



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



LETÍCIA STÉFFANE SANTOS SILVA

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MICROFLOTAÇÃO: TUBO DE HALLIMOND E
CÉLULA DE FUERSTENAU

OURO PRETO

2018

LETÍCIA STÉFFANE SANTOS SILVA

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MICROFLOTAÇÃO: TUBO DE HALLIMOND E
CÉLULA DE FUERSTENAU

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: José Aurélio Medeiros da Luz

Coorientador: Felipe de Orquiza Milhomem

OURO PRETO

2018

S586c Silva, Letícia Stéffane Santos.
Comparação de técnicas de microflotação [manuscrito]: tubo de Hallimond e célula de Fuerstenau / Letícia Stéffane Santos Silva. - 2018.

60f.: il.: color; grafs.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz.
Coorientador: Prof. MSc. Felipe de Orquiza Milhomem.

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

1. Beneficiamento de minério. 2. Flotação. 3. Indústria mineral. I. Luz, José Aurélio Medeiros da . II. Milhomem, Felipe de Orquiza . III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 622.765

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



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 18 dias do mês de dezembro de 2018, às 15h30min, 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 “*COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MICROFLOTAÇÃO: TUBO DE HALLIMOND E CÉLULA DE FUERSTENAU*”, pela aluna **Leticia Stéffane Santos Silva**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz (Orientador)**, **M.Sc. Felipe de Orquiza Milhomem (Co-orientador)** e **Eng^o de Minas Pedro Henrique Neuppmann**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela aprovação 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, 18 de dezembro de 2018.

J. A. Medeiros da Luz

Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

Felipe de Orquiza Milhomem

M.Sc. Felipe de Orquiza Milhomem
Membro da Comissão Avaliadora (Co-orientador)

Pedro Henrique Neuppmann

Eng^o de Minas Pedro Henrique Neuppmann
Membro da Comissão Avaliadora

Leticia Stéffane Santos Silva

Leticia Stéffane Santos Silva

José Fernando Miranda

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

Dedico esse trabalho a Deus e meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ser meu guia e fortaleza;

Aos meus pais pela torcida, suporte e pelos incentivos de força e determinação;

Às minhas irmãs por serem compreensivas, pacientes e amigas;

Aos meus orientadores, José Aurélio e Felipe Milhomem, por toda atenção e por serem sempre solícitos no desenvolvimento deste trabalho;

Aos amigos do Laboratório de Flotação pelo companheirismo e ensinamentos;

Aos amigos do curso e de Ouro Preto por tornarem essa caminhada ainda mais prazerosa.

A emoção mais bela que podemos experimentar é o sentimento do mistério. É a emoção fundamental que está no berço de toda a verdadeira arte e ciência. Aquele que desconhece essa emoção, aquele que não consegue mais se maravilhar, ficar arrebatado pela admiração, é como se estivesse morto, é uma vela que foi apagada (EINSTEIN, 1930).

RESUMO

A crescente aplicação da flotação na indústria mineral é impulsionada por meio de campanhas de pesquisa em escalas menores: microflotação, célula de bancada e planta piloto, pois possibilitam estudos viáveis em questão de recursos materiais e de pessoas. Nesse sentido, o trabalho visou estudar duas técnicas de microflotação: Tubo de Hallimond e Célula de Fuerstenau por meio de uma comparação experimental dos métodos. Para isso, foram efetuados ensaios de microflotação (em nove repetições) com os minerais de hematita e quartzo em composições puras e mistas, utilizando rota direta com oleato de sódio como coletor (10 mg/L) e pH natural. Além disso, para os ensaios na Célula de Fuerstenau foi utilizado o espumante metil-isobutilcarbinol (mibcol) a 50 mg/L. Como resultados, verificou-se que ambos os dispositivos apresentaram boa reprodutibilidade, com destaque para o Tubo de Hallimond com desvios padrão amostral menores. A célula de Fuerstenau apresentou maior arraste hidrodinâmico. Frações maiores de quartzo proporcionaram coeficientes de variação maiores. Ambos os dispositivos exibiram um bom desempenho na flotação de misturas de minerais. Em adição, a Célula de Fuerstenau possui características física e operacional mais semelhantes às células de bancada convencional e o Tubo de Hallimond às colunas de flotação.

Palavras-chave: Microflotação. Hallimond. Fuerstenau.

ABSTRACT

The growing application of flotation in the mineral industry is driven by research campaigns on smaller scales: microflotation, bench cell and pilot plant, as they enable viable studies in material and people resources. In this sense, the work aimed to study two techniques of microflotation: Hallimond tube and Fuerstenau cell by means of an experimental comparison of the methods. For this, microflotation (in nine replications) with hematite and quartz minerals in pure and mixed compositions were performed using a direct route with sodium oleate as collector (10 mg/L) and natural pH. Also, in the Fuerstenau cell tests the methyl isobutyl carbinol (mibcol) was used as foam at 50 mg/L. As results, it was verified that both devices presented good reproducibility, with emphasis on the Hallimond tube with smaller sample standard deviations. The Fuerstenau cell presented a higher entrainment. Larger quartz fractions provided higher coefficients of variation. Both devices exhibited good flotation performance of mineral mixtures. In addition, the Fuerstenau Cell has physical and operational characteristics more similar to conventional bench cells and the Hallimond Tube to the columns flotation.

Keywords: Microflotation. Hallimond. Fuerstenau.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina de flotação (Wemco)	15
Figura 2 - Célula pneumática (Imhoflot)	15
Figura 3 - Coluna de flotação	16
Figura 4 - Tubo de Hallimond modificado	20
Figura 5 - Célula de Fuerstenau	21
Figura 6 - Ensaio Célula de Fuerstenau	22
Figura 7 - Arraste de partículas de quartzo em função de diferentes parâmetros	24
Figura 8 - Relação entre arraste de sílica e transbordo de água e uma planta piloto	25
Figura 9 - Moinho de bolas	26
Figura 10 - Peneirador suspenso	27
Figura 11 - Separador magnético de bobina	27
Figura 12 - Flotação direta de hematita e quartzo com oleato de sódio em diferentes pH	30
Figura 13 - Esquema em perspectiva e dimensional da célula de Fuerstenau	32
Figura 14 - Flotação de hematita em Célula de Fuerstenau	32
Figura 15 - Sistema Célula de Fuerstenau	35
Figura 16 - Torneira de reposição de água/espumante na Célula de Fuerstenau	35
Figura 17 - Amostras de quartzo e hematita purificadas	40
Figura 18 - Amostras de quartzo e hematita em microscópio	42
Figura 19 - Amostras de quartzo e hematita em microscópio (cada divisão equivale a 0,1 mm)	42
Figura 20 - Escala de Krumbein para esfericidade e grau de arredondamento	43
Figura 21 - Quartzo em solução de água com 2 gotas de metil-isobutilcarbinol (mibcol)	44
Figura 22 - Diagrama de pontos de flotabilidade	45
Figura 23 - Boxplot de flotabilidade	46
Figura 24 - Diagrama de pontos de flotabilidade após a retirada dos outliers	47
Figura 25 - Gráfico de valores individuais de flotabilidade para cada seção	48
Figura 26 – Médias, desvios padrão e coeficientes de variação das seções	49
Figura 27 - Coeficiente de variação	50
Figura 28 - Amostra mista flotada em Célula de Fuerstenau	51
Figura 29 - Porções mistas 0,7H0,3Q e 0,3H0,7Q flotado e afundado –Célula de Fuerstenau	51
Figura 30 - Porções mistas 0,7H0,3Q e 0,3H0,7Q flotado e afundado – Tubo de Hallimond.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de microflotação.....	18
Tabela 2 - Ensaio de microflotação em Célula de Fuerstenau com cassiterita	23
Tabela 3 - Parâmetros e condições analisadas nos testes de microflotação	24
Tabela 4 - Ensaio de microflotação.....	29
Tabela 5 – Massas específicas das amostras purificadas.....	41
Tabela 6 – Resultados arraste hidrodinâmico.....	41
Tabela 7 - Resultados testes de microflotação.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVO GERAL	12
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 FLOTAÇÃO NA INDÚSTRIA MINERAL	13
3.2 MECANISMOS DE FLOTAÇÃO	13
3.2.1 Máquinas industriais	14
3.2.2 Microflotação	16
3.3 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE MICROFLOTAÇÃO	17
3.3.1 Tubo de Hallimond	19
3.3.2 Célula de Fuerstenau	21
3.3.3 Arraste hidrodinâmico	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	26
4.2 CARACTERIZAÇÃO	28
4.3 ENSAIOS DE MICROFLOTAÇÃO	29
4.3.1 Reagentes utilizados	33
4.3.2 Ensaios de microflotação em Tubo de Hallimond	34
4.3.3 Ensaios de microflotação em Célula de Fuerstenau	34
4.3.4 Análise dos resultados	36
4.3.4.1 Amostras mistas	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 BREVE AVALIAÇÃO TEÓRICA	40
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	40
5.3 ARRASTE HIDRODINÂMICO	41
5.4 ENSAIOS DE MICROFLOTAÇÃO	44

5.4.1 Análise dos resultados das amostras mistas	50
6 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS	54
ADENDO A – Ensaio de flotação Tubo de Hallimond	57
ADENDO B – Ensaio de flotação Célula de Fuerstenau	59

1 INTRODUÇÃO

A aplicação da flotação como método de concentração no beneficiamento mineral começou no início do século XX, diante da busca pelo aproveitamento de depósitos complexos e de baixo teor. Desde então, a técnica tem proporcionado maiores recuperações mássica e metalúrgica e até mesmo viabilizado a lavra de depósitos disseminados e com baixos teores.

Um dos diferenciais da flotação é a capacidade de modificação do grau de hidrofobicidade, através da adição de reagentes ao sistema. Nesse contexto, a fim de economizar matéria prima e mão de obra, a pesquisa das condições ideais do ambiente de flotação são realizadas por meio de campanhas em menor escala em relação à escala industrial. Esses métodos podem ser classificados, segundo Chudacek *et al.* (1992) em ordem crescente, em três categorias: tubos de ensaio, células de bancada (e pequenas plantas piloto – sistemas contínuos) e grandes plantas piloto.

Nesse âmbito, há diversos métodos de microflotação que podem gerar resultados quantitativos e qualitativos. À vista disso, selecionou-se duas técnicas para estudo aprofundado: o Tubo de Hallimond e a Célula de Fuerstenau.

Dessa forma, objetivou-se por meio desse trabalho, verificar a reprodutibilidade dos dois métodos. Esse estudo foi feito através da realização de ensaios em ambos os instrumentos envolvendo amostras puras e mistas seguida por análise estatística dos resultados.

2 OBJETIVO GERAL

Comparação experimental entre duas técnicas de microflotação: Tubo de Hallimond e Célula de Fuerstenau.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- a) preparação das amostras de acordo com os parâmetros ideais dos ensaios de microflotação (granulometria e grau de pureza);
- b) realização de ensaios experimentais com utilização de minerais de hematita e quartzo nas composições pura e mista (frações por peso),
 - 100 % hematita;
 - 100 % quartzo;
 - 70 % hematita e 30 % quartzo;
 - 30 % hematita e 70 % quartzo;
 - análise da densidade dos produtos dos ensaios com amostras mistas a fim de verificar o teor final das porções flotadas e afundadas;
- c) análise estatística dos resultados experimentais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FLOTAÇÃO NA INDÚSTRIA MINERAL

A flotação passou a ter aplicação na indústria mineral por volta de 1900. Desde então, tem proporcionado a concentração de minérios em larga escala e viabilizado a lavra de depósitos complexos e de baixo teor.

De acordo com Peres e Araújo (2006), entre as principais usinas de flotação no Brasil, a maior parte delas são para beneficiamento de minério de ferro e fosfato. Segundo os autores, outros minérios também concentrados pela flotação: grafita, magnesita, talco, sulfetos de cobre, sulfetos de chumbo e zinco, oxidados de zinco, níquel, ouro, nióbio, fluorita, carvão, feldspato, silvita e prata de resíduo hidrometalúrgico.

3.2 MECANISMOS DE FLOTAÇÃO

Para a concentração de um mineral, são necessárias três condições essenciais: liberabilidade, separabilidade dinâmica e diferenciabilidade (SILVA, 1973).

Nesse contexto, a liberabilidade está relacionada ao grau de liberação das partículas minerais que é promovido por etapas anteriores ao estágio de concentração como britagem e moagem. Na flotação, a diferenciabilidade que permite a separação dos minerais é o grau de hidrofobicidade (propriedade que pode ser natural ou induzida por reagentes). Dessa forma, se uma partícula é hidrofóbica, ela tem aversão à água e, do contrário, é hidrofílica. Em um contexto de polaridade, isso ocorre porque partículas polares se atraem, assim como partículas apolares. Nesse âmbito, uma partícula é polar quando apresenta um dipolo permanente.

