



Andreza Rafaela Moraes Pereira

**Flotação de hematita a partir do rejeito de minério de
ferro com o uso de biossurfactante extraído da bactéria
*Rhodococcus opacus***

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Maurício Leonardo Torem
Co-orientador: Dr. Ronald Rojas Hacha

Rio de Janeiro
Março de 2019



Andreza Rafaela Moraes Pereira

**Flotação de hematita a partir do rejeito de minério
de ferro com o uso de biossurfactante extraído da
bactéria *Rhodococcus opacus***

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Maurício Leonardo Torem

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Dr. Ronald Rojas Hacha

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Dr. Antonio Gutiérrez Merma

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Dra. Flávia Paulucci Cianga Silvas

Instituto Tecnológico Vale – ITV

Prof. Rodrigo Fernandes M. de Souza

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de Março de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador

Andreza Rafaela Moraes Pereira

Graduou-se em Engenharia de Minas na Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil em 2016. Obteve o título de Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade Anglo Americano, Campina Grande - PB, em 2017.

Ficha Catalográfica

Pereira, Andreza Rafaela Moraes

Flotação de hematita a partir do rejeito de minério de ferro com o uso de biossurfactante extraído da bactéria *Rhodococcus opacus* / Andreza Rafaela Moraes Pereira ; orientador: Maurício Leonardo Torem ; co-orientador: Ronald Rojas Hacha. – 2019.

114 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2019.

1. Engenharia Química e de Materiais – Teses. 2. Flotação. 3. *Rhodococcus opacus*. 4. Bioflotação. 5. Hematita. 6. Rejeito. I. Torem, Maurício Leonardo. II. Rojas Hacha, Ronald. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

Aos meus pais Afonso e Suzana,
pela vida, amor e educação; e ao meu
filho pelo amor e compreensão.

Agradecimentos

A Deus, que sempre me ajuda nas dificuldades, meu porto seguro, com quem compartilho minhas angústias e vitórias.

Agradeço ao Professor Doutor Maurício Leonardo Torem, meu orientador, pela confiança, paciência e compreensão oferecidas durante o mestrado.

Meu agradecimento ao Instituto Técnico da Vale pelo apoio financeiro durante o meu curso de Mestrado.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

Agradecimento especial ao meu co-orientador Ronald Hacha Rojas e Maurício Côrtes pela amizade, compreensão, intercâmbio de idéias e colaboração para a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas da PUC-Rio, professores, pesquisadores e funcionários do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio pelos ensinamentos, orientações e sugestões para minha formação e crescimento profissional.

A todos os professores que participam da minha banca examinadora por terem me ajudado, aconselhado e aceitado meu convite.

Agradeço ao Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, e ao técnico Fábio Novaes pela ajuda na realização de alguns ensaios.

A minha Família, e meu nóivo que sempre me incentivou, sem vocês não teria conseguido ter chegado até aqui.

