Amostra A	Flotasil C10RVo	Eteraminas alternativas
Amostra B	Flotasil PCD-CL	Coletor não-eteramina
Amostra C	Flotasil Eqvt	Eteraminas alternativas
Amostra D	Colmin C10	Eteramina convencional
Amostra E	Colmin C10R20	Eteramina convencional

As soluções aquosas dos surfatantes coletores (Figura 1) utilizados nos testes de microflotação foram preparadas com concentração de 0,5% p/v. Já as amostras dos surfatantes eteraminas utilizadas nos testes de flotação em bancada foram preparadas em soluções aquosas de 1% p/v com água deionizada em balões volumétricos de 500 mL.

Figura 1 - Solução de coletores utilizados



As soluções de amido gelatinizado usados como depressores na flotação em bancada foram preparadas na proporção 5:1 de amido/soda. O amido foi previamente gelatinizado com a adição de solução de soda cáustica microperolada dissolvida em

água deionizada. A massa de gel formada é então diluída em uma solução aquosa de 1% p/v em balões volumétricos de 500mL.

Já as soluções aquosas de ácido acético e de soda cáustica foram preparadas a 3% p/v para ajustar o pH, quando necessário nos testes de flotação em bancada e microflotação.

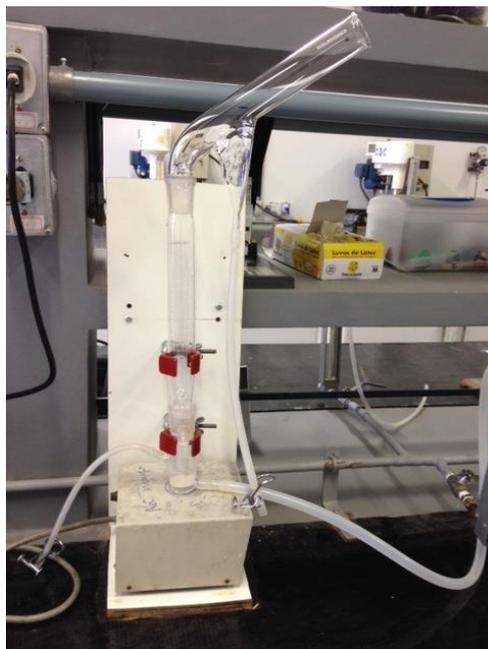
### **4.3 Caracterização das amostras minerais**

As amostras de quartzo puro e de minério de ferro (amostra global e os produtos dos testes de flotação em bancada) foram caracterizadas quimicamente através de análises de fluorescência de raios X. As amostras minerais analisadas foram previamente pulverizadas e fundidas sob a forma de pastilha.

### **4.4 Testes de microflotação**

A montagem do tubo de Hallimond modificado de 400 mL de volume da marca Hialoquímica é semelhante à apresentada na Figura 2 sendo formada por um agitador magnético, uma base de vidro porosa conectada ao gás nitrogênio comprimido, um extensor de vidro de altura 32 cm utilizado para minimizar o arraste hidrodinâmico das partículas e um pescoço de vidro.

Figura 2 - Tubo de Halimond modificado



Além do tipo de coletores, as variáveis utilizadas nos ensaios de microflotação foram as concentrações de coletor (1; 3; 5 e 10 mg/L) e os pH's de flotação (9,5; 10,0; 10,5 e 11,0).

Para ajuste de pH foram utilizadas soluções diluídas de ácido clorídrico (HCl) e de hidróxido de sódio (NaOH) a 3% p/v. Foram realizados testes preliminares para a determinação de alguns parâmetros como vazão de gás nitrogênio, tempo de condicionamento e tempo de flotação.

Através desses testes definiu-se que para haver a distribuição uniforme das bolhas de ar na base porosa de vidro a vazão de gás deveria ser de 70 mL/min. O tempo de condicionamento da solução de coletor no tubo juntamente com o mineral foi de 2 minutos e o tempo de flotação foi de 1 minuto. Nessa etapa do trabalho não houve adição de depressor.

Os testes foram realizados de acordo com as seguintes etapas:

- a) para cada teste foi adicionada ao tubo de Hallimond, 10 mL de água no pH desejado com 1g de massa de quartzo juntamente com a barra magnética na parte inferior do tubo;
- b) colocou-se a o extensor do tubo;

- c) adicionou-se soluções concentradas de coletores de forma a se obter a concentração final desejada após a diluição nos 400 mL totais do tubo. O sistema foi condicionado por 120 segundos mantendo-se a agitação constante;
- d) iniciou-se a flotação introduzindo o gás nitrogênio para a geração de bolhas com vazão de 70 mL/min;
- e) flotou-se por 60 segundos;
- f) as frações flotada e afundada foram filtradas, secas em estufa e posteriormente pesadas.

#### **4.5 Testes de flotação em bancada**

Os ensaios de flotação em bancada foram realizadas em célula da marca Wemco com cuba de 2400 mL de volume a uma rotação de 1300 rpm. Esses testes permitiram a avaliação dos cinco coletores em duas dosagens distintas: 50 e 100 g/t.

Para a realização dessa etapa adotou-se o seguinte procedimento, descrito por Matos (2017):

- a) adicionou-se 1500 g de minério de ferro na cuba de flotação. Para a obtenção de um percentual de sólidos de 50% acrescentou-se 1500 mL de água deionizada;
- b) agitou-se a polpa e adicionou-se um volume pré-determinado da solução referente a dosagem de 400 g/t de solução do depressor de amido de mandioca preparada a 1% e deixou-se condicionar por 5 minutos;
- c) ajustou-se o pH da polpa para o valor de 10,5 utilizando uma solução de soda ou ácido acético;
- d) acrescentou-se um volume pré-determinado da solução de coletor referente a dosagem do teste O coletor foi preparado a 1% p/v e condicionou-se a polpa por 1 minuto;
- e) adicionou-se mais 600 mL de água deionizada com o pH ajustado para 10,5, obtendo-se um volume final de 2400 mL;
- f) abriu-se o ar comprimido da célula para dar início à flotação e o flotado foi então retirado manualmente da cuba. Estipulou-se 3 minutos para essa etapa;

- g) ao término de cada teste, as massas do flotado e do afundado foram filtradas, secas em estufa e pesadas;
- h) após a pesagem foram retiradas alíquotas para posteriores análises químicas.