À vista disso, de uma maneira simplificada, o processo de flotação ocorre em três etapas: colisão, adesão e transporte (BALTAR, 2010). Inicialmente, os minerais são colocados em suspensão a fim de facilitar a colisão partícula-bolha. Em sequência, com a difusão de ar no meio, as partículas hidrofóbicas, ao se colidirem com as bolhas, se aderem a elas e são transportadas em sentido ascendente até o transbordamento ou remoção mecânica do concentrado na parte superior do equipamento, esses mecanismos são promovidos pela separabilidade dinâmica.

Nesse sentido, conforme Baltar (2010), a colisão ocorre de acordo com a hidrodinâmica da máquina, a adesão depende do grau de hidrofobicidade do mineral e o transporte está vinculado à estabilidade do agregado bolha-partícula formado no último estágio.

Segundo Yoon e Luttrell (1989 citado por BALTAR, 2010), a probabilidade de colisão (P_c) aumenta com o aumento da turbulência, aumento do tamanho das partículas e a diminuição do tamanho das bolhas. Fatores que, para Baltar (2010), desfavorecem a etapa de transporte, pois uma turbulência excessiva pode provocar a destruição do agregado bolha-partícula.

Por isso, o desenho das células de flotação mecânicas deve apresentar uma região de decrescente turbulência até o topo da célula, de forma que a camada de espuma não seja perturbada ou o agregado partícula-bolha não se desintegre (MAVIS; MAVROS, 1991).

Nesse contexto, de acordo com Baltar (2010), as pesquisas têm se concentrado ao aperfeiçoamento da etapa de adesão através do estudo de reagentes e modificadores. Contudo, a otimização da flotação também exige atenção para a colisão e transporte.

3.2.1 Máquinas industriais

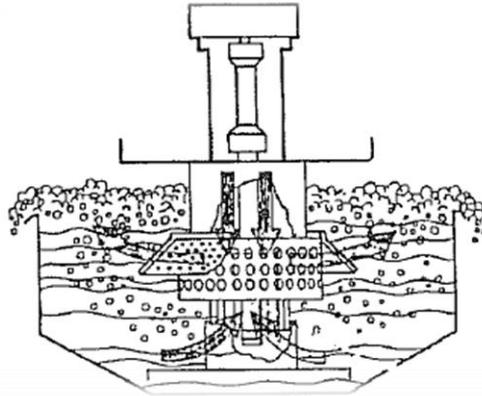
A separabilidade dinâmica, como uma das condições essenciais para a concentração de um mineral, está relacionada ao equipamento utilizado. No caso da flotação, as máquinas são responsáveis por colocar as partículas em suspensão e distribuir o ar na polpa para que ocorra a colisão e adesão partícula-bolha (PERES; ARAÚJO, 2006).

Nesse contexto, para melhor entendimento do tipo de contato partícula-bolha das máquinas industriais citados na próxima seção, será apresentada uma breve revisão do funcionamento das células industriais. Diante disso, a literatura divide as máquinas de flotação industrial em três categorias: células mecânicas, células pneumáticas e colunas de flotação.

Em síntese, de acordo com Chaves (2006), as células mecânicas (figura 1) são formadas por um rotor/estator localizado no fundo da célula e suspenso por uma haste. Dessa forma, a agitação é realizada pelo rotor, que, ao girar, coloca as partículas em suspensão e gera alta turbulência. Esse movimento cria uma pressão negativa e, conseqüentemente, um movimento ascendente do ar. Ainda, em alguns casos, opta-se pela injeção de ar comprimido para melhor

controle desse parâmetro. Ademais, externo ao rotor, encontra-se o estator que é responsável por quebrar as bolhas em bolhas menores.

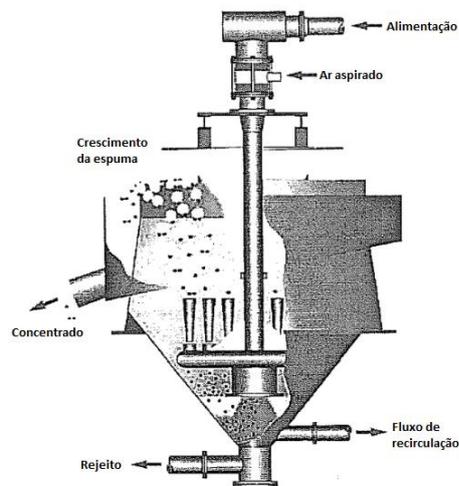
Figura 1 - Máquina de flotação (Wemco)



Fonte: CHAVES, 2006.

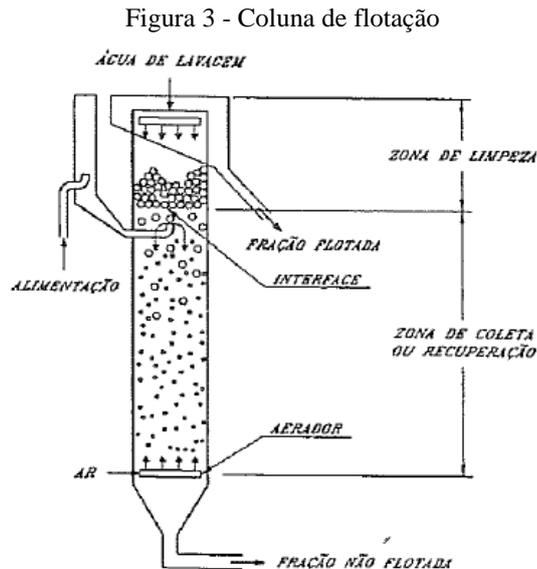
Nas células pneumáticas (figura 2) não há agitação mecânica e a turbulência na célula é menor. Nesse caso, a agitação ocorre pela inserção de ar através de um indutor, geralmente ao fundo da célula. Além disso, há um dispositivo na forma cônica que, pode se movimentar na direção vertical, e, dessa forma, altera o nível alcançado pela espuma. Esse equipamento permite a flotação de minerais de partículas de ampla granulação, minerais de densidade mais alta e minerais friáveis (CHAVES, 2006).

Figura 2 - Célula pneumática (Imhoflot)



Fonte: traduzido de CHAVES, 2006.

Nas colunas de flotação (figura 3) não ocorre agitação mecânica assim como nas células pneumáticas. Nesse equipamento, a alimentação é introduzida através do terço superior da coluna e o ar é injetado na parte inferior do cilindro. Por consequência, a medida que as partículas se encontram com o ar, os minerais hidrofóbicos se aderem às bolhas e ascendem até a superfície (CHAVES, 2006).



Fonte: CHAVES, 2006

3.2.2 Microflotação

Desde a utilização da flotação na indústria mineral, afim de prever as melhores condições para um bom desempenho de grandes instalações, têm sido utilizados métodos de pesquisa em escalas menores. Dessa forma, segundo Chudacek *et al.* (1992), as campanhas experimentais são realizadas escala crescentes que podem se dividir em três grupos: métodos de tubo de ensaio (microflotação), células de bancada (e pequenas plantas piloto – sistemas contínuos) e grandes plantas piloto.

Nesse contexto, a microflotação possui como funções principais o entendimento dos mecanismos de interação entre os reagentes e as superfícies minerais e o levantamento das melhores condições físico-químicas do sistema (LUZ, 1996).

Para Luz (1996), as principais vantagens dessa categoria são: utilizam pequenas porções de amostra, equipamentos delicados, ensaios bem controlados, rápidos e reprodutíveis, fatores que

permitem a triagem das melhores condições do sistema de forma econômica. Todavia, ressalta que a correlação para a flotação convencional de bancada deve ser realizada com cautela, já que se trata de um sistema simplificado e com condições especiais (minerais isolados, água destilada e reagentes purificados).

Nesse contexto, conforme Chudacek *et al.* (1992), para que um ensaio de microflotação tenha êxito, o método escolhido deve apresentar um ambiente que proporcione a colisão e adesão partícula-bolha em condições análogas às industriais, ou seja, deve ter semelhança física, química e hidrodinâmica entre o ambiente do ensaio e o real. Porém, essa última nem sempre é levada em consideração. Segundo o autor, para que isso seja possível, seria necessário fazer uma avaliação do contato partícula-bolha que ocorre na flotação industrial.

Dessa forma, Chudacek *et al.* (1992) fazem uma revisão das máquinas industriais de acordo com a intensidade de agitação que ocorre no momento da colisão partícula-bolha e as classifica em dois grupos:

a) Máquinas em que o contato partícula-bolha ocorre principalmente pela *High acceleration/deceleration collision (HAC)*. Ao grupo pertencem, por exemplo, todas as células de rotor/estator (mecânicas), a célula pneumática de fluxo cruzado e o *air sparged hydrocyclone*.

b) Equipamentos em que o contato partícula-bolha ocorre principalmente pela *Cruising bubble collisions (CBC)* na aceleração da gravidade. Estão inclusos, por exemplo, todas as células pneumáticas com baixa intensidade de agitação e sistemas de flotação de vácuo e coluna.

3.3 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE MICROFLOTAÇÃO

Araújo *et al.* (2005) e Chudacek *et al.* (1992) caracterizam as principais técnicas de microflotação criadas desde que a flotação passou a ser aplicada no beneficiamento de minérios. Entre elas estão dispositivos de análises qualitativas e quantitativas. Nesse contexto, a tabela 1 exhibe os métodos apresentados por Araújo *et al.* (2005) e suas respectivas descrições.

Tabela 1 - Técnicas de microflotação

Técnica	Descrição Sucinta
Tubo de ensaio modificado	Precursor de outras metodologias de microflotação, presente na literatura desde 1916, (Fuerstenau, 1999), (Leja e Poling, 1968).
<i>Bubble pick-up</i>	Usava tubo de vidro com entrada controlada de bolhas individuais de ar, (Cooke e Digre, 1949).
Flotação a vácuo	Cilindro de vidro com precipitação de ar facilitada por vácuo, (Schuhmann e Prakash, 1950).
Minicélula de flotação (50 g)	Usada para minerais puros e posteriormente para misturas de minerais. Início com Gaudin e colaboradores a partir da década de 20 do século passado, (Fuerstenau, 1999).
Célula de Smith & Partridge	Célula de vidro com agitador mecânico com haste de vidro permitindo uso para minerais magnéticos, (Partridge e Smith, 1972).
Célula de Fuerstenau “célula de fundo sinterizado”	Célula de vidro de 125 mL introduzida em 1963 com fundo de placa porosa e agitação com barra magnética, (Fuerstenau, 1999).
Célula EMDEE Microflot	Criada por Chudacek com forma de tubo de ensaio que é sacudida via mecanismo pneumático, (Chudacek <i>et. al.</i> , 1992, Silva, 2004).
Tubo de Hallimond (original)	Introduzido em 1944 por Hallimond com o ar sendo introduzido no tubo através de um tubo capilar, (<i>apud.</i> Klassen & Mokrousov, 1963).

Tubo de Hallimond (modificado 1)	Empregado por Ewers em 1952, que modificou as dimensões do Tubo de Hallimond original (<i>apud</i> Sutherland, K.L. and Wark, I.W., 1955).
Tubo de Hallimond (modificado 2)	Fuerstenau usou duas formas de admissão de gás: capilar ou placa porosa de vidro. Agitação com barra magnética. A versão com placa porosa é hoje usada mundialmente, (Fuerstenau <i>et al.</i> 1957).
Tubo de Hallimond (outras modificações)	Em função de algumas limitações do Tubo de Hallimond, outras alterações foram introduzidas para uso em situações específicas como tubo extensor, (Marciano Neto, 1989), (Siwek <i>et al.</i> , 1981).

Fonte: Adaptado de ARAUJO *et al.*, 2005.

Nesse contexto, os objetos de estudo desse trabalho são o Tubo de Hallimond na sua versão mais atual e a Célula de Fuerstenau. Como observação, essa célula foi citada na tabela com agitação por meio de uma barra magnética, porém, nesta pesquisa, assim como em outros revisados na literatura, será utilizado a Célula de Fuerstenau com agitador mecânico.

3.3.1 Tubo de Hallimond

O Tubo de Hallimond modificado, apresentado na figura 4, consiste em um tubo de vidro com suave inclinação. Logo após a curvatura, há um local para sedimentação e coleta da porção flotada. Na posição extremo inferior do dispositivo se localiza um septo poroso onde ocorre a passagem do ar e logo acima é posicionado a barra magnética para agitação magnética. O tubo modificado é dividido em três partes a fim de facilitar a limpeza.

Figura 4 - Tubo de Hallimond modificado



Fonte: elaboração própria.

Esse dispositivo é o método de microflotação mais utilizado atualmente. Como características, ele utiliza amostras de cerca de 1 ou 2 gramas, o método de agitação é por barra magnética e não é empregado espumante já que a estrutura física da célula facilita o fluxo laminar (LUZ, 1996).

Dessa forma, Coelho (1968 *apud* ARAUJO *et al.*, 2005) indica como vantagens, além da reprodutibilidade e as características já citadas como benefícios da microflotação por Luz (1966), que o método apresenta boa correlação dos resultados de flotabilidade com ensaios de bancada e de resultados de plantas industriais.