Resumo

Pereira, Andreza Rafela Moraes; Torem, Mauricio Leonardo. **Flotação de hematita a partir do rejeito de minério de ferro com o uso de biossurfactante extraído da bactéria *Rhodococcus opacus***. Rio de Janeiro, 2019, 114p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso de biossurfactantes derivados de matérias-primas de base biológica apresentam diversas vantagens sobre surfactantes convencionais como por exemplo: baixa toxicidade, alta cinética de degradação, versatilidade na flotação mineral podendo atuar como coletor ou espumante. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso de biossurfactante extraído da bactéria *Rhodococcus opacus* na concentração da hematita do rejeito de minério de Ferro. Primeiramente, foram realizados estudos de caracterização da amostra (Análise granulométrica, química e mineralógica). Também foram feitas medições do Potencial zeta, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) com o intuito de avaliar a interação do biossurfactante e do silicato de sódio na superfície mineral (hematita). As propriedades físico-químicas do biossurfactante foram determinadas pela tensão superficial. Diferentes estudos de microflotação (célula Patridge-Smith) e flotação em bancada (célula mecânica CDC) foram realizados para avaliar o pH (2, 3, 5, 7, 9, 11), a concentração de biossurfactante (1000, 2000, 4000, 6000 e 8000 g/t), e a concentração de depressor (100, 300, 600, 900 e 1200 g/t) na recuperação e teor de Fe. Além disso, foram realizados testes de flotação em circuito (*rougher*, *cleaner*, *scavenger*) visando aumentar a recuperação e teor de Fe. A concentração micelar crítica (CMC) do biossurfactante foi alcançada na concentração de 1 g/L. A recuperação de hematita foi possível em pH 3. De acordo com os estudos de espectroscopia no infravermelho e o potencial zeta houve interação entre o biossurfactante, e o silicato de sódio na superfície da hematita. A recuperação e teor de Fe na microflotação foi em torno de 37% para uma concentração de biossurfactante de 6000 g/t em pH 3. A recuperação e teor de Fe na flotação em bancada (*rougher*) foi de aproximadamente 28,50% e 44% respectivamente, para uma concentração de biossurfactante de 2000 g/t em pH 3, também foram realizados testes em presença de silicato de sódio (600 g/t) obtendo aproximadamente 50,5% de recuperação metalúrgica e 58% de teor de Fe. Além disso, foram feitos ensaios em circuito de flotação (*rougher*, *cleaner* e *scavenger*) alcançando uma recuperação e teor de Fe em torno de 44 % e 65%,

respectivamente. Os resultados obtidos mostraram o potencial uso do biossurfactante como coletor na flotação da hematita do rejeito de minério de ferro, podendo futuramente ser aplicado na indústria mineral substituindo os coletores convencionais com o avanço dos estudos.

Palavras-chave

Flotação; *Rhodococcus opacus*; hematita; biossurfactante; rejeito.

Abstract

Pereira, Andreza Rafela Moraes; Torem, Mauricio Leonardo (Advisor). **Hematite flotation from the iron ore tailing with the use of biosurfactant extracted from the bacteria *Rhodococcus opacus***. Rio de Janeiro, 2019, 114p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of biosurfactants derived from bio-based feedstocks which present several advantages over conventional surfactants such as low toxicity, high degradation kinetics, versatility in mineral flotation, it can act as a collector or frother agent. The present work aims to evaluate the use of biosurfactant extracted from bacteria *Rhodococcus opacus* in the hematite concentration of the iron ore tailings. Firstly, characterization studies of the samples were carried out (granulometric, chemical and mineralogical analysis). Measurements of Zeta Potential, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) were also carried out to evaluate the interaction of the biosurfactant and sodium silicate on the mineral surface (hematite). The physicochemical properties of biosurfactant were determined by surface tension. Different microflotation studies (Patridge-Smith cell) and batch (CDC mechanical cell) were carried out to evaluate the pH (2, 3, 7, 9, 11), the biosurfactant concentration (1000, 2000, 4000, 6000 and 8000g/t), and the depressor concentration (100, 300, 600, 900 and 1200 g/t) on recovery and Fe grade. In addition, flotation circuit tests (*rougher, cleaner, scavenger*) were carried out aiming to increase recovery and Fe grade. The critical micellar concentration (CMC) of the biosurfactant was reached at a concentration of 1 g/L. Hematite recovery was possible at pH 3. According to the studies of infrared spectroscopy and zeta potential, there was interaction between the biosurfactant, the sodium silicate on the hematite surface. The Fe recovery and Fe grade in the microflotation was around 37% for 6000 g/t biosurfactant concentration at pH 3. The Fe recovery and Fe grade in the batch flotation (*Rougher*) was approximately 28.50% and 44%, respectively for 2000 g/t biosurfactant concentration at pH 3, tests were also performed in the presence of sodium silicate (600 g/t) obtaining around 50.50% Fe recovery and 58% Fe grade. Furthermore, flotation circuit tests (*rougher, cleaner and scavenger*) were carried out, achieving a Fe recovery and Fe grade around 44% and 64.8%, respectively. Therefore, the results showed the potential use of the biosurfactant as a collector in the hematite

flotation from the iron ore tailings, it may be applied in the mining industry in the future, replacing conventional collectors with the advancement of the studies.