#### 4.6 Análise de resultados

Para a análise dos resultados de microflotação foram feitos cálculos da porcentagem (%) do material flotado (flotabilidade). Para esses cálculos são utilizados a soma da massa dos dois produtos como mostra a Equação 5.

$$\text{Flotabilidade (\%)} = \left[ \frac{\text{massa do flotado}}{\text{massa do flotado} + \text{massa do afundado}} \right] \times 100 \quad (5)$$

Os resultados obtidos a partir desse cálculo possibilitaram que fosse feita uma análise crítica da influência dos parâmetros estudados no desempenho dos coletores testados.

Já na flotação em bancada utilizou-se a análise do teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado, do teor de ferro no rejeito. Os dados de massa obtidos nos testes permitem o cálculo da recuperação em peso conforme Equação 6. A relação entre as massas e as análises químicas dos teores de ferro da alimentação, do concentrado e do rejeito permite calcular a recuperação metalúrgica utilizando as Equações 7 ou 8.

$$\text{RP} = \frac{C}{A} = \frac{C}{C+R} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{RM} = \frac{C_c}{A_a} \times 100 \text{ ou } \text{RM} = \text{RP} \frac{C}{a} \quad (7)$$

$$\text{RM} = \frac{c(a-r)}{a(c-r)} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

A = massa da alimentação

C = massa do concentrado

R = massa do rejeito

a = teor de ferro na alimentação (%Fe<sub>A</sub>)

c = teor de ferro no concentrado (%Fe<sub>C</sub>)

r = teor de ferro n rejeito (%Fe<sub>R</sub>)

RP = recuperação mássica ou recuperação em peso

RM = recuperação metálica ou metalúrgica

O Índice de Seletividade (IS), proposto por Gaudin (1939) também foi calculado a fim de avaliar o desempenho dos reagentes utilizados nos testes de flotação em banca-da correlacionando qualidade e produtividade desses reagentes, como mostra a Equação 9.

$$IS = \sqrt{\frac{(\text{Recuperação de Fe no concentrado}) \times (\text{Recuperação de SiO}_2 \text{ no Rejeito})}{(\text{Recuperação de Fe no Rejeito}) \times (\text{Recuperação de SiO}_2 \text{ no concentrado})}} \quad (9)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo foi feita a análise e discussão dos resultados obtidos nesse estudo.

### 5.1 Caracterização das amostras minerais

As Tabelas 2 e 3 apresentam as análises químicas do quartzo utilizado nos testes de microflotação e do minério de ferro utilizado nos testes de flotação em bancada.

Tabela 2 – Composição química da amostra e quartzo

Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	PPC	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Fechamento
0,57	98,90	0,14	0,003	0,05	0,00	0,00	0,09	0,000	100,00

Tabela 3- Composição química da amostra de minério de ferro

Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	PPC	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Fechamento.
44,82	33,40	0,21	0,028	2,12	0,065	0,005	0,040	0,000	100,00

Os resultados demonstram que o quartzo apresentou elevado grau de pureza (98,9%), necessário aos testes de microflotação e que o minério testado tem composição típica de um minério de baixo teor (44,82%Fe e 33,5%SiO<sub>2</sub>) com a presença dos contaminantes alumina, fósforo, PPC e manganês.

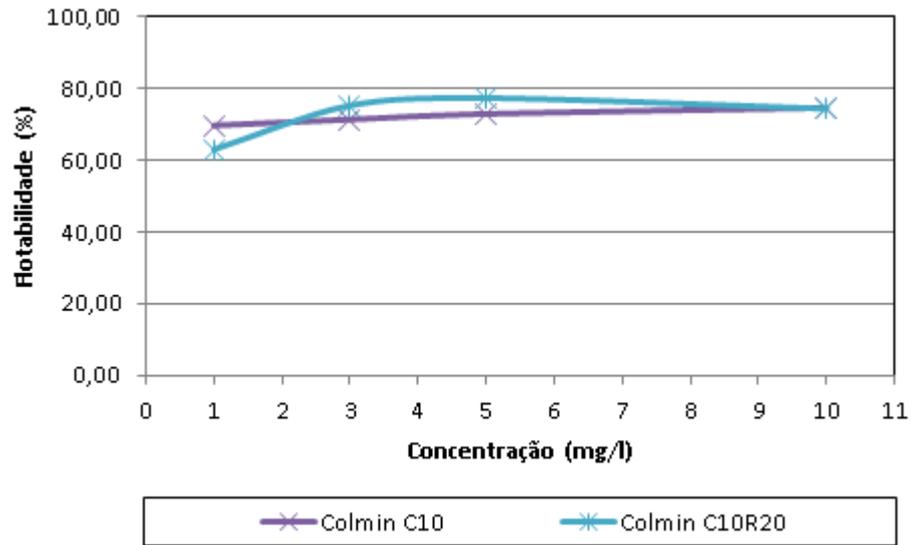
### 5.2 Resultados dos testes de microflotação

Os tópicos 5.2.1, 5.2.2, apresentam os resultados dos testes de microflotação de quartzo para as amostras de coletores avaliados, com variação da concentração de coletor e de pH, respectivamente.

#### 5.2.1 Avaliação das eteraminas convencionais

Inicialmente testaram-se as duas eteraminas convencionais para avaliar se existe diferença de desempenho entre as mesmas na flotabilidade do quartzo. A Figura 3 apresenta os resultados dos testes realizados com a Colmin C10R20 comparados a Colmin C10 para diferentes níveis de concentração de coletor.