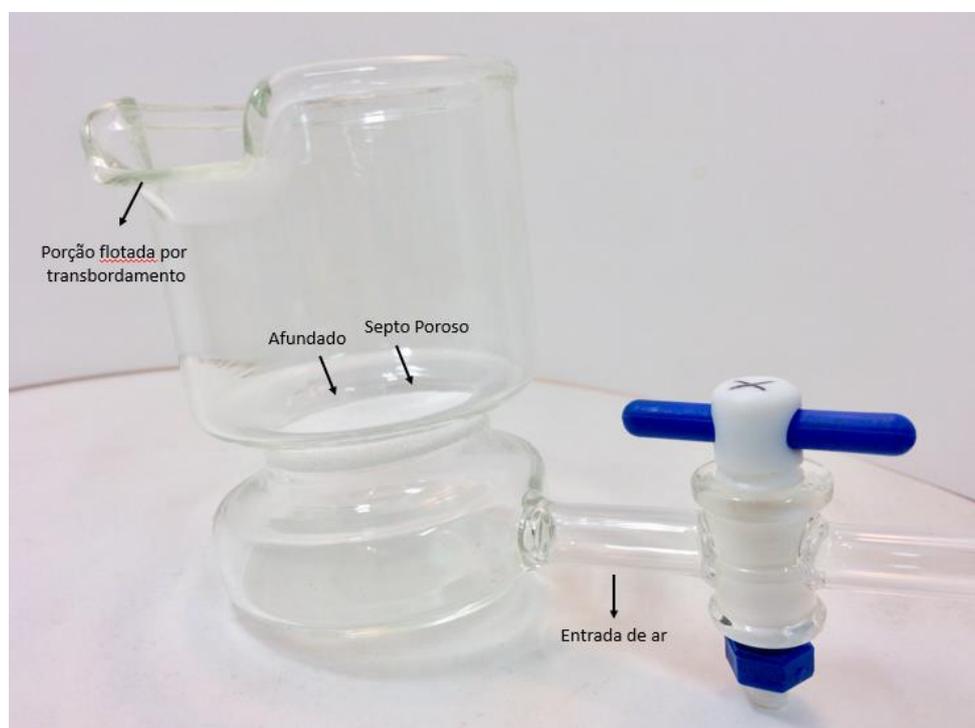
Apesar disso, Chudacek *et al.* (1992) cita algumas deficiências do método: a amplitude do tamanho do grão é restrita, química de flotação incompleta (não é utilizado espumante), o alcance da concentração de sólidos usada é baixa (1-3 % p/p) e o mineral de ganga, na maioria das vezes, não está presente, portanto, o método não gera teor do concentrado em campo. Ainda em relação à proporção de sólidos, Fuerstenau (1964) verificou que para a flotação sob certas condições é necessário 3-5 % de sólidos (por peso).

Em adição, Chudacek *et al.* (1992) mencionam também que a agitação do Tubo de Hallimond ocorre apenas pela movimentação de uma barra magnética (e aceleração da gravidade). Dessa forma, segundo o autor, a colisão partícula-bolha no instrumento ocorre em condições de baixa turbulência, sem a característica de alta intensidade de agitação como em máquinas de flotação de rotor. Portanto, para ele, na melhor das hipóteses, esse método pode somente simular condições em dispositivos de flotação onde a flotação ocorre predominantemente pelo mecanismo *Cruising bubble collisions (CBC)*, como colunas de flotação.

3.3.2 Célula de Fuerstenau

A Célula de Fuerstenau (figura 5) é formada por um recipiente de vidro com um septo poroso na parte extremo inferior do dispositivo para distribuição do gás na polpa mineral. A agitação ocorre por um agitador mecânico.

Figura 5 - Célula de Fuerstenau



Fonte: elaboração própria.

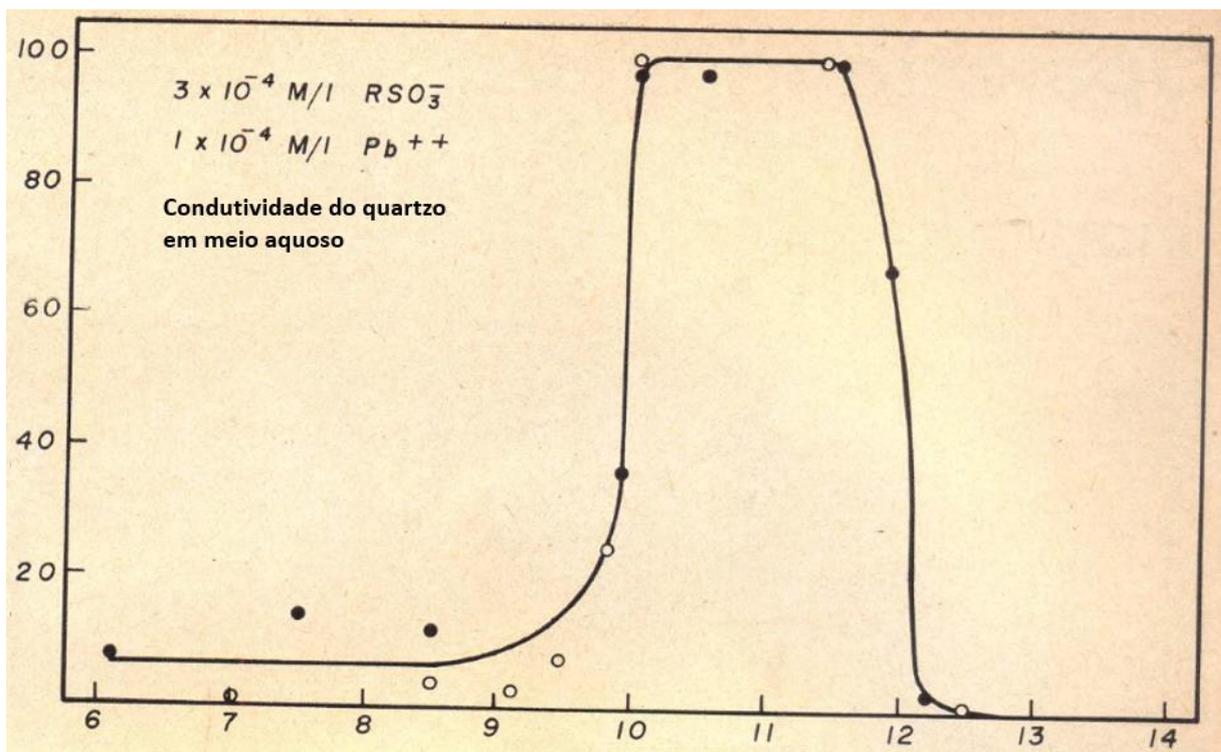
Entre as vantagens da Célula de Fuerstenau, Luz (1996) cita a possibilidade de utilizar uma maior massa amostral em relação ao Tubo de Hallimond, maior semelhança hidrodinâmica com

as células em batelada e a necessidade de adição de espumante, conseqüentemente, melhor correspondência operacional com as células de bancada.

Em seus trabalhos, a Célula de Fuerstenau revelou-se como uma técnica de grande potencial para ensaios prospectórios, resultando em uma boa correlação entre os resultados de microflotação e células de bancada. Nesse sentido, vale ressaltar que os valores de flotabilidade na microflotação devem ser entendidos como qualitativos ou, no máximo, semiquantitativos (LUZ, 1996).

Ensaio feito por Fuerstenau (1964) apresentaram boa reprodutibilidade. Nesse sentido, apesar de não fornecer os dados em valores numéricos para melhor análise, eles podem ser observados graficamente (figura 6).

Figura 6 - Ensaio Célula de Fuerstenau



Fonte: traduzido de FUERSTENAU, 1964.

Pontos e círculos representam experimentos repetidos para determinar a recuperação vs pH com constantes concentrações de chumbo e sulfonato. Note a boa correlação dos resultados.

A reprodutibilidade da Célula de Fuerstenau foi considerada como razoavelmente boa pelo *National Institute for Metallurgy*, Randburg, por meio de Allison e Finkelstein (1974, *apud*

RUIJTER, 1979) ao obterem desvios padrão amostral de 1,8 % para recuperações entre 90 e 100 % e de 11,5 % para recuperações entre 20 e 30 %. Os desvios padrão amostral das demais recuperações ficaram entre 4,2 e 9,8 %.

Com base nesses resultados, Ruijter (1979) concluiu que a reprodutibilidade de seus ensaios na célula foi muito boa, já que, por meio de ensaios com cassiterita em diferentes granulometrias, os maiores desvios padrão amostral foram de 3,2 % e erros-padrão de 1,5 %, encontrados nas recuperações médias. Desvios padrão menores foram localizados nas recuperações mais altas e mais baixas, enquanto as recuperações extremas apresentaram as menores variações, pois estavam no âmbito de relação estável entre tamanho de partícula e recuperação. Em acréscimo, apesar da variação da granulometria, o pesquisador afirmou que esses ensaios visaram analisar somente a reprodutibilidade do sistema de acordo com a recuperação. Seus resultados estão expostos na tabela 2.

Tabela 2 - Ensaios de microflotação em Célula de Fuerstenau com cassiterita

Recuperação média [%]	Desvio padrão [%]	Coefficiente de variação [%]	Erro padrão [%]	Número de ensaios	95% intervalo de confiança	Tamanho de partícula [μm]
2,6	1,3	48,1	0,5	6	$2,6 \pm 1,3$	351-295
2,6	0,8	30,4	0,3	8	$2,6 \pm 0,7$	295-246
11,1	2,5	22,2	1	6	$11,1 \pm 2,6$	147-125
23,4	1,4	6,1	0,7	4	$23,4 \pm 2,3$	125-104
29,7	3	10	1,5	4	$29,7 \pm 4,7$	104-88
31,1	2	6,4	0,8	6	$31,1 \pm 2,1$	88-74
43,9	3,2	7,1	1,3	6	$43,9 \pm 3,4$	74-61
55	2,9	5,3	1,2	6	$55 \pm 3,1$	61-53
69,4	0,9	1,3	0,4	5	$69,4 \pm 1,2$	53-43
79,8	2,8	1,5	1,1	6	$79,8 \pm 2,9$	43-37
69,8	1,1	1,2	0,3	16	$89,8 \pm 0,6$	37-25
89,9	2,8	3,1	0,9	10	$89,9 \pm 2,0$	20,5-14,0
91	1,5	1,6	0,5	8	$91 \pm 1,2$	14,0-10,3
90,3	2,1	2,3	0,8	7	$90,3 \pm 1,9$	10,3-7,3

Fonte: RUIJTER, 1979

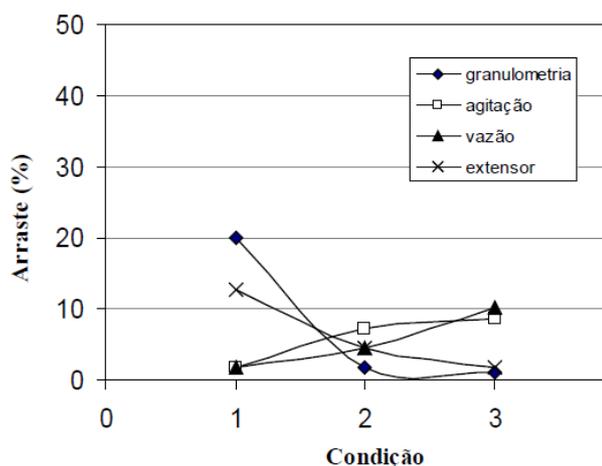
Como observação à metodologia utilizada pelos autores mencionados, Fuerstenau (1964) e Ruijter (1979) não utilizaram água de reposição. Esse ainda explicou que buscou uma espuma com 15 mm para que fosse suficiente ao transbordo durante todo tempo de ensaio e a retirou com auxílio de uma pá de acrílico. Além disso, Fuerstenau (1964) utilizou um agitador magnético e Ruijter (1979) um agitador mecânico com haste de vidro e massas de 5 g e 1 g,

respectivamente, esse último pode ter sido devido à falta de amostra mencionada. Nesse contexto, Luz (1996) realizou ensaios com 12 g e Costa (2009) com 20 g.

3.3.3 Arraste hidrodinâmico

Rodrigues *et al.* (2011) estudaram a influência de alguns parâmetros em relação ao arraste hidrodinâmico em ensaios com hematita e quartzo: densidade do mineral, vazão de gás, granulometria, agitação e tamanho do extensor adaptado ao Tubo de Hallimond. Como resultado foi encontrado que a granulometria e a ausência do extensor foram os parâmetros que mais influenciaram. Os resultados e parâmetros utilizados estão exibidos na figura 7 e tabela 3, respectivamente.