Keywords

Flotation; *Rhodococcus opacus*; biosurfactant; hematite; tailings.

Sumário

1 Introdução	17
2 Justificativa e relevância do trabalho	19
3 Objetivos	20
3.1. Objetivo geral	20
3.2. Objetivos específicos	20
4 Revisão bibliográfica	21
4.1. Minério de Ferro	21
4.1.1. Aspectos gerais	21
4.1.2. Beneficiamento de minério de ferro	22
4.1.3 Rejeito de minério de ferro	23
4.2. Flotação	24
4.2.1. Dupla camada elétrica	26
4.2.2. Potencial Zeta	27
4.2.3. Ângulo de contato	28
4.2.4. Tensão superficial	29
4.2.5. Reagentes de flotação	31
4.3. Rotas de flotação de minério de ferro	36
4.3.1. Flotação aniônica direta	37
4.3.2. Circuito de flotação	37
4.4. Biotecnologia	38
4.4.1. Bioflotação	39
4.4.2. <i>Rhodococcus opacus</i>	40
4.4.3. Biossurfactantes	43
5 Materiais e métodos	48
5.1. Preparação e caracterização das amostras	48
5.2. Cultivo e crescimento da <i>Rhodococcus opacus</i>	50
5.3. Extração do biossurfactante	51
5.4. Medidas de tensão superficial	52
5.5. Medidas de potencial zeta	53

5.6. Espectroscopia no infravermelho (FTIR)	54
5.7. Ensaio de flotação	55
5.7.1. Ensaio de flotação na célula Partridge-Smith	56
5.7.2. Ensaio de flotação em bancada – Célula mecânica CDC	57
6 Resultados e discussões	58
6.1. Análise química e mineralógica do minério de ferro	58
6.2. Medidas de tensão superficial	59
6.2.1. Efeito da concentração do biosurfactante	59
6.2.2. Efeito do pH	61
6.3. Medidas de potencial zeta	62
6.4. Espectroscopia no Infravermelho – FTIR	66
6.5. Ensaio de flotação	72
6.5.1. Ensaio preliminares de flotação – célula Partridge-Smith	72
6.5.2. Ensaio de flotação em bancada – célula mecânica CDC	76
6.6.3 Circuito de flotação	79
7 Conclusões	81
8 Referências bibliográficas	83
9 Anexos	94

Lista de figuras

Figura 1 – Flotação em célula mecânica Denver (Adaptado de Wills & Finch, 2016).	25
Figura 2 - Ilustração do modelo de dupla camada elétrica (Adaptado de Júnior & Varanda, 1999).	27
Figura 3 - (a) Partícula aderida na bolha, e (b) representação clássica do ângulo de contato e das forças de tensões superficiais (Adaptado de Wills & Finch, 2016).	28
Figura 4 - Balanço de forças na interface e no seio de um líquido (Pirôllo, 2006).	30
Figura 5 – Formação da concentração micelar crítica (Adaptado de Akbari et al., 2018).	30
Figura 6 – Adsorção do coletor na superfície mineral mostrando a orientação da cadeia hidrocarbônica e do grupo funcional da molécula heteropolar (Adaptado de Wills e Finch, 2016).	32
Figura 7 – Classificação dos coletores iônicos (Adaptado de Wills & Finch, 2016).	32
Figura 8 - Diagrama de distribuição de aniões de silicato em função do pH em a) 1×10^{-3} mol/L e b) 10×10^{-3} mol/L solução aquosa de metassilicato de sódio (Adaptado de Yang et al., 2008).	35
Figure 9 – Modelo de organização da célula <i>rhodococcal</i> (Adaptado de Minnikin, 1991).	42
Figura 11 – Fluxograma das etapas de preparação do rejeito do minério de ferro.	49
Figura 12 – Cultivo da bactéria <i>Rhodococcus opacus</i> em meio sólido após 72 horas.	50
Figura 13 – A) Inoculação das bactérias no meio líquido, B) Crescimento bacteriano.	51
Figura 14 – Fluxograma simplificado de extração do biossurfactante (Adaptado de Puelles, 2016).	52
Figura 15 – Tensiômetro DC 200.	53
Figura 16 – Aparelho do potencial Zeta-Malvern Zetasizer.	54
Figura 17– Espectrofotômetro FT-IR Scientific Nicolet 6700.	55
Figura 18 – Linha experimental da microflotação. A) Célula de flotação	