Figura 3- Flotabilidade do quartzo em função da concentração para as eteraminas convencionais (pH 10,0)



De maneira geral pode-se dizer que os valores de flotabilidade do quartzo são similares, com ligeira superioridade observada para os testes com o Colmin C10R20, nas concentrações iguais ou superiores a 3 mg/L. Também pode-se observar que a partir desse valor a flotabilidade manteve-se estável.

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados de flotabilidade do quartzo para as mesmas eteraminas nas concentrações de 1 e 3 mg/L, respectivamente, em função da variação do pH.

Figura 4– Flotabilidade do quartzo em função do pH para as eteraminas convencionais (Concentração 1 mg/L)

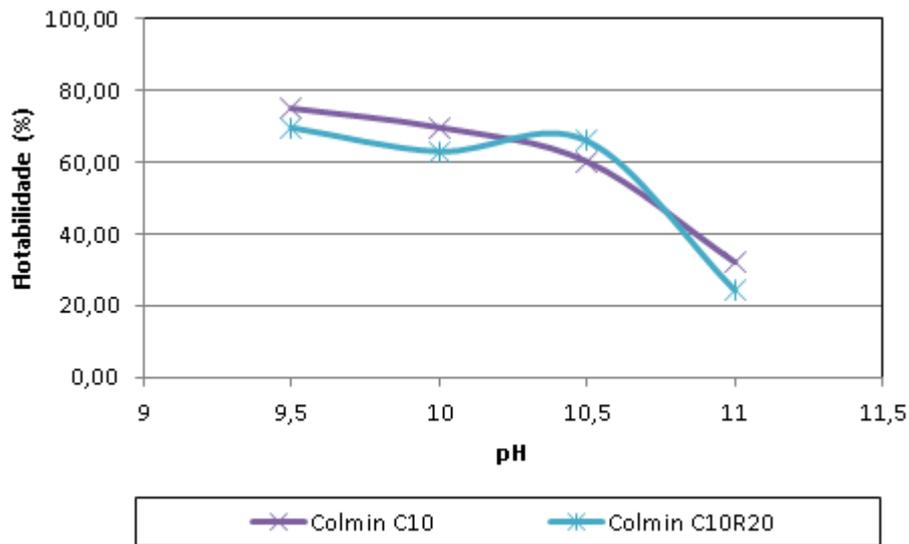
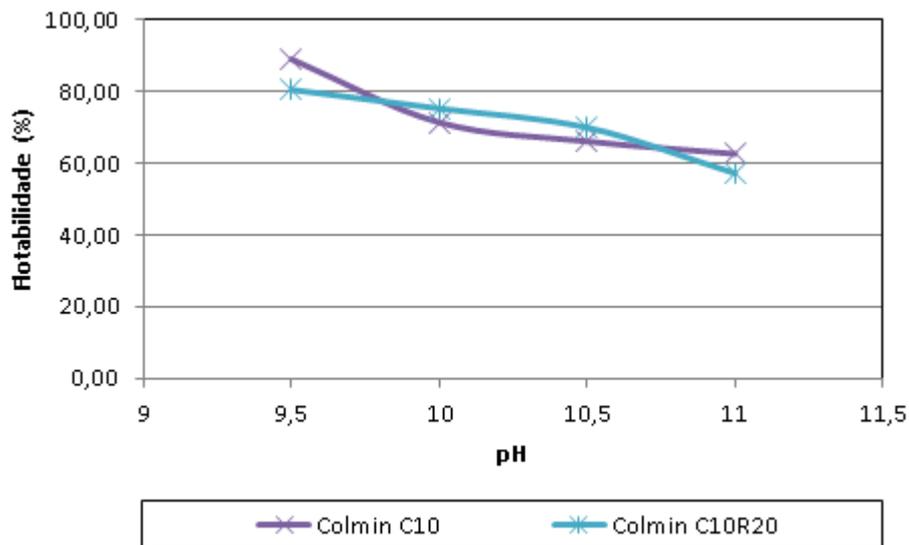


Figura 5– Flotabilidade do quartzo em função do pH para as eteraminas convencionais (Concentração 3 mg/L)



Observa-se que a flotabilidade do quartzo decresce com o aumento do pH principalmente na faixa de 10,5 a 11,0 na concentração de 1 mg/L. Isso pode ser explicado, pois para valores elevados de pH, ou seja, em meio extremamente alcalino a amina assume a forma molecular ( $\text{RNH}_2$ ), fazendo com que a flotabilidade passa a ser nula na ausência da espécie iônica ( $\text{RNH}_3^+$ ), (BALTAR e CUNHA, 2002). A sobreposição das curvas nas Figuras 4 e 5 demonstram novamente que a diferença entre as eteraminas convencionais Colmin C10 e Colmin C10R20 não foi significati-

va. Dessa forma, a eteramina Colmin C10R20 foi adotada como o coletor de referência para a avaliação comparativa dos novos coletores testados na sequência.

### 5.2.2 Avaliação de eteraminas alternativas

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam os resultados dos testes realizados com as eteraminas alternativas Flotasil C10RVo e Flotasil EQvt comparadas à eteramina Colmin C10R20, em função da variação de concentração e pH.