Figura 7 - Arraste de partículas de quartzo em função de diferentes parâmetros



Fonte: RODRIGUES *et al.*, 2011

Tabela 3 - Parâmetros e condições analisadas nos testes de microflotação

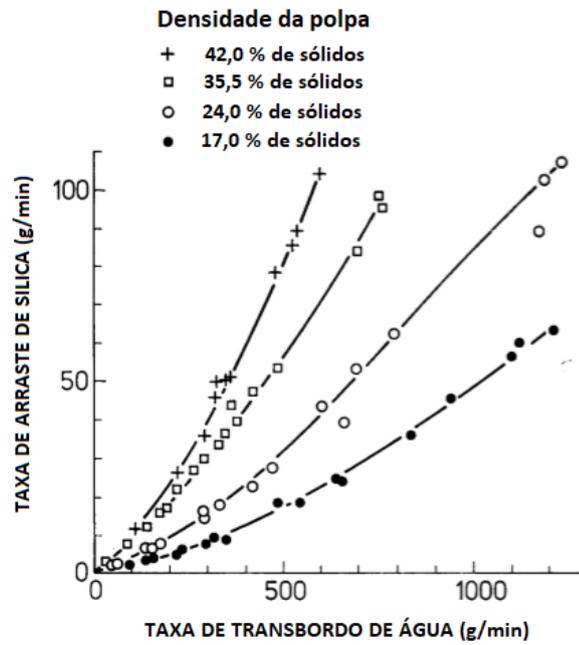
Condição	1	2	3
Granulometria [μm]	38-75	75-212	212 - 300
Agitação [rpm]	360	450	600
Vazão de gás [mL/min]	60	150	300
Extensor	ausente	médio (10 cm)	grande (20 cm)

Fonte: RODRIGUES *et al.*, 2011

Além disso, Lynch *et al.* (1974), por meio de ensaios em uma planta piloto com ganga silicosa, verificou que o arraste também aumenta com o aumento da taxa de água no sistema (redução

da proporção de sólidos). Esses resultados estão exibidos na figura 8. Por essa razão, a quantidade de água nos ensaios de Ruijter (1979) com a Célula de Fuerstenau foi mantida constante em todos os ensaios.

Figura 8 - Relação entre arraste de sílica e transbordo de água e uma planta piloto



Fonte: LYNCH *et al.*, 1974

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção estão apresentados os materiais, equipamentos e metodologias utilizados em todos os estágios da campanha experimental. Essas etapas são: preparação das amostras, caracterização, ensaios de microflotação em Tubo de Hallimond e Célula de Fuerstenau.

A preparação das amostras foi realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios e os ensaios e demais procedimentos no Laboratório de Flotação, ambos localizados no Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de hematita e quartzo foram cedidas pelo Laboratório de Tratamento de Minérios do Demin/UFOP com massa inicial de aproximadamente 4500 g e 5600 g, respectivamente. Dessa porção, 306 g de cada mineral foram utilizados para os ensaios nos tubos de ensaio.

Os ensaios de microflotação foram realizados com faixa granulométrica entre 148 e 105 μm . Dessa forma, a cominuição foi feita em moinho de bolas a úmido seguido de peneiramento (com peneiras de alívio) com intuito de evitar sobremoagem. Por fim, as amostras foram ajustadas em grau de porcelana. O moinho e o peneirador suspenso utilizados encontram-se nas figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 - Moinho de bolas



Fonte: elaboração própria.

Figura 10 - Peneirador suspenso



Fonte: elaboração própria.

Em seguida, com objetivo de obter uma amostra ainda mais pura, realizou-se a concentração dos minerais. Para tal, os minerais de hematita foram processados em um separador magnético de alta intensidade de campo (figura 11) para a retirada de contaminantes magnéticos. Posteriormente, com finalidade de eliminar possíveis minerais de magnetita, foi realizado a passagem de um ímã sobre amostra disposta em um recipiente.

Figura 11 - Separador magnético de bobina



Fonte: elaboração própria.

Em adição, com objetivo de purificar a amostra de quartzo após a moagem em moinho metálico, o mineral foi lixiviado em ácido oxálico com concentração de 7 % e ácido cítrico em 4 %, ambas as substâncias em uma mesma solução. Nesse procedimento, dividiu-se a solução em três béqueres e a amostra de aproximadamente 900 g do mineral de quartzo foi fracionada entre os recipientes. Em sequência, a mistura foi levemente aquecida por alguns minutos e deixou-se em repouso por 24 horas. Após esse período, os grãos de quartzo foram lavados com água corrente, até a retirada total de toda solução ácida, e a amostra repousada em água destilada por mais 24 horas para hidratação.

Logo após uma nova lavagem da amostra, verificou-se que toda solução ácida havia sido retirada. Isso foi possível aferindo o pH de uma porção de água antes e depois de misturá-la ao quartzo. Como o pH não se modificou, a amostra estava pronta e foi seca para uso.

4.2 CARACTERIZAÇÃO

A verificação da pureza dos minerais foi feita através da determinação, em triplicata, da densidade das amostras pelo método de picnometria a água. Para as análises, foram utilizados picnômetros de 25 mL e massa de aproximadamente 25 g a fim de preencher cerca de 1/3 do volume do dispositivo.

O procedimento acompanhou a seguinte ordem:

- a) pesou-se o picnômetro vazio com a tampa (mp);
- b) adicionou-se amostra até o preenchimento de 1/3 do volume do picnômetro e o dispositivo foi pesado (mpm);
- c) acrescentou-se água ao aparelho até o cobrimento de todo mineral seguido por leves toques para penetração da água entre os grãos. Pesou-se o instrumento com a tampa preenchida com água (uso de seringa) e seco na parte externa (mpma);
- d) pesou-se o picnômetro somente com água completa até a tampa e o aparelho seco na parte externa (mpa).

A massa específica foi calculada pela equação 1.

$$\rho = \frac{(mpm + mp)}{(mpa + mpm) - (mp + mpma)} \quad [1]$$

Onde:

ρ – Massa específica da amostra [kg/m³];

mp – Massa do picnômetro vazio com a tampa [kg];

mpm – Massa do picnômetro mais minério [kg];

$mpma$ – Massa do picnômetro mais minério mais água [kg];

mpa – Massa do picnômetro mais água [kg].

4.3 ENSAIOS DE MICROFLOTAÇÃO

Foram realizados ensaios de microflotação direta em nove repetições em cada dispositivo (Tubo de Célula de Fuerstenau) com composições puras e mistas de hematita e quartzo como apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Ensaios de microflotação

Composição da amostra	Hallimond	Fuerstenau
Hematita	9 ensaios	9 ensaios
Quartzo	9 ensaios	9 ensaios
70% Hematita – 30% Quartzo	9 ensaios	9 ensaios
30% Hematita – 70% Quartzo	9 ensaios	9 ensaios

Fonte: elaboração própria.

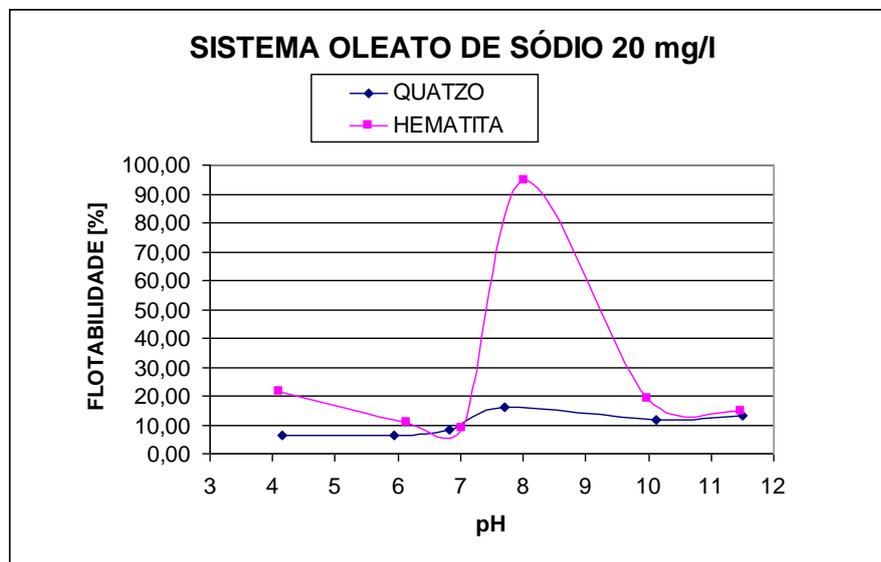
A ordem de realização dos ensaios, em cada equipamento, foi definida por meio de sorteio em planilha eletrônica a fim de evitar alguma interferência a um grupo específico. Essa influência poderia ser: forma de operação, condições dos equipamentos, qualidade da água, entre outros fatores.

Não houve repetição dos ensaios na percepção de desvio mais acentuado entre os resultados. Os ensaios somente foram refeitos quando se notou que alguma variável estava fora do padrão, como por exemplo, pico na vazão de ar, perda de amostra e pH fora do alcance aceitável.

Além disso, durante toda campanha experimental, buscou-se definir os parâmetros de ambos os dispositivos de forma mais semelhante possível, sem prejudicar a individualidade de cada instrumento.

Dessa forma, utilizou-se como coletor o oleato de sódio. Assim, a concentração desse surfactante e o tempo de condicionamento foram definidos com base nos trabalhos de Campos e Luz (2007) e ensaios prévios. Os autores estudaram a concentração de 20 mg/L de oleato de sódio na flotação direta envolvendo hematita e quartzo em diferentes pH e obtiveram bons resultados no pH 8 (figura 12). Dessa forma, foram realizados testes com as concentrações de 20 mg/L e 10 mg/L e verificou-se que a melhor concentração foi 10 mg/L com tempo de condicionamento de 120 s.

Figura 12 - Flotação direta de hematita e quartzo com oleato de sódio em diferentes pH



Fonte: CAMPOS; LUZ, 2007

Em relação ao tempo de flotação, esse foi estabelecido com base em ensaios preliminares com amostras mistas (fácil visualização). Dessa forma, no Tubo de Hallimond foram executados ensaios com duração de 60 s e 120 s, enquanto na Célula de Fuerstenau, em um mesmo ensaio,

efetuou-se coletas (do *overflow*) em intervalos de 60 s, 120 s e 180 s. Em ambos os dispositivos, o melhor tempo de flotação foi 60 s.

Em adição, a vazão de ar do Tubo de Hallimond foi definida como 60 mL/min de acordo com os ensaios de microflotação direta com oleato de sódio de Lopes e Lima (2009) e ensaios preliminares.

Nesse contexto, a fim de definir a vazão de ar a ser utilizada na Célula de Fuerstenau de forma correspondente, inicialmente, optou-se pela correlação da vazão de ar e a área (diâmetro interno) de cada dispositivo. Essa relação está expressa pela equação 2.

$$\frac{q_{vH}}{q_{vF}} = \frac{d_{tH}^2}{d_{tF}^2} \quad [2]$$

Onde :

q_{vH} – Vazão de ar no Tubo de Hallimond [mL/min];

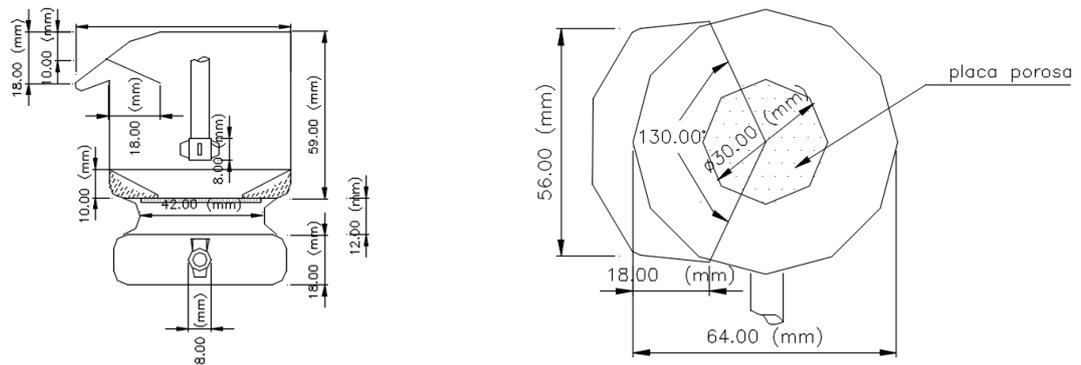
q_{vF} – Vazão de ar na Célula de Fuerstenau [mL/min];

d_{tH} – Diâmetro interno do Tubo de Hallimond [mm];

d_{tF} – Diâmetro interno da Célula de Fuerstenau [mm].

Nesse contexto, o diâmetro interno do Tubo de Hallimond e da Célula de Fuerstenau, logo após o septo poroso, são 34 mm e 64 mm (como mostra a figura 13), respectivamente. Dessa forma, a vazão encontrada para a Célula de Fuerstenau foi 212,6 mL/min e, a fim de padronizar os ensaios, utilizou-se a vazão de 220 mL/min. Na figura 14 é possível verificar visualmente a qualidade das bolhas.

Figura 13 - Esquema em perspectiva e dimensional da célula de Fuerstenau



Fonte: LUZ, 1996.

Figura 14 - Flotação de hematita em Célula de Fuerstenau



Fonte: elaboração própria.

Previamente, verificou-se se o rotâmetro estava calibrado. Para isso, encheu-se um béquer de 2 L com água até a metade e colocou-se uma proveta graduada de 500 mL em seu interior com a parte aberta para dentro do béquer (também com a água até a metade). Dessa forma, colocou-se a mangueira de vazão de ar dentro proveta na parte vazia e abriu-se a válvula com o rotâmetro na vazão de 60 mL/min por 1 minuto. Ao final, o desnível de ar no interior da proveta graduada foi o mesmo que o inserido no rotâmetro.