Partridge-Smith B) pHmetro, C) bomba de vácuo-compressor, D) Agitador magnético E) Rotâmetro.	56
Figura 19 – A) Célula mecânica de flotação CDC.	57
Figura 21 – Curva de distribuição granulométrica do rejeito do minério de feita por peneiramento à úmido, partículas variando de +150 μm - 20 μm .	59
Figura 23 – Efeito do pH na tensão superficial da água a 21 ± 2 °C e concentração de biossurfactante 0,16 g/L.	61
Figura 24 – Perfis do potencial zeta da hematita em diferentes concentrações de eletrólito indiferente (KCl), tamanho de partículas < 10 μm .	62
Figura 26 - Perfis do potencial zeta da hematita antes e após a interação com o silicato de sódio, tamanho de partula: <10 μm , [KCl]: 10^{-3} mol/L.	65
Figura 27 – Espectro do FTIR da hematita.	66
Figura 28 – Espectro do FTIR do biossurfactante.	67
Figura 29 – Espectro do FTIR do silicato de sódio.	68
Figura 30 – Espectro do FTIR da Hematita após interação com o biossurfactante.	69
Figura 31 – Espectro do FTIR da Hematita antes e após interação com o silicato de sódio.	70
Figura 32 - Espectro do FTIR do quartzo antes e após a interação com o biossurfactante.	71
Figura 33 - Espectro do FTIR do quartzo antes e após a interação com o silicato de sódio.	72
Figura 34 - Efeito do pH sobre a recuperação metalúrgica e teor do Fe (concentração de biossurfactante de 4000 g/t) utilizando a célula Partridge-Smith, tamanho de partículas +150 μm -20 μm , tempo de flotação 5 min, tempo de condicionamento 5 min.	73
Figura 35 – Efeito da concentração do biossurfactante sobre a recuperação metalúrgica e teor do ferro em pH 3 utilizando a célula Partridge-Smith, tamanho de partículas +150 μm -20 μm , tempo de flotação 5 min, tempo de condicionamento 5 min.	74
Figura 37 – Efeito da concentração do biossurfactante na flotação de rejeito de minério do ferro utilizando célula mecânica CDC, tamanho de partículas +150 μm -20 μm , tempo de flotação 5 min, tempo de condicionamento 5 min.	77
Figura 38 - Efeito da concentração do silicato de sódio na flotação de rejeito de minério de ferro, utilizando célula mecânica CDC, solução de	

silicato de sódio a 5% (p/v), tamanho de partículas +150 μm -20 μm , tempo de flotação 5 min, tempo de condicionamento 5 min. 78

Figura 39 - Concentrado e o rejeito após a etapa *cleaner* do teste 1 do circuito de flotação. 79