Figura 6– Flotabilidade do quartzo em função da concentração para as eteraminas alternativas em relação à eteramina convencional C10R20 (pH 10,0)

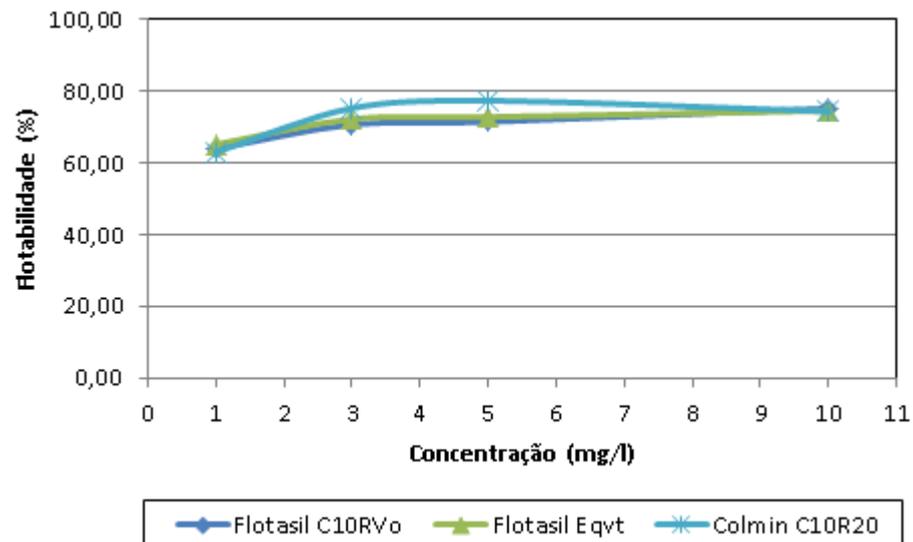


Figura 7– Flotabilidade do quartzo em função do pH para as eteraminas alternativas em relação a eteramina convencional C10R20 (Concentração 1 mg/L)

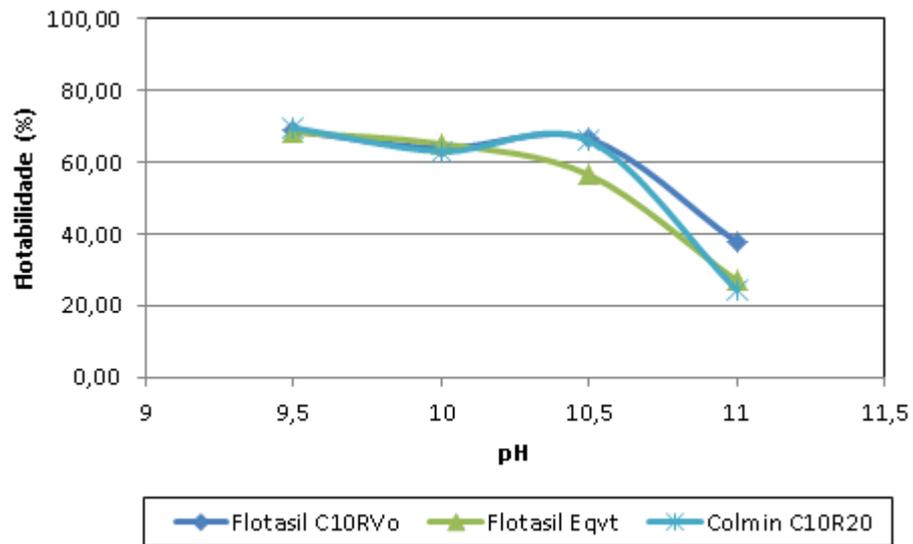
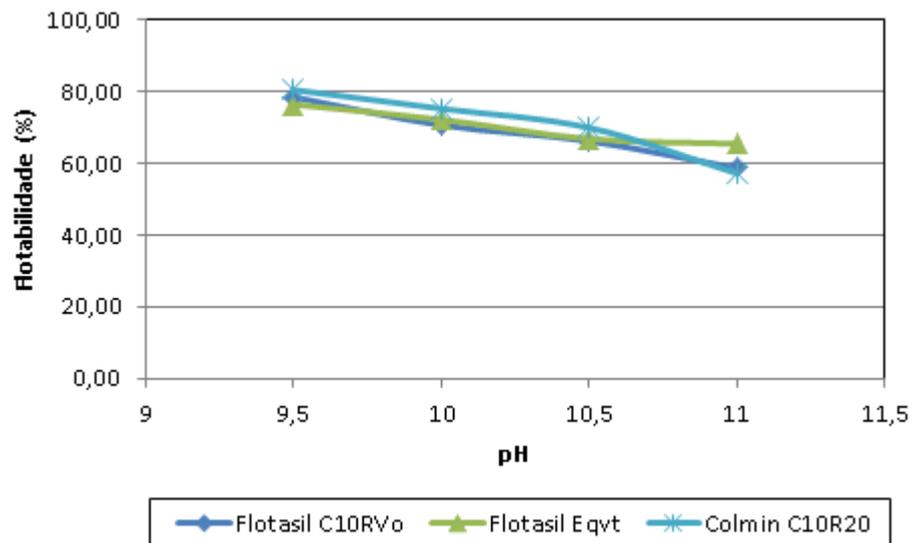


Figura 8– Flotabilidade do quartzo em função do pH para as eteraminas alternativas em relação a eteramina convencional C10R20 (concentração 3 mg/L)



Os resultados das Figuras 6,7 e 8 mostraram comportamentos semelhantes entre as eteraminas alternativas Flotasil C10RVo, Flotasil Eqvt comparados a eteramina regular Colmin C10R20 em função das diferentes variáveis testadas.

### 5.2.3 Avaliação do coletor alternativo não eteramina

Os gráficos das Figuras 9, 10 e 11 apresentam os resultados dos testes realizados com o coletor Flotasil PCD-CL em relação aos dados anteriormente discutidos. Diferentemente do que aconteceu com a eteraminas Flotasil C10RVo, Flotasil Eqvt e Colmin C10R20 pode-se observar que em concentrações maiores o Flotasil PCD-CL apresentou uma diminuição da flotabilidade do quartzo. Uma hipótese para a explicação desse fenômeno pode ser a formação de hemimicelas. A hemimicela expõe a parte polar da molécula do coletor devolvendo a hidroflicidade à superfície, impedindo a flotação.