Para os experimentos de microflotação, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Tubo de Hallimond modificado 400 mL – Hialoquímica;
- b) Célula de Fuerstenau;
- c) balança de precisão;
- d) peagômetro Digimed, modelo DM-22;
- e) ar e/ou nitrogênio comprimido;
- f) cronômetro;
- g) agitador magnético modelo 257 – Fanem e barra magnética de 15 mm;
- h) agitador mecânico modelo 710 – Fisatom;
- i) vidrarias e instrumentos de laboratório (béquer, balão volumétrico, pipeta graduada, vidro de relógio, proveta graduada, pera de sucção, pisseta, entre outros);
- j) seringa plástica de 5 mL;
- k) papel de filtro e funil de plástico;
- l) estufa Fanem modelo 320-SE (temperatura máxima de 100° C).

4.3.1 Reagentes utilizados

Conforme mencionado, em ambos os ensaios de microflotação foi utilizado o oleato de sódio como coletor (10 mg/L). Além disso, nos ensaios na Célula de Fuerstenau empregou-se o mibcol (metil-isobutilcarbinol) como espumante com concentração de 50 mg/L, com base os trabalhos de Costa (2009) e ensaios preliminares. Em ambos os dispositivos, o pH do sistema foi natural.

Assim sendo, a preparação da solução mãe de oleato de sódio a 1% p/v foi feita pela saponificação a frio do ácido oleico na seguinte forma (ANDRADE; LEÃO; LIMA, 2011):

- a) pesou-se 1 g de ácido oleico em béquer de 50 mL;
- b) adicionaram-se 10 mL de água destilada sob agitação;
- b) foram inseridos 1,7 mL de uma solução de NaOH a 10% p/v, ainda sob agitação até a obtenção de uma solução de cor amarelada;
- c) foram inclusos mais 10 mL de água destilada e a agitação foi mantida até o oleato estar completamente solubilizado;
- d) diluiu-se a solução em balão volumétrico de 100 mL para obtenção da concentração de 1% p/v.

Por fim, com a finalidade de reduzir erros em relação ao volume de reagente, a solução mãe foi diluída em 200 mg/L em balão volumétrico de 250 mL.

4.3.2 Ensaios de microflotação em Tubo de Hallimond

O Tubo de Hallimond modificado utilizado nos ensaios se encontra na figura 4. Dessa forma, optou-se por não utilizar o extensor de vidro em dimensão maior (empregado para minimizar o arraste hidrodinâmico), pois a célula Fuerstenau não possui esse recurso.

Os ensaios em Tubo de Hallimond foram realizados nas seguintes etapas:

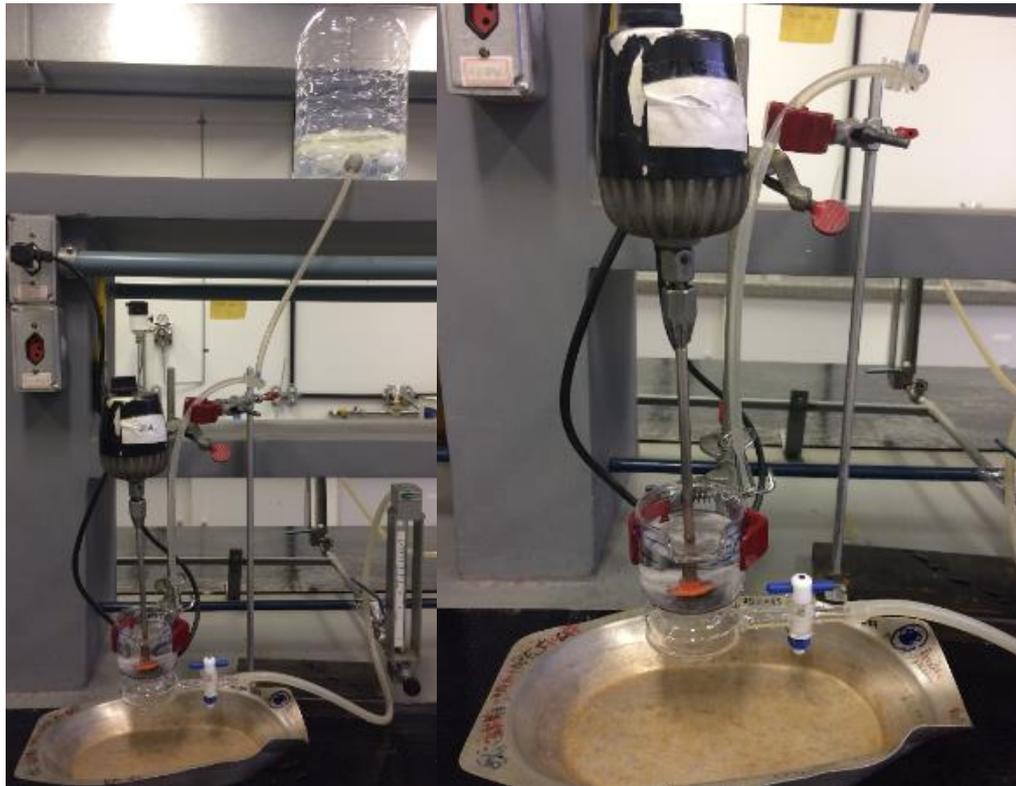
- a) preparou-se a solução de oleato de sódio a 200 mg/L;
- b) aferiu-se o pH de 300 mL de água destilada (com variação aceitável entre 5,5-6);
- c) colocaram-se béqueres próximo as saídas do flotado e do afundado;
- d) adicionaram-se 2 g de amostra à parte inferior do dispositivo;
- e) foram inseridos 15,25 mL do coletor (200 mg/L) e preencheu-se com água destilada até completar 50 mL;
- f) condicionou-se por 2 minutos com agitação no nível 4 do agitador magnético;
- g) ao final do condicionamento, a velocidade de agitação foi reduzida para o nível 2,5 e montou-se o restante do Tubo de Hallimond;
- h) adicionou-se água até completar 305 mL (concentração final de 10 mg/L) e foi aguardado 20 s para a diluição do coletor por todo o dispositivo;
- i) a vazão de ar foi aberta com 60 mL/min e a flotação foi mantida por 1 minuto;
- j) fechou-se a vazão de ar e desligou-se a agitação;
- k) coletou-se a porção flotada rapidamente, e, em seguida, a afundada;
- l) foi aferido o pH da porção flotada;
- m) removeu-se toda amostra do dispositivo com água destilada;
- n) as amostras foram filtradas, secas e pesadas;
- o) as amostras mistas foram arquivadas para posterior análise do teor.

4.3.3 Ensaios de microflotação em Célula de Fuerstenau

Para os ensaios de microflotação em Célula de Fuerstenau foi utilizado o aparelho da figura 15. A manutenção da cota do nível da espuma foi feita pelo gotejamento de água com espumante

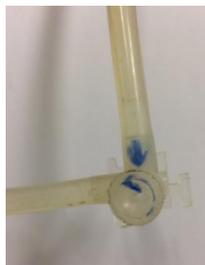
durante o tempo de flotação. Dessa forma, a fim de reduzir desvios nos resultados devido a reposição por meio de uma pisseta, foi montado um dispositivo para tal finalidade. Ele consiste em um galão conectado a uma mangueira com uma simples torneira acoplada. Assim, em todos os ensaios, a válvula foi rotacionada em 270° , proporcionando uma vazão de cerca de 81 mL/min (figura 16). A mangueira de reposição de água/espumante ficou sempre localizada na parte contrária à abertura da célula para saída do transbordo a fim de empurrar a espuma.

Figura 15 - Sistema Célula de Fuerstenau



Fonte: elaboração própria.

Figura 16 - Torneira de reposição de água/espumante na Célula de Fuerstenau



Fonte: elaboração própria.

Em caráter fundamental, o procedimento dos ensaios na Célula de Fuerstenau seguiu as etapas do trabalho de Luz (1996) com modificações nos parâmetros e leves alterações no procedimento:

- a) preparou-se a solução de oleato de sódio a 200 mg/L;
- b) preparou-se 1 L da solução de reposição com 10 gotas de metil-isobutilcarbinol (mibcol) e posicionou-se sua mangueira acima do dispositivo (sustentado por um suporte);
- c) aferiu-se o pH de 95 ml de água destilada (variação aceitável entre 5,5 – 6);
- d) colocou-se um recipiente para coleta do mineral transbordado;
- e) adicionou-se 15 g de amostra ao aparelho;
- f) foi inserido 5 ml de reagente (200 mg/L);
- g) a solução foi condicionada por 2 minutos com agitação no nível mínimo do agitador mecânico;
- h) 15 s antes do fim do condicionamento, foi inserida 1 gota do espumante (mibcol);
- i) abriu-se a vazão de ar com 220 mL/min durante 1 minuto e, logo que as bolhas se formaram, abriu-se a mangueira de reposição de água com espumante;
- j) fechou-se a mangueira de reposição de água, o ar e desligou-se a agitação;
- k) coletou-se a porção flotada do recipiente (sem adição de água) e aferiu-se o pH. Em seguida, coletou-se a porção afundada;
- l) removeu-se toda amostra do dispositivo e do recipiente com água destilada;
- m) as amostras foram filtradas, secas e pesadas;
- n) as amostras mistas foram arquivadas para posterior análise do teor.

4.3.4 Análise dos resultados

O desempenho dos ensaios de microflotação foram mensurados através do cálculo da porcentagem do material flotado (flotabilidade) por meio da equação 3.

$$F = \frac{m_o}{m_o + m_u} \times 100 \quad [3]$$

Onde:

F – Porcentagem flotada ou “flotabilidade” [%];

m_o – Massa de sólido da porção flotada [kg];

m_u – Massa de sólido da porção afundada [kg].

Em seguida, para a análise estatística, os cálculos e gráficos foram analisados por meio dos softwares *Microsoft Office Excel* e *Minitab 18*. Dessa forma, primeiramente, foi examinado a ocorrência de possíveis *outliers* através dos métodos de Grubbs, Dixon e *BoxPlot* (ensaios disponíveis no *Minitab 18*). Em seguida, avaliou-se as médias, desvios padrão amostral e coeficiente de variação de cada composição de amostra.

4.3.4.1 Amostras mistas

Em ensaios preliminares, analisou-se as amostras puras após a flotação (com reagente) pelo método de densidade por picnômetro com água, água com três gotas de álcool e álcool puro. Como esperado, verificou-se que, o mineral de hematita, principalmente, apresentou resultados com desvios não aceitáveis para esse objetivo, já que o alto grau de hidrofobicidade após a flotação não permitiu a infiltração da fase líquida entre os grãos.

Por esse motivo, os teores de ferro e recuperações metalúrgica nos produtos das amostras mistas seriam definidos pelo método de picnômetro a gás com base no trabalho de Couto, Braga e França (2012). Para esse fim, seria utilizado o picnômetro a hélio modelo *Ultrapyc 1200e*, versão 4.00, do fabricante *Quantachrome Corporation*, disponível no Laboratório de Propriedades Interfaciais do Demin/UFOP. Porém, por problemas técnicos, não foi possível a análise até a apresentação deste trabalho e, por isso, os resultados serão apresentados em trabalhos futuros. Apesar disso, mesmo assim será explicitado a metodologia desse procedimento.

Sabendo-se a massa específica em estado puro dos minerais de hematita e quartzo ($\rho_{he} = 5.200 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{qua} = 2.650 \text{ kg/m}^3$) e a média da massa específica da amostra obtida, é possível calcular a fração mássica de hematita na amostra pela equação 4. E, em seguida, a concentração de Fe (%) pela equação 5.

$$f_{he} = \frac{\rho_s - \rho_{qua}}{\rho_{he} - \rho_{qua}} \cdot \frac{\rho_{he}}{\rho_{qua}} \quad [4]$$

Onde:

f_{he} – Fração de hematita na amostra;

ρ_s – Massa específica média da amostra [kg/m³];

ρ_{he} – Massa específica da hematita em estado puro [kg/m³];

ρ_{qua} – Massa específica do quartzo em estado puro [kg/m³];

$$Fe(\%) = 0,6964 \cdot f_{he} \cdot 100 \quad [5]$$

Onde:

$Fe(\%)$ – Concentração de ferro na amostra [%]

f_{he} – Fração de hematita na amostra.

Nesse contexto, o fator 0,6964 representa a fração ferro contida na hematita.

Todavia, para os experimentos no Tubo de Hallimond, utilizou-se uma massa amostral de 2 g e, por meio de ensaios preliminares, verificou-se que 1 g seria a maior massa obtida (nas porções flotado ou afundado). Por esse motivo, previamente, serão realizadas análises de densidade a fim de verificar se o método validado por Couto, Braga e França (2012) também se aplica em pequenas porções de amostra. Para isso, inicialmente, serão comparados resultados de ensaios de densidade (em duplicata) com massas de 1 g e 25 g das amostras puras. Em sequência, será realizada a picnometria de amostras de 1 g com proporções (em massa) de 70 % hematita – 30 % quartzo e 30 % hematita – 70 % quartzo, a fim de verificar se os resultados apresentarão um fator correspondente às massas pesadas inicialmente.