Lista de tabelas

Tabela 1 - Mineralogia dos diferentes tipos composicionais de formações ferríferas (Adaptado de Rosière & Chemale jr, 2000).	22
Tabela 2 - Classificação dos biossurfactantes produzidos por diferentes microorganismos (Adaptado de Fleurackers, 2015).	44
Tabela 3 –Aplicações de biossurfactante como reagentes na flotação.	47
Tabela 4 - Tamaho de partícula usados em diferentes estudos.	49
Tabela 5 – Componentes utilizados para o meio de cultura líquido e sólido utilizado para o crescimento da bactéria <i>Rhodococcus opacus</i> .	50
Tabela 6 - variáveis e os parâmetros estudados nos testes de flotação.	55
Tabela 7 – Análise química por FRX e volumétrica do rejeito de minério de ferro.	58
Tabela 8 – Condições e resultados do circuito de flotação na célula mecânica de flotação CDC em pH 3, tamanho de partículas +150 µm -20 µm, tempo de flotação 5 min., Tempo de condicionamento 5 min.	80

Lista de símbolos

θ :	ângulo de contato	graus
CMC:	concentração micelar crítica	mg/L
DCE:	dupla camada elétrica	
γ_{GL} :	interface gás/líquido	N/m
γ_{SL} :	interface sólido/líquido	N/m
γ_{LG} :	interface líquido/gás	N/m
IDP:	íons determinadores de potencial	
Z :	potencial zeta	mV
PCZ:	ponto de carga zero	mV
PIE:	ponto isoelétrico	mV

1

Introdução

As jazidas com altos teores de minério de ferro estão diminuindo com o progresso das atividades de mineração e com o aumento na escala de produção. Este fato vêm gerando maiores volumes de rejeitos com remanescentes de reagentes sintéticos tóxicos provenientes do beneficiamento mineral, além de ocupar grandes espaços e causar problemas ambientais e ecológicos (Pattanaik & Venugopal, 2018). Diante desse panorama, uma crescente preocupação ambiental tem surgido, levando ao reaproveitamento dos rejeitos de mineração, quer fazendo o uso de novas tecnologias para o beneficiamento desses rejeitos ou pela utilização dos mesmos para outras aplicações industriais.

À vista disso, pesquisas no campo biotecnológico vêm sendo desenvolvidos visando a utilização de biossurfactantes capazes de substituir surfactantes sintéticos usados na flotação mineral. Os biossurfactantes são substâncias com caráter anfipático assim como os surfactantes sintéticos, porém, produzidos por microorganismos como bactérias, leveduras e fungos em diferentes fontes de carbono (Bezerra, 2012; Migliorelli, 2003). Em geral, os biossurfactantes apresentam uma porção hidrofóbica e outra hidrofílica. A porção hidrofílica pode conter grupos como éster, hidroxil, fosfato, carboxila ou um carboidrato na forma neutra ou negativamente carregado (Maier, 2003). A parte hidrofóbica usualmente é formada por longas cadeias de ácidos graxos, na forma saturada ou insaturada, hidroxilada, linear ou ramificada (Lang, 2002).

Essas variadas propriedades funcionais levam os biossurfactantes a terem aplicações em diversas áreas da indústria, por exemplo, na biorremediação de águas e solos, limpeza de resíduos de óleos pesados no fundo de tanques de estocagem (Nitschke & Pastore, 2002; Bezerra, 2012). Na indústria de cosméticos os biossurfactantes são usados como emulsificantes, agentes espumantes, solubilizantes em produtos como xampu anticaspas, repelentes, cremes faciais, entre outros (Prommachan, 2002; Makkar & Cameotra, 2002; Bezerra, 2012). Na indústria alimentícia, atuando no controle de consistência, solubilização e emulsificação em produtos de padaria e sonequaria (Kosaric, 2001).

Na flotação mineral estudos desenvolvidos comprovam que os biossurfactantes podem agir como potenciais coletores ou espumantes por apresentarem compostos químicos em sua composição que podem modificar a superfície mineral. Além disso, os biossurfactantes possuem uma alta cinética de degradação em comparação aos surfactantes convencionais, podendo futuramente substituir os coletores químicos utilizados atualmente (Zouboulis et al., 2003; Khoshdast et al., 2012; Puelles, 2016; Oliveira, 2018).