Figura 9– Flotabilidade do quartzo em função da concentração para o coletor não eteramina PCD-CL em relação às eteraminas alternativas e a convencional C10R20 (pH 10,0)

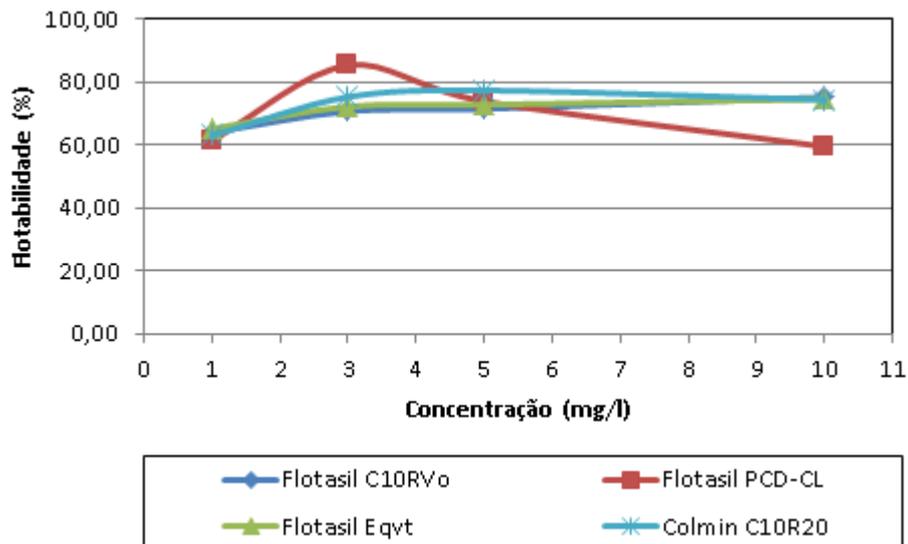


Figura 10– Flotabilidade do quartzo em função do pH para o coletor não eteramina PCD-CL em relação às eteraminas alternativas e a convencional C10R20 (concentração 1 mg/l).

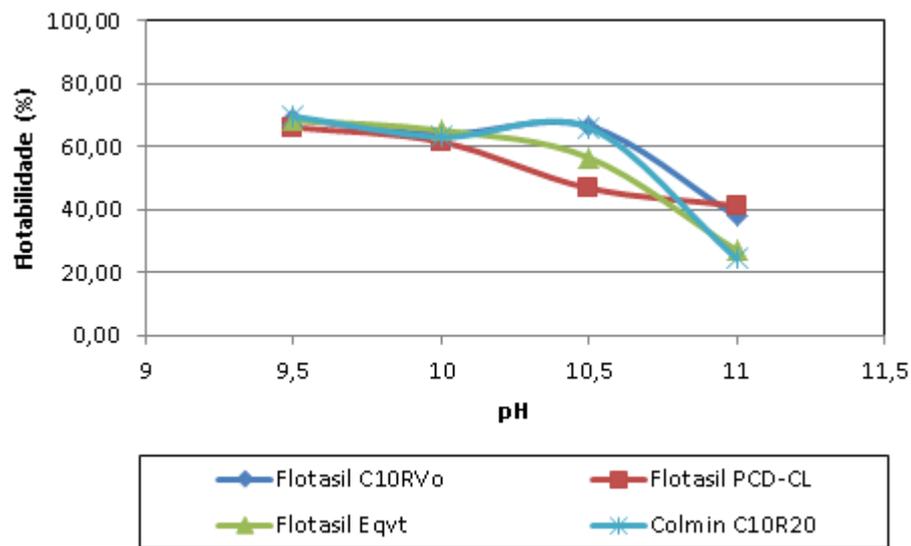
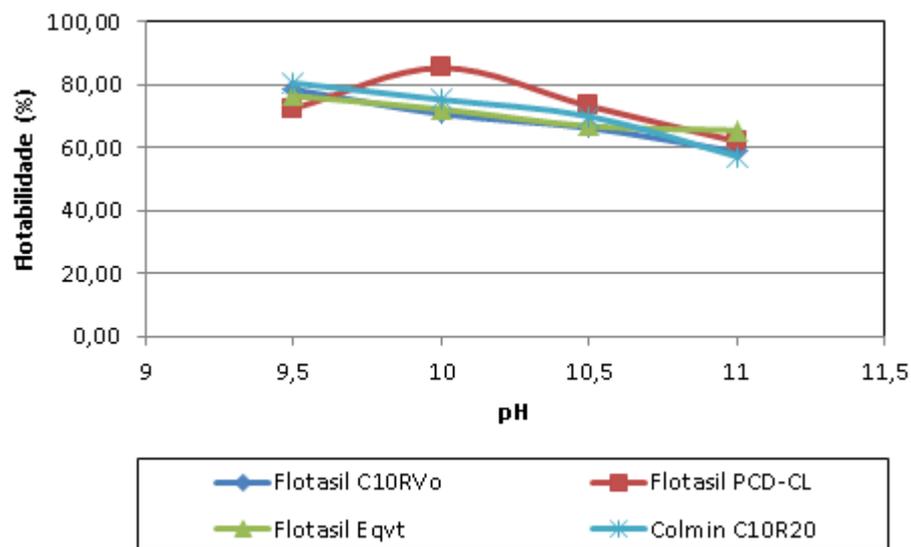


Figura 11– Flotabilidade do quartzo em função do pH para o coletor não eteramina PCD-CL em relação às eteraminas alternativas e a convencional C10R20 (concentração 3 mg/l)