Finalmente, serão analisados os teores e as recuperações metalúrgicas de cada ensaio. Essa será calculada pela equação 06.

$$RM = \frac{Cc}{Aa} \times 100$$

[06]

Onde:

RM – recuperação metalúrgica [%];

A – massa da alimentação [kg];

C – massa do concentrado [kg];

a – teor de ferro na alimentação [%];

c – teor de ferro no concentrado [%];

r – teor de ferro n rejeito [%].

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo estão apresentados a análise e discussão dos resultados obtidos neste trabalho.

5.1 BREVE AVALIAÇÃO TEÓRICA

Por meio da revisão bibliográfica foi possível compreender que ambos os dispositivos apresentam credibilidade para a função da microflotação que é investigar as interações entre reagentes e a superfície mineral e levantar as melhores condições do sistema para a célula de bancada levando em consideração que se tratam de ensaios guia.

Além disso, por meio da literatura verificou-se que a Célula de Fuerstenau apresenta características física e operacional mais semelhante às células de bancada, enquanto o Tubo de Hallimond apresenta semelhança com a coluna de flotação.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A análise das amostras pelo método do picnômetro a água forneceram resultados de massa específica média para a hematita de 5110 kg/m^3 e do quartzo de 2620 kg/m^3 . Nesse cenário, sabendo que a massa específica desses minerais puros são 5200 kg/m^3 e 2650 kg/m^3 , respectivamente, as amostras encontram-se com elevada pureza (figura 17). Os resultados em triplicata estão apresentados na tabela 5.

Figura 17 - Amostras de quartzo e hematita purificadas



Fonte: elaboração própria.

Tabela 5 – Massas específicas das amostras purificadas

Massas específicas [kg/m ³]	
Hematita	Quartzo
5110	2630
5110	2610
5110	2620

Fonte: elaboração própria.

5.3 ARRASTE HIDRODINÂMICO

Os resultados dos ensaios de arraste hidrodinâmico estão exibidos na tabela 6. Por meio dessa, é possível observar que houve elevados valores para o quartzo, em ambos os dispositivos. Isso pode estar relacionado à massa específica do mineral e a ausência do extensor, que entre os parâmetros citados por Rodrigues *et al.* (2011), foram os fatores que mais poderiam ter atuado no arraste hidrodinâmico nesse caso.

Tabela 6 – Resultados arraste hidrodinâmico

Ensaio Arraste Hidrodinâmico			
Hallimond		Fuerstenau	
Hematita [%]	Quartzo [%]	Hematita [%]	Quartzo [%]
0,08	21,74	9,59	20,23
1,16	21,71	8,55	18,41

Fonte: elaboração própria.

Com intenção de verificar alguma particularidade nessa amostra de mineral devido ao alto arraste, analisou-se a esfericidade das partículas de hematita e quartzo por meio de análise comparativa entre as figuras 18 e 19 (e outras adicionais) e a escala de Krumbein (figura 20) (DEVIN; VINCENT, 2002 *apud* MILHOMEM; LUZ, 2016). Nessa escala, o eixo vertical refere-se aos valores de esfericidade e o horizontal ao grau de arredondamento. Por meio disso, verificou-se que as esfericidades dos grãos de ambos os minerais eram próximas, com coeficientes de 0,76 para o quartzo e de 0,71 para a hematita.

Figura 18 - Amostras de quartzo e hematita em microscópio



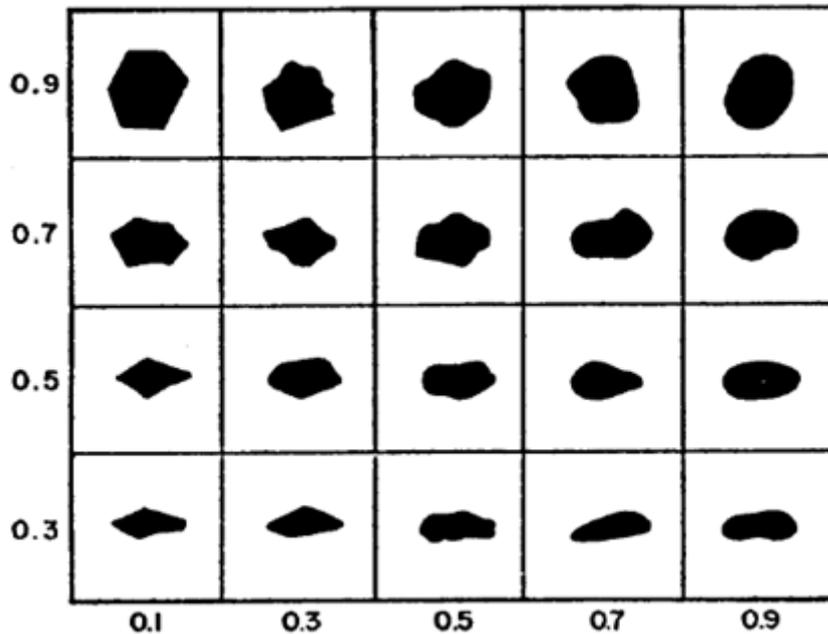
Fonte: elaboração própria.

Figura 19 - Amostras de quartzo e hematita em microscópio (cada divisão equivale a 0,1 mm)



Fonte: elaboração própria.

Figura 20 - Escala de Krumbein para esfericidade e grau de arredondamento



Fonte: MILHOMEM; LUZ, 2016.

Em sequência, ao examinar o grau de hidrofobicidade em um tubo de ensaio com água e espumante (2 gotas), verificou-se que o quartzo se apresentou em uma disposição agregada. Então, a amostra de mineral foi levada ao forno mufla a 600 °C durante 1 hora e mesmo assim amostra de quartzo manteve esse comportamento (figura 21). Nesse contexto, nenhum procedimento na preparação desse mineral parece ter interferido nessa característica, apesar de não ter sido possível o estudo da influência da lixiviação sobre essa propriedade. Por isso, deixa-se aqui uma atenção especial para essa particularidade.

Figura 21 - Quartzo em solução de água com 2 gotas de metil-isobutilcarbinol (mibcol)



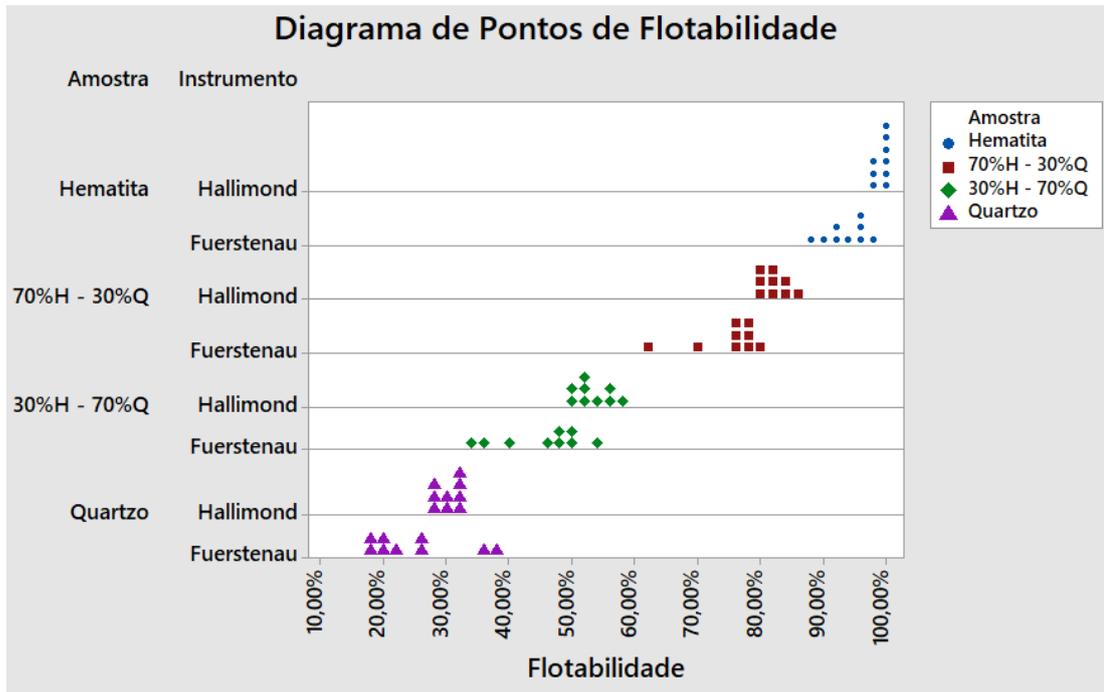
Fonte: elaboração própria.

Em relação ao arraste hidrodinâmico da hematita na Célula de Fuerstenau, a causa pode ter sido principalmente devido à maior turbulência desse instrumento e o desenho do dispositivo. Além disso, apesar da adição da água/espumante como manutenção da cota durante os ensaios ter sido disposta na parte superior, não é descartada a possibilidade de a alteração da densidade da polpa ter influenciado no arraste hidrodinâmico, conforme estudos de Lynch *et al.* (1974).

5.4 ENSAIOS DE MICROFLOTAÇÃO

Os resultados dos ensaios estão apresentados no gráfico geral da figura 22 e todas informações dos experimentos estão exibidos nos Adendos A e B.

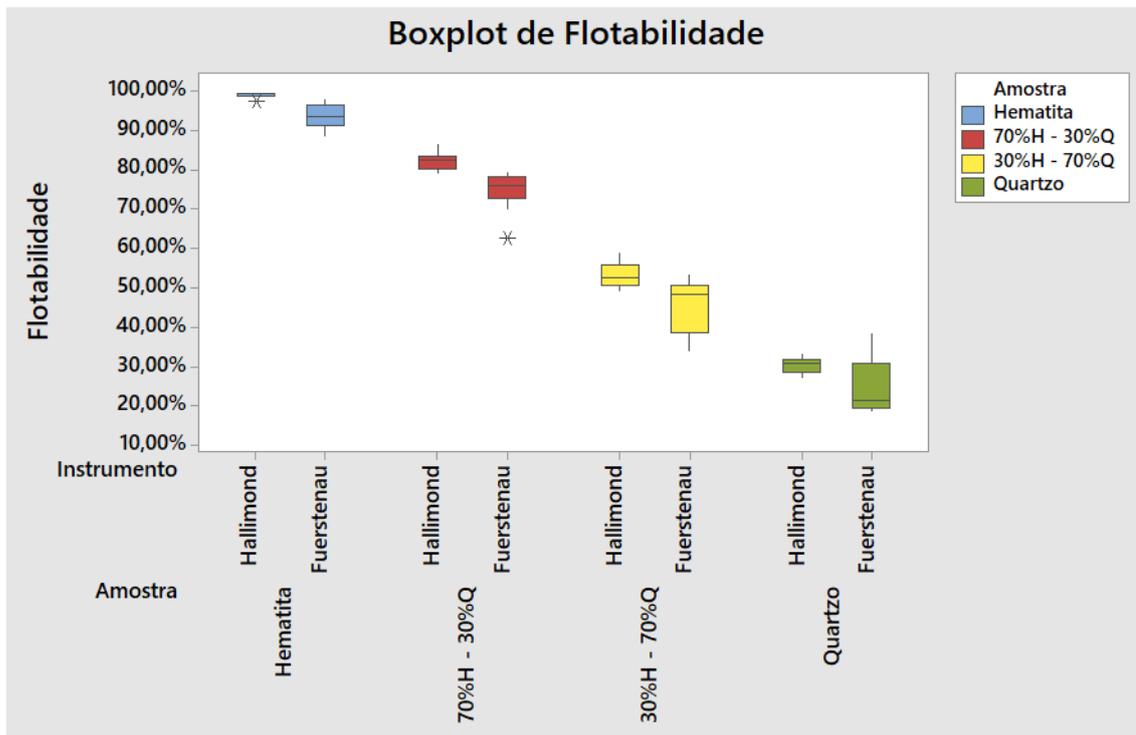
Figura 22 - Diagrama de pontos de flotabilidade



Fonte: elaboração própria.

A partir desses dados, os métodos de Grubbs, Dixon e *BoxPlot*, (avaliações disponíveis no Minitab 18) indicaram um *outlier* na categoria Hematita para o Tubo de Hallimond e um na seção 70 % Hematita – 30 % Quartzo para o Fuerstenau. O gráfico está apresentado na figura 23.