Alguns dos estudos já realizados comprovaram o potencial uso de biossurfactantes na flotação, por exemplo, Khoshdast et al., 2012 utilizaram biossurfactantes ramnolipídicos produzidos por *Pseudomonas aeruginosa* como agente de formação de espuma na flotação de minérios de cobre. Didyk & Sadowski (2012) utilizaram biossurfactantes produzidos por *Bacillus circulans* e *Streptomyces sp.* para a flotação de serpentinito e quartzo. Puelles (2016) avaliou o biossurfactante extraído da estirpe bacteriana *Rhodococcus opacus* como biocoletores da hematita utilizando tubo de Hallimond.

Portanto, o presente trabalho estuda o uso do biossurfactante proveniente da estirpe bacteriana *Rhodococcus opacus* como coletor da hematita na flotação direta do rejeito de minério de ferro.

2

Justificativa e relevância do trabalho

A preocupação com a questão ambiental tem-se intensificado na indústria de modo geral, na mineração não poderia ser diferente. O aumento da exaustão de jazidas de alto teor de minério de ferro vem impulsando o estudo e aplicação de novas tecnologias, em especial de tecnologias sustentáveis para o reaproveitamento de rejeitos e a possibilidade de substituição de reagentes sintéticos de flotação. Os rejeitos e os remanescentes de reagentes de flotação provocam impactos irreversíveis ao meio ambiente.

As pesquisas desenvolvidas na área de biotecnologia apontam que os biossurfactantes com suas diversas propriedades funcionais incluindo atividade superficial, emulsificação e formação de espuma podem atuar como modificadores das superfícies minerais no processo de flotação. Devidos a essas características apresentadas, os biossurfactantes podem substituir alguns dos surfactantes sintéticos utilizados na flotação industrial. Além disso, o uso de biossurfactantes nos processos de flotação pode representar uma alternativa promissora devido a sua baixa toxicidade e alta cinética de degradação.

Nesse sentido, o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro mediante bioflotação com o uso de biossurfactante obtido da bactéria *Rhodococcus opacus* apresenta-se como uma alternativa biotecnológica relevante para a indústria mineral. Outra importância desse estudo é a realização dos testes de flotação em célula mecânica Denver visando uma futura aplicação industrial.

3

Objetivos

3.1.

Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o uso do biosurfactante obtido a partir da bactéria *Rhodococcus opacus* como coletor da hematita na flotação direta do rejeito de minério de ferro.

3.2.

Objetivos específicos

- Análise das propriedades eletroforéticas da hematita antes e após a interação com o biosurfactante (biocoletor) e o silicato de sódio (depressor);
- Análise dos grupos funcionais presentes no quartzo e na hematita antes e após a interação com o biosurfactante e o silicato de sódio, empregando a técnica de espectroscopia no infravermelho (FTIR);
- Análise da tensão superficial do biosurfactante;
- Avaliação das variáveis operacionais e identificação das condições mais favoráveis à aplicação no processo de flotação direta do rejeito de minério de ferro com o uso do biosurfactante (biocoletor) e silicato de sódio (depressor).

4

Revisão bibliográfica

4.1.

Minério de Ferro

4.1.1.

Aspectos gerais

Conforme o aumento da ocupação do território e o conhecimento geológico, novas descobertas de depósitos minerais metálicos foram feitas, e alguns elementos entre eles o ferro, passaram a ter maior importância. Tais descobertas tiveram impacto relevante na economia nacional e foram fundamentais para fomentar o processo de industrialização brasileiro (DNPM, 2016).