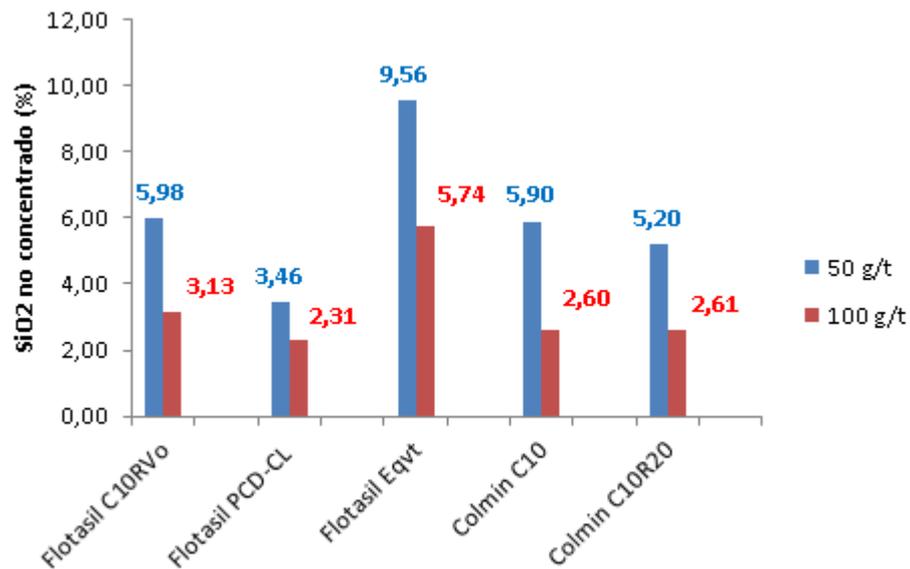
O coletor alternativo não eteramina Flotasil PCD-CL apresentou melhor resultado de flotabilidade do quartzo, comparado à eteramina regular Colmin C10R20 e aos coletores alternativos dessa mesma classe, na concentração de 3 mg/L e no pH 10,0 (Figura 11) diferentemente do que foi observado na concentração de 1 mg/L (Figura 10). Isso se deve ao fato de que a flotabilidade do quartzo é crescente com o aumento da concentração utilizada.

### 5.3 Testes de flotação em bancada

Neste item será discutido os resultados dos testes de flotação em bancada com o objetivo de verificar qual o melhor coletor para a flotação da ganga dentre aqueles estudados.

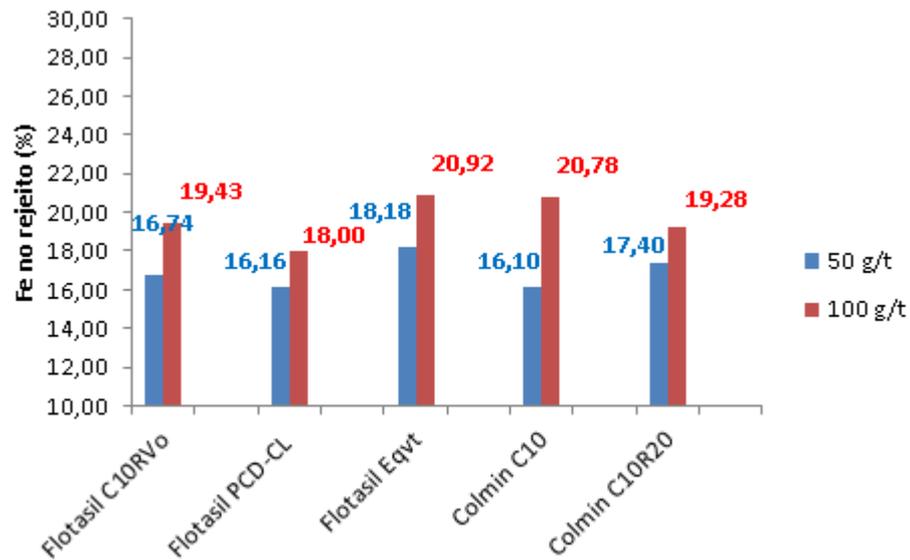
A Figura 12 apresenta o teor de sílica para os coletores Flotasil C10RVo, Flotasil PCD-CL, Flotasil Eqvt, Colmin C10, Colmin C10R20. Esse parâmetro apesar de se tratar de um contaminante, configura-se como principal indicador de qualidade do concentrado. Os resultados demonstram que os menores teores ( $\%SiO_2 = 2,31\%$ ) foram obtidos para a amostra do coletor alternativo não-eteramina Flotasil PCD-CL, na dosagem de 100g/t.

Figura 12– Resultados de  $\%SiO_2$  no concentrado nos testes de flotação em bancada.



Outro parâmetro de igual importância para a performance da flotação é o teor de ferro no rejeito cujos menores valores representam melhor desempenho para o processo. No gráfico da Figura 13 podemos observar que o melhor resultado também foi obtido com o coletor Flotasil PCD-CL.

Figura 13– Resultados de %Fe no rejeito nos testes de flotação em bancada.



Em termos de recuperação em peso (Figura 14) e recuperação metálica (Figura 15), os melhores resultados foram obtidos com a eteramina Flotasil Eqvt e Colmin C10, respectivamente para a dosagem de 50g/t. Já para a dosagem de 100g/t o coletor Flotasil Eqvt mostrou-se mais eficiente para a recuperação em peso, enquanto que para a recuperação metálica o Flotasil PCD-CL mostrou-se mais eficiente.

Figura 14– Resultados de recuperação em peso nos testes de flotação em bancada.