Figura 23 - Boxplot de flotabilidade

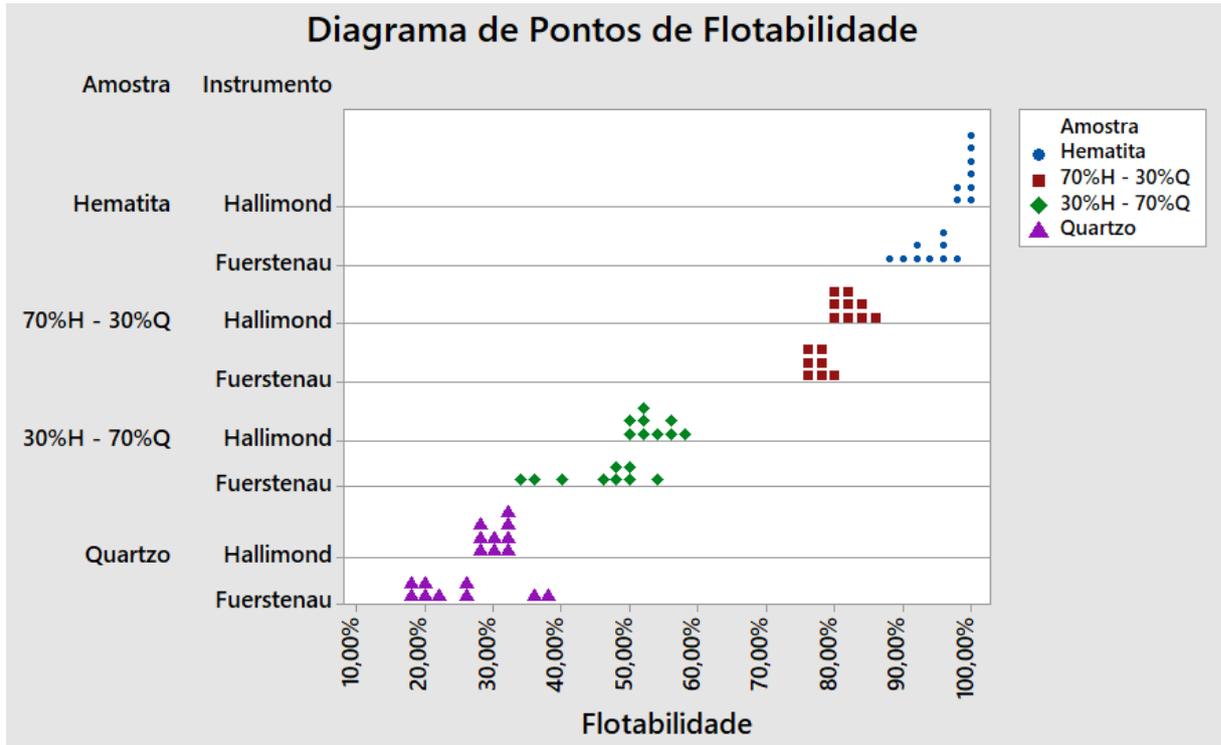


Fonte: elaboração própria

Em sequência, os *outliers* foram retirados e foi realizada uma nova análise nessas mesmas seções. Dessa forma, na seção 70 % Hematita – 30 % Quartzo foi encontrado mais um *outlier* que também foi excluído. Esses problemas podem ter ocorrido devido alguma alteração no processo que não foi observada, apesar de grande cautela nos procedimentos.

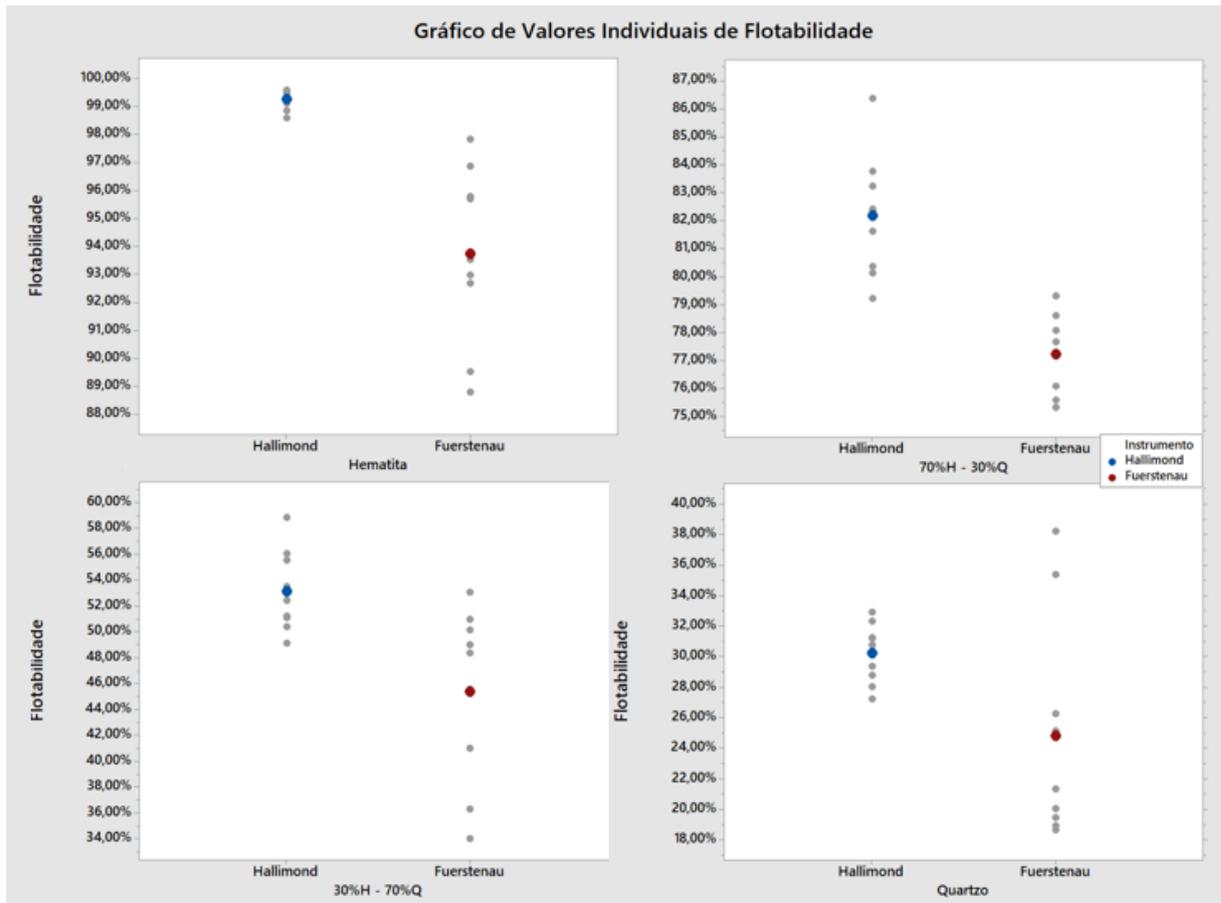
Pode-se observar por meio das figuras 24 e 25 que nos ensaios da Célula de Fuerstenau os resultados se encontram mais espalhados. Isso pode ser quantificado pelos desvios padrão amostral e coeficientes de variação da tabela 7 e figura 26. É importante destacar que no Tubo de Hallimond com hematita pura, toda a porção do mineral foi flotada e, por isso, os resultados estão mais concentrados em relação aos demais.

Figura 24 - Diagrama de pontos de flotabilidade após a retirada dos outliers



Fonte: elaboração própria

Figura 25 - Gráfico de valores individuais de flotabilidade para cada seção



Fonte: elaboração própria.

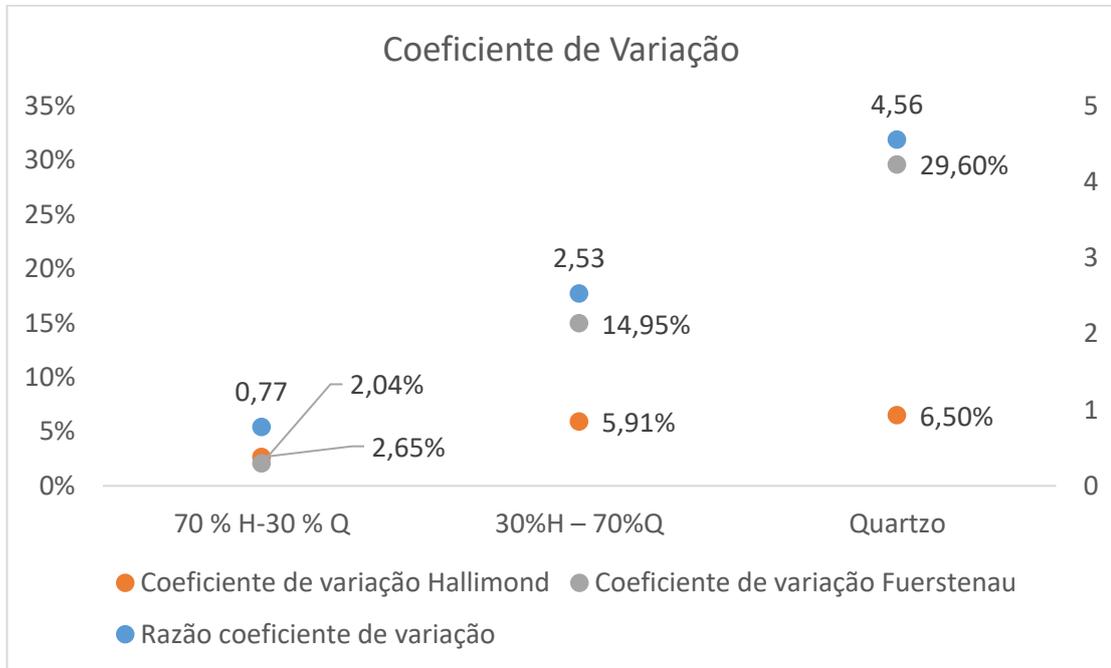
Tabela 7 - Resultados testes de microflotação

Amostra	Flotabilidade					
	Hallimond			Fuerstenau		
	Média [%]	Desvio Padrão Amostral [%]	Coefficiente de Variação [%]	Média [%]	Desvio Padrão Amostral [%]	Coefficiente de Variação [%]
Hematita	99,26	0,37	0,37	93,73	3,14	3,35
70% Hematita – 30% Quartzo	82,15	2,17	2,65	77,23	1,57	2,04
30% Hematita – 70% Quartzo	53,10	3,14	5,91	45,33	6,78	14,95
Quartzo	30,18	1,96	6,50	24,79	7,34	29,60

Fonte: elaboração própria.

de quartzo proporcionaram maiores coeficientes de variação. Além disso, essa diferença é ainda maior para a célula de Fuerstenau, de acordo com a razão entre os coeficientes.

Figura 27 - Coeficiente de variação



Fonte: elaboração própria.

5.4.1 Análise dos resultados das amostras mistas

Por problemas técnicos, as análises dos teores dos produtos das amostras mistas (por meio de ensaios de densidade em picnômetro a gás) não ficaram prontas até a apresentação deste trabalho. Tais resultados serão adicionados futuramente. Apesar disso, é possível verificar visualmente por meio das figuras 28, 29 e 30 que ambos os dispositivos apresentaram boa seletividade dos ensaios.

Figura 28 - Amostra mista flotada em Célula de Fuerstenau



Fonte: elaboração própria.

Figura 29 - Porções mistas 0,7H0,3Q e 0,3H0,7Q flotado e afundado – Célula de Fuerstenau



Fonte: elaboração própria.

Figura 30 - Porções mistas 0,7H0,3Q e 0,3H0,7Q flotado e afundado – Tubo de Hallimond



Fonte: elaboração própria.

6 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios do Tubo de Hallimond foram considerados de boa reprodutibilidade e da Célula de Fuerstenau razoavelmente boa, sendo os desvios padrão amostral do tubo menores que na célula. Mesmo assim, essa é considerada de boa reprodução. Além disso, a Célula de Fuerstenau apresentou arraste hidrodinâmico maior que o Tubo de Hallimond. Ademais, proporções maiores de quartzo acarretaram coeficientes de variação maiores, sendo que não é descartada a influência do processo de lixiviação sobre esse fator. Além disso, ambos os instrumentos se apresentaram capazes de trabalhar com misturas de minerais.

Em adição, de acordo com a literatura, a Célula de Fuerstenau apresenta características física e operacional mais semelhante às células de bancada convencionais, principalmente devido a agitação turbulenta e adição de espumante, enquanto o tubo de Hallimond apresenta maior semelhança com a coluna de flotação (em termos da intensidade de agitação e desenho do equipamento).

Por fim, é importante destacar que a microflotação é utilizada como ensaios prospectórios. Nesse contexto, mais importante que obter ótimos resultados, é verificar como o sistema se comportará diante de variações (como tipo de reagente, concentração e pH). Dessa forma, os testes de microflotação têm caráter qualitativo ou semiquantitativo.