O minério de ferro é o principal produto mineral no Brasil, correspondendo a 64,8% das exportações e responsável por 67,7% das receitas da CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais) no primeiro semestre de 2018, os estados com destaque expressivo na participação nesse montante são Minas Gerais e Pará (ANM, 2018). Dois grupos principais de minério de ferro são comumente encontrados no Brasil. O grupo dos Itabiritos: minérios de baixo teor e quimicamente mais heterogêneos, e o grupo dos hematíticos: minérios de alto teor e quimicamente mais homogêneos. (D'ávila, 2015).

O Quadrilátero Ferrífero (QF) situado na região sudeste de Minas Gerais compreende uma área de cerca de 7000 km². A maior parte do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero é hospedado nas Formações Ferríferas Bandadas (FFBs) da Formação Cauê, chamados itabiritos. As FFBs são depósitos sedimentares alterados com rochas laminadas formadas por camadas alternadas de sílica e hematita-magnetita, bem como carbonatos e silicatos de ferro (Carlos et al., 2014). Os seguintes tipos de formações ferríferas que podem ser reconhecidos como itabiritos, hematita filitos, Fe – dolomitos e filitos piritosos (Tabela 1).

Tabela 1 - Mineralogia dos diferentes tipos composicionais de formações ferríferas (Adaptado de Rosière & Chemale jr, 2000).

Tipos de formação ferrífera	Componentes mineralógicos principais
Itabirito comum	Hematita, martita, kenomagnetita, quartzo
Itabirito dolomítico	Martita, hematita, kenomagnetita, dolomita ferroana
Itabirito anfibolítico	Martita, hematita, kenomagnetita, maghemita, grunerita-cummingtonita, tremolita, actinolita, quartzo
Hematita - filito	Hematita, sericita
Filito piritoso	Pirita, matéria carbonosa

- Itabiritos são formações ferríferas bandadas metamórficas, deformadas e oxidadas;
- Hematita filitos ocorrem como lentes constituídas de sericita (+/- clorita) e hematita na base da Formação Cauê, no contato com a Formação Batatal. Localmente ocorrem lentes de hematita compacta intercaladas;
- Filitos piritosos são filitos carbonosos com níveis e lentes ricas em sulfetos de espessura milimétrica.

De modo geral, os minerais que têm em sua composição o ferro e apresentam interesse econômico para a indústria estão na forma oxidada, sendo os mais utilizados a hematita (Fe_2O_3 , contêm 69,9% de Fe) e magnetita (Fe_3O_4 , contêm 72,4% de Fe) (D'ávila, 2015; Andrade et al., 2016).

4.1.2. Beneficiamento de minério de ferro

O minério de ferro ao ser explotado não se encontra adequado para a utilização industrial, sendo necessário a etapa de beneficiamento mineral. O beneficiamento mineral pode abranger etapas como cominuição (britagem e moagem), para uma redução de tamanho das partículas, separação por tamanho através do peneiramento e classificação (ciclonagem, classificação em espiral) e métodos de concentração (gravítica, eletro-magnética, eletrostática, por flotação)

(Bezerra, 2017). Sendo a flotação um dos processos de concentração mais empregados para a separação seletiva de minério de ferro. A escolha das etapas pelo qual o minério de ferro vai ser submetido vai depender de vários fatores, por exemplo, teor do minério, composição química, associação mineralógica, características físico-químicas do minério, tamanho de partícula e grau de liberação (Hacha, 2016). Após o beneficiamento mineral, os rejeitos que não apresentam valor econômico agregado são dispostos em barragem de rejeitos.

4.1.3

Rejeito de minério de ferro

Na atividade de mineração são gerados grandes volumes de dois tipos de resíduos, sendo eles:

- Estéreis: São os materiais escavados e movimentados durante as atividades de extração ou lavra no decapeamento e lavra da mina, não possuindo valor econômico e ficando geralmente dispostos em pilhas (Silva et al., 2011; Brasil, 2012; Fontes, 2013);
- Rejeitos: São resíduos resultantes dos processos de beneficiamento, sob a forma de polpa ou lama, que são dispostos em reservatórios, conhecidos como barragens de rejeito (Silva et al., 2011; Brasil, 2012; Fontes, 2013).