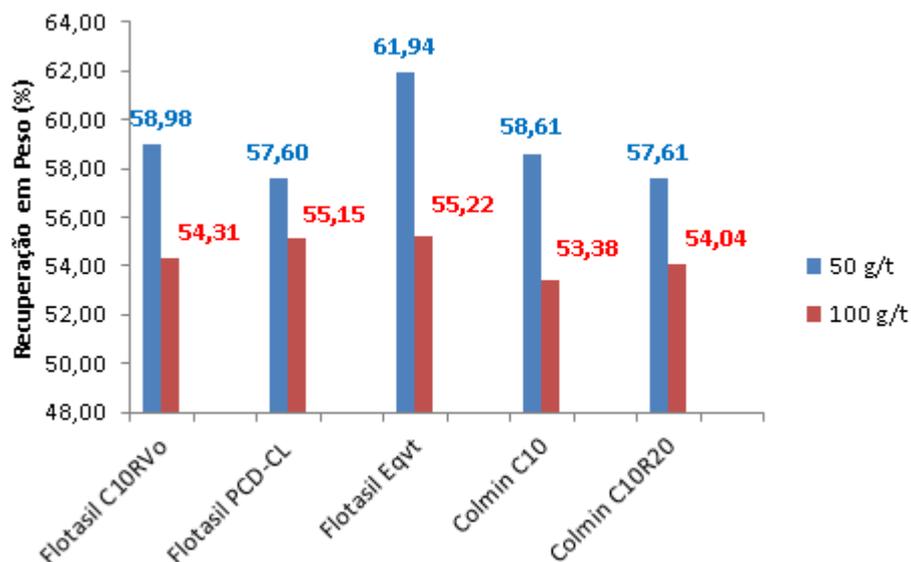
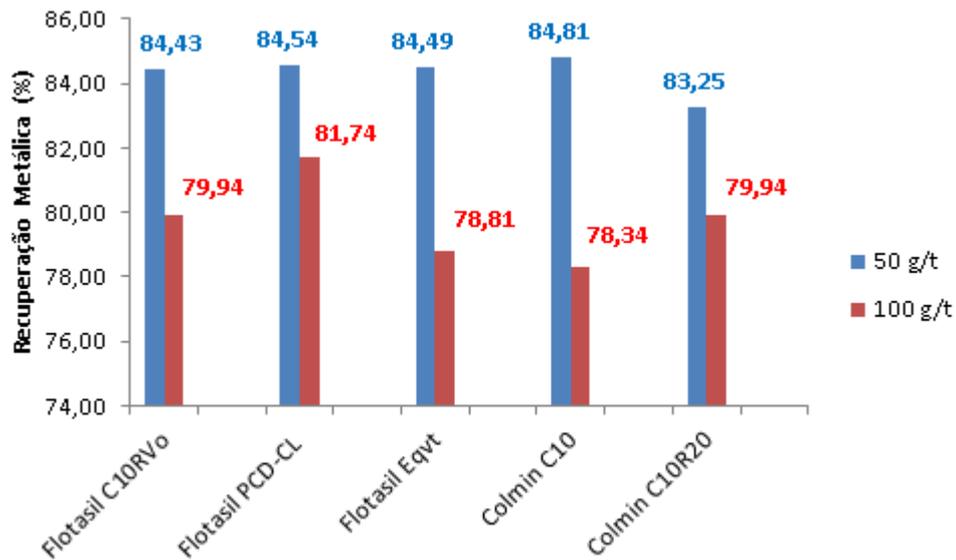


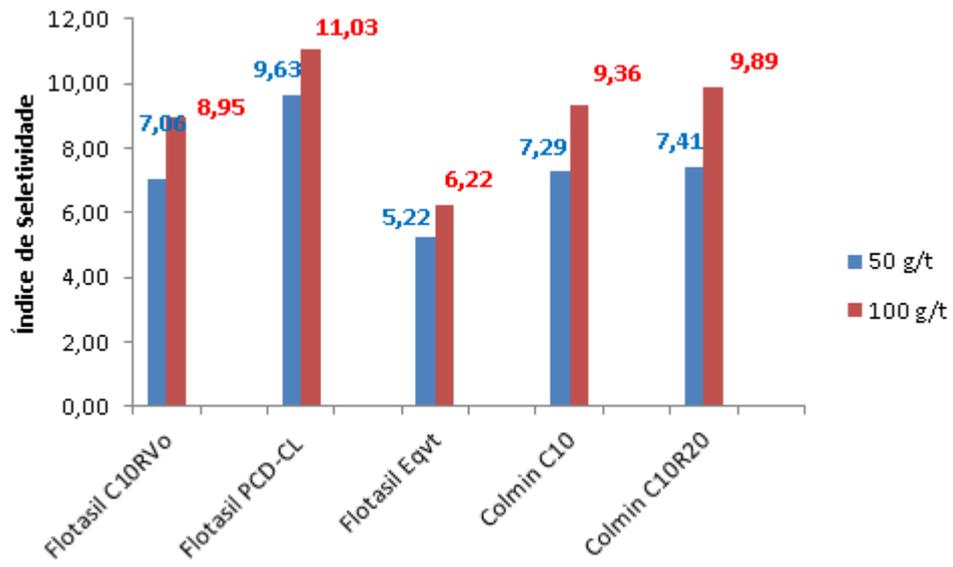
Figura 15– Resultados de recuperação metálica nos testes de flotação em bancada.



Nos gráficos das figuras 12, 13, 14 e 15 podemos observar que o aumento da dosagem de coletor foi benéfico para a qualidade do concentrado (%SiO<sub>2</sub>) mas reduziu os parâmetros relacionados a recuperação (%Fe no rejeito, RP e RM).

O índice de seletividade de Gaudin (IS) é o parâmetro que concilia em apenas um indicador os dados de qualidade e recuperação deixando a análise mais objetiva. Esses resultados estão apresentados na Figura 16, onde é possível observar que o coletor Flotasil PCD-CL na dosagem de 100g/t apresentou o melhor desempenho entre os cinco surfactantes testados. Esse coletor já havia apresentado os melhores resultados de flotabilidade do quartzo nos testes de microflotação discutidos na seção 5.2.3.

Figura 16– Resultados dos índices de seletividade nos testes de flotação em bancada.