REFERÊNCIAS

- ALLISON, S. A.; FINKELSTEIN, N. P. The role of sulfur in the flotation of sulphide minerals. *National Institute for Metallurgy*, Randburg, No. 1597, Jan. 1974 *apud* RUIJTER, M. A. *Particle size effects in the flotation of cassiterite*. 1979. 144 f. Thesis (Master of Science in Engineering) – Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 1979.
- ANDRADE, E. M.; LEO, V. A.; LIMA, R. M. F. Influência da adição de fluorsilicato de sódio sobre a flotabilidade de minerais de manganês e quartzo com oleato de sódio. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 64, ISSN 0370-4467, p. 219-225, Abr. Jun. 2011.
- ARAÚJO, A. C.; GALERY, R.; VIANA, P. R. M.; ARENARE, D. S. Revisitando as técnicas de avaliação de flotabilidade: uma visão crítica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS DE MINÉRIOS & METALURGIA EXTRATIVA, 21., 2005, Natal. [*Anais eletrônicos...*]. Disponível em: <<http://artigos.entmme.org/>>. Acesso em: 3 dez. 2018.
- BALTAR, C. A. M. *Flotação no tratamento de minérios*. 2 ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2010. 238 p.
- CAMPOS, A. S.; LUZ, J. A. M. *Microflotação de Minerais de Formações Ferríferas*. Relatório de Iniciação Científica (Bacharelado Engenharia de Minas, Tratamento de Minérios) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.
- CHAVES, A. P. Máquinas de flotação. In: CHAVES, A. P (organizador). *Teoria e prática do tratamento de minérios: flotação: o estado da arte no Brasil*. São Paulo: Signus Editora, 2006. v. 4, cap. 2, p. 31-44.
- CHUDACEK, M. W.; FICHERA, M. A.; ROSA, M. D.; SILVA, R. V. G. Flotation testing: from pure minerals to real ores. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 15., 1992, São Lourenço. [*Anais eletrônicos...*]. Disponível em: <<http://artigos.entmme.org/>>. Acesso em: 3 dez. 2018.
- COELHO, E. M. *Interpretation of microflotation test results*. 1968. 38 f. Thesis (Master) – Stanford University, 1968 *apud* ARAÚJO, A. C.; GALERY, R.; VIANA, P. R. M.; ARENARE, D. S. Revisitando as técnicas de avaliação de flotabilidade: uma visão crítica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 21., 2005, Natal. [*Anais eletrônicos...*]. Disponível em: <<http://artigos.entmme.org/>>. Acesso em: 5 dez. 2018.

COSTA, J. L. *Seletividade na Flotação de Minérios Ferríferos Dolomíticos*. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral, Tratamento de Minérios) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

COUTO, H. J. B.; BRAGA, P. F. A., FRANÇA, S. C. A. Use of gas pycnometry for estimating the iron content in mineral samples. *Minerals Engineering*, v. 39, ISSN 0892-6875, p. 45-47, Dec. 2012.

DREVIN, G. R.; VINCENT, L. Granulometric Determination of Sedimentary Rock Particle Roundness. In: Proceedings of the International Symposium on Mathematical Morphology, Sidney, Australia, 2002, p. 1-10 *apud* MILHOMEM, F. O.; DA LUZ, J. M. Experimentos simples para estudo de granéis. *HOLOS*, v. 3, ISSN 1807-1600, p. 114-131, Abr. 2016.

FUERSTENAU, M. C. An improved micro-flotation technique. *E & M J*, v. 165, p. 108-109, Nov. 1964.

LOPES, G. M.; LIMA, R. M. F. *Flotação direta de minérios de ferro*. 2009. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral, Tratamento de Minérios) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

LUZ, J. A. M. *Flotação Aniônica de Rejeito Itabirítico: Estudo de reagentes alternativos e modelamento polifásico do processo*. (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.

LYNCH, A. J.; JOHNSON, N. W.; MCKEE, D. J.; THORNE, G. C. The behaviour of minerals in sulphide flotation processes, with reference to simulation and control. *Journal of the south african institute of mining and metallurgy*, p. 349-362, Apr. 1974.

MAVIS, K. A.; MAVROS, P. P. Froam/Froth Flotation: Part II. Removal of particle matter. *Separation ad purification reviews*, Thessaloniki (GR), 10.1080/03602549108021414, p. 163-198, Jan. 1991.

MILHOMEM, F. O.; DA LUZ, J. M. Experimentos simples para estudo de granéis. *HOLOS*, v. 3, ISSN 1807-1600, p. 114-131, Abr. 2016.

PERES, A. E. C.; ARAÚJO, A. C. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: CHAVES, A. P (organizador). *Teoria e prática do tratamento de minérios: flotação: o estado da arte no Brasil*. São Paulo: Signus Editora, 2006. v. 4, cap. 1, p. 1-29.

RODRIGUES, T. S.; RODRIGUES, O. M. S.; NOVAIS, L. R.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Quantificação de arraste hidrodinâmico na microflotação. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios & Metalurgia Extratita – ENTMMME, 24., 2011, Salvador. Anais. p. 355-359.

RUIJTER, M. A. *Particle size effects in the flotation of cassiterite*. 1979. 144 f. Thesis (Master of Science in Engineering) – Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 1979.

SILVA, A. T. *Tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Edições Engenharia EEUFMG, 1973.

YOON, R. H.; LUTTRELL, G. H. The effect of bubble size on fine particle flotation. In: LASKOWSKI, J. S. (editor). *Frothing flotation*. Gordon and Breach Science Publishers, p. 101-122, 1989 *apud* BALTAR, C. A. M. *Flotação no tratamento de minérios*. 2 ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2010. 238 p.

ADENDO A – Ensaios de flotação Tubo de Hallimond

Hematita							
Ordem	Msólido [g]	Mover [g]	Munder [g]	Perda [%]	Flotabilidade [%]	pH flotação	pH água inicial
2	2,0000	1,9393	0,0537	0,35%	97,31%	6,91	5,72
13	2,0000	1,9574	0,0280	0,73%	98,59%	6,57	5,53
18	2,0000	1,9839	0,0106	0,28%	99,47%	6,61	5,51
23	2,0000	1,9816	0,0103	0,41%	99,48%	6,83	5,5
24	2,0000	1,9455	0,0228	1,59%	98,84%	6,63	5,75
28	2,0000	1,9787	0,0092	0,61%	99,54%	6,78	5,48
29	2,0000	1,9779	0,0085	0,68%	99,57%	6,85	5,65
30	2,0000	1,9725	0,0099	0,88%	99,50%	6,62	5,71
32	2,0000	1,9739	0,0175	0,43%	99,12%	6,51	5,77

Fonte: elaboração própria.

0,7 Hematita 0,3 Quartzo							
Ordem	Msólido [g]	Mover [g]	Munder [g]	Perda [%]	Flotabilidade [%]	pH flotação	pH água inicial
9	2,0000	1,6451	0,3528	0,11%	82,34%	6,90	5,72
14	2,0000	1,5765	0,4137	0,49%	79,21%	6,55	5,62
16	2,0000	1,6452	0,3512	0,18%	82,41%	6,60	5,6
19	2,0000	1,6015	0,3973	0,06%	80,12%	6,57	5,45
21	2,0000	1,6545	0,3337	0,59%	83,22%	6,71	5,52
26	2,0000	1,6702	0,3243	0,28%	83,74%	6,85	5,43
31	2,0000	1,6232	0,3658	0,55%	81,61%	6,59	5,67
35	2,0000	1,7021	0,2685	1,47%	86,37%	6,95	5,67
20	2,0000	1,5843	0,3871	1,43%	80,36%	6,64	5,5

Fonte: elaboração própria.

Quartzo							
Ordem	Msólido [g]	Mover [g]	Munder [g]	Perda [%]	Flotabilidade [%]	pH flotação	pH água inicial
1	2,0000	0,6175	1,3599	1,13%	31,23%	7,06	5,77
3	2,0000	0,5746	1,4245	0,04%	28,74%	6,70	5,69
5	2,0000	0,5868	1,4124	0,04%	29,35%	6,70	5,91
6	2,0000	0,5578	1,4350	0,36%	27,99%	6,56	5,51
7	2,0000	0,6109	1,3773	0,59%	30,73%	6,48	5,42
11	2,0000	0,6224	1,3725	0,26%	31,20%	6,76	5,65
22	2,0000	0,5405	1,4462	0,67%	27,21%	6,57	5,53
25	2,0000	0,6437	1,3486	0,38%	32,31%	7,08	5,67
34	2,0000	0,6528	1,3313	0,80%	32,90%	6,53	5,66

Fonte: elaboração própria.

0,3 Hematita 0,7 Quartzo							
Ordem	Msólido [g]	Mover [g]	Munder [g]	Perda [%]	Flotabilidade [%]	pH flotação	pH água inicial
4	2,0000	1,0198	0,9727	0,37%	51,18%	7,2	5,74
8	2,0000	1,0445	0,9488	0,33%	52,40%	6,96	5,63
10	2,0000	1,1081	0,8869	0,25%	55,54%	7,06	5,81
12	2,0000	1,0053	0,9909	0,19%	50,36%	6,74	5,58
15	2,0000	1,0694	0,9303	0,02%	53,48%	6,56	5,52
17	2,0000	1,0177	0,9758	0,32%	51,05%	6,71	5,56
27	2,0000	1,1180	0,8782	0,19%	56,01%	6,79	5,53
36	2,0000	1,1740	0,8225	0,18%	58,80%	6,97	5,55
33	2,0000	0,9698	1,0046	1,28%	49,12%	6,99	5,43

Fonte: elaboração própria.

ADENDO B – Ensaios de flotação Célula de Fuerstenau

Hematita							
Ordem	Msólido [g]	Mover [g]	Munder [g]	Perda [%]	Flotabilidade [%]	pH flotação	pH água inicial
4	15,0000	13,2797	1,6814	0,26%	88,76%	6,71	5,53
8	15,0000	13,8732	1,0960	0,21%	92,68%	6,77	5,58
13	15,0000	13,9241	1,0545	0,14%	92,96%	6,51	5,58
16	15,0000	13,4070	1,5708	0,15%	89,51%	6,53	5,87
19	15,0000	14,3452	0,6343	0,14%	95,77%	6,69	5,71
23	15,0000	14,6502	0,3257	0,16%	97,83%	6,41	5,88
29	15,0000	14,0009	0,9706	0,19%	93,52%	6,70	5,69
32	15,0000	14,5055	0,4698	0,16%	96,86%	6,71	5,92
33	15,0000	14,3182	0,6477	0,23%	95,67%	6,64	5,83

Fonte: elaboração própria.

0,7 Hematita 0,3 Quartzo							
Ordem	Msólido [g]	Mover [g]	Munder [g]	Perda [%]	Flotabilidade [%]	pH flotação	pH água inicial
3	15,0000	11,8476	3,0925	0,40%	79,30%	6,62	5,63
5	15,0000	11,6245	3,3431	0,22%	77,66%	6,56	5,63
12	15,0000	11,3893	3,5828	0,19%	76,07%	6,65	5,7
14	15,0000	11,2748	3,6968	0,19%	75,31%	6,55	5,8
18	15,0000	11,6812	3,2802	0,26%	78,08%	6,54	5,74
20	15,0000	11,7631	3,2028	0,23%	78,60%	6,45	5,64
25	15,0000	10,4481	4,4889	0,42%	69,95%	6,51	5,69
27	15,0000	9,3573	5,6018	0,27%	62,55%	6,56	5,89

Fonte: elaboração própria.

Quartzo							
Ordem	Msólido [g]	Mover [g]	Munder [g]	Perda [%]	Flotabilidade [%]	pH flotação	pH água inicial
6	15,0000	5,2860	9,6603	0,36%	35,37%	6,95	5,76
7	15,0000	5,7182	9,2514	0,20%	38,20%	6,55	5,9
10	15,0000	3,9257	11,0489	0,17%	26,22%	6,91	5,87
17	15,0000	3,1888	11,7802	0,21%	21,30%	6,41	5,53
22	15,0000	2,7872	12,1728	0,27%	18,63%	6,26	5,92
24	15,0000	3,7650	11,2224	0,08%	25,12%	6,65	5,97
26	15,0000	2,8294	12,1531	0,12%	18,88%	6,60	5,96
30	15,0000	2,9104	12,0741	0,10%	19,42%	6,30	5,55
36	15,0000	2,9938	11,9872	0,13%	19,98%	6,81	5,84

Fonte: elaboração própria.

0,3 Hematita 0,7 Quartzo							
Ordem	Msólido [g]	Mover [g]	Munder [g]	Perda [%]	Flotabilidade [%]	pH flotação	pH água inicial
1	15,0000	7,4876	7,4536	0,39%	50,11%	6,56	5,61
2	15,0000	7,3320	7,6424	0,17%	48,96%	6,30	5,71
9	15,0000	7,9430	7,0358	0,14%	53,03%	6,72	5,68
11	15,0000	7,2156	7,7176	0,45%	48,32%	6,59	5,5
15	15,0000	6,8132	8,1578	0,19%	45,51%	6,61	5,68
21	15,0000	5,4222	9,5439	0,23%	36,23%	6,30	5,56
28	15,0000	7,6218	7,3405	0,25%	50,94%	6,70	5,69
31	15,0000	6,1321	8,8445	0,16%	40,94%	6,59	5,93
34	15,0000	5,0767	9,8829	0,27%	33,94%	6,76	5,85

Fonte: elaboração própria.

Certifico que o aluno Leticia Stéffane Santos Silva, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado Comparação de técnicas de microflotação: Tubo de Hallimond e Célula de Fuerstenau, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



José Aurélio Medeiros da Luz

Orientador

Ouro Preto, 21 de dezembro de 2018.