## 6. CONCLUSÕES

As eteraminas convencionais Colmin C10 e Colmin C10R20 apresentaram resultados similares de flotabilidade de quartzo nos testes de microflotação com variação de concentração e de pH.

Analogamente, as eteraminas alternativas Flotasil C10RVo e Flotasil Eqtv também apresentaram resultados equivalentes de flotabilidade de quartzo quando comparadas à eteramina convencionais Colmin C10R20.

O coletor alternativo não-eteramina Flotasil PCD-CL apresentou os melhores resultados de flotabilidade de quartzo na concentração de 3 mg/L e no pH 10,0. A flotabilidade de quartzo para este coletor foi decrescente com o aumento da concentração na faixa de concentração de 3 a 10 diferentemente do que ocorreu com as eteraminas convencionais e alternativas.

Em relação aos testes de flotação em bancada o coletor Flotasil PCD-CL apresentou os melhores resultados de teor de %SiO<sub>2</sub> no concentrado comparados às demais eteraminas, para ambas as dosagens testadas.

Em termos de teor de ferro no rejeito a Flotasil PCD-CL apresentou o menor resultado na dosagem de 100g/t e resultado equivalente a Colmin C10 na dosagem de 50g/t.

O melhor resultado de recuperação em peso foi obtido com a eteramina alternativa Flotasil Eqvt tanto para a dosagem de 50g/t quanto para a dosagem de 100g/t. Em termos de recuperação metálica, todas as eteraminas testadas, exceto a Colmin C10R20 apresentaram resultados acima de 84,4%. No entanto, somente a Flotasil PCD-CL obteve valor superior a 81,5% para a dosagem de 100g/t.

De maneira geral, a Flotasil PCD-CL apresentou o melhor desempenho entre os coletores avaliados por apresentar os melhores resultados de índice de seletividade nos ensaios de flotação em bancada.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. A. C.; **Clatratos na flotação catiônica reversa de minério de ferro.** [Dissertação de Mestrado], Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014.

APLAN, F. F., FUERSTENAU, D. W. (1962) **Principles of Nonmetallic Mineral Flotation.** In: FUERSTENAU, D. W. Froth Flotation - 50th Anniversary Volume. New York: AIME, c.7, p.170-214.

ARAUJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A. E. C.; **Reagents in iron ores flotation.** In: **Minerals Engineering**, v. 8, p. 219-224, 2004.

BALTAR, C. A. M.; **Flotação no Tratamento de Minérios.** 2. ed. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2010. 238 p.

BULATOVIC, S. M.; **Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and practice.** V.1, 1 ed. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books; 2007.

CASSOLA, M. S.; SILVA, W. C.; BARTALINI, N. M.; **Development and applications on collector's at the iron ore flotation.** In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, organização. Proceedings do XXIV ENTMME; 2011; Salvador, Brasil.

FERNANDES, P. A., PERES, A. E. C.; **Efeito do tipo de éter amina na hidrofobicidade do quartzo no processo de flotação catiônica reversa de minério de ferro.** In: Anais do XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belém, PA, 2017.

GAUDIN, A.M.; **Principles of mineral dressing.** New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1939.

IWASAKI, I. (1983) **Iron ore flotation, theory and practice.** Mining Engineering, p.622-631.

LEJA, J. (1982) Surface Chemistry of Froth Flotation. New York: Plenum Press. 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, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2001.

LIMA, R. M. F.; **Adsorção de amido e de amina na superfície da hematita e do quartzo e sua influência na flotação**. [Tese de Doutorado]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; MG, 1997.

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, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2001.

MATOS, V. E., PERES, A. E. C., BRANDÃO, P. R. G.; **Estado de agregação e dispersão de um minério de ferro na presença de diferentes tipos de amidos**. In: Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas, MG, 2015.

MATOS, V. E.; **Seletividade de reagentes na flotação reversa de minério de ferro**. [Dissertação de Mestrado], Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

NEDER, E. E.; **O uso das aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios brasileiros**. [Dissertação de Mestrado], Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo, SP, 2005.

QUARESMA, L. F. (2001). **Balanço Mineral Brasileiro 2001** - Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM, Brasília.

PEARSE, M. J.; **An overview of the use of chemical reagents in mineral processing**. Minerals Engineering, vol.18, p.139-149, 2005.

PERES, A. E. C., COELHO, E. M., ARAUJO, A. C.; **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; 1980.

PERES, A. E. C. & ARAUJO, A. C.; **A flotação como operação unitária no tratamento de minérios**. In: CHAVES, A. P. (Ed.) Teoria e Prática do Tratamento de Minérios volume 4, 2ª edição: A Flotação no Brasil. Signus Editora, São Paulo, p. 1 -29, 2009.

PERES, A. E. C. & SALUM, M. J. G. (2004) **Métodos de concentração**. In: Apostila de Tratamento de Minérios. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, p.109-149.

PERES, A. E. C., ARAUJO, A. C., **A flotação como operação unitária no tratamento de minérios**. In: CHAVES, A.P. Flotação o estado da arte no Brasil. vol.4. São Paulo, cap. 1, p. 1-29, 2006.

PERES, A. E. C.; SALUM, M.G.Z.; VALADÃO, G.E.S.; **Métodos de concentração**. In: VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. (Org); Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 234 p., 2012.

RABELO, P. J. B.; **Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG**. [Dissertação de Mestrado], Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1994.

REIS, J. M.; **Avaliação da flotação de minério de ferro de Brucutu considerando a divisão em dois circuitos: grossos e finos**. [Dissertação de Mestrado], Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2015.

SALES, C. G.; **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu**. [Dis-

sertação de mestrado], Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011.

SANTANA, P. P.; **Flotação direta de minério de ferro itabirítico**. [Dissertação de mestrado], Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.

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, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2004.

VIEIRA, A. M.; PERES, A. E. C. **The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz**. In: Minerals Engineering, Elsevier Science Publishers n.20. p.1008-1013, 2007.