O rejeito de minério de ferro é composto principalmente de óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), ferro (Fe), manganês (Mn), enxofre (S) e de fosfatos (PO_4^{-3}) (Yang et al., 2014).

Na indústria mineral utiliza-se a seguinte classificação para os rejeitos:

- Rejeitos grossos ou granulares, tamanho de partículas maiores do que 50 μm ;
- Rejeitos finos, com tamanho de partículas abaixo de 50 μm ;
- Lamas ou rejeitos ultrafinos, constituídos por tamanho de partículas menores que 10 μm (Wolff, 2009).

Os rejeitos gerados no processo de tratamento do minério podem apresentar um teor considerável do mineral de interesse. Isto pode acontecer devido a ineficiência no processo de beneficiamento, caracterizando uma baixa recuperação (Wolff, 2009).

A crescente preocupação com a conservação ambiental tem levado cada vez mais ao beneficiamento de minérios de teores mais pobres e ao

reaproveitamento de rejeitos de mineração ou a reutilização dos mesmos para outras aplicações industriais (Gomes, 2009).

Diferentes estudos foram realizados visando o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro. Bezerra (2017) caracterizou a lama de rejeito de minério de ferro, proveniente da barragem de Conceição/MG, e avaliou o comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento com adição de rejeito de minério de ferro. A utilização do rejeito de minério de ferro possibilitou avaliar seu desempenho em matrizes cimentícias, assim, com as avaliações apresentadas os resultados mostram que o rejeito de minério de ferro apresenta potencial do seu emprego como adição do tipo *filler* no cimento.

Por outro lado, Castro e Peres (2013) estudaram a recuperação de ferro a partir de rejeitos de beneficiamento de minérios de ferro para a produção de concentrado de minério de ferro dentro das especificações de *pellet feed* da Samarco. Os ensaios de deslamagem e flotação se mostraram eficiente apresentando teor de sílica compatível com o exigido para *pellet feed*.

Martins et al. (2015) estudaram o processamento de rejeito proveniente do circuito de flotação de minério de ferro da mina Cauê, o objetivo desse estudo foi avaliar os variados sistemas de reagentes e o aumentar o teor do rejeito de minério de ferro.

Uma possível aplicação de rejeitos de minério de ferro em pavimentos foi mostrada mediante um estudo de um material de rejeito de barragem, o estudo mostrou um grande potencial de uso do rejeito de minério de ferro como material de enchimento alternativo, denominado filler, para concretos asfálticos. A incorporação deste material nas misturas asfálticas demonstrou desempenho mecânico satisfatório com ganhos de natureza ambiental quando comparados aos agregados pétreos (Silva, 2010).

4.2.

Flotação

Flotação é um processo de separação que explora as diferentes características das superfícies minerais (Peres & Araujo, 2006). Um processo físico-químico que permite a separação das partículas minerais de interesse da ganga para obtenção final de um concentrado com um teor elevado do mineral desejado (Oliveira, 2018). Para intensificar as diferenças nas propriedades de superfície dos minerais é necessário o auxílio de reagentes modificadores de superfície (coletores, depressores, espumantes, dispersantes, reguladores de

pH), sendo esses necessários para a seletividade da flotação (Bulatovic, 2007; Abaka-Wood et al., 2018).

O processo de flotação envolve três fases: sólido (mineral), líquido (água) e gás (ar). A flotação do mineral de interesse acontece quando as partículas minerais hidrofobizadas colidem com as bolhas de ar; ocorrendo a adesão e formação do agregado bolha-partícula, e por fim, o transporte do agregado para a superfície do líquido, onde as partículas são coletadas (Medeiros & Baltar, 2018) como mostra a Figura 1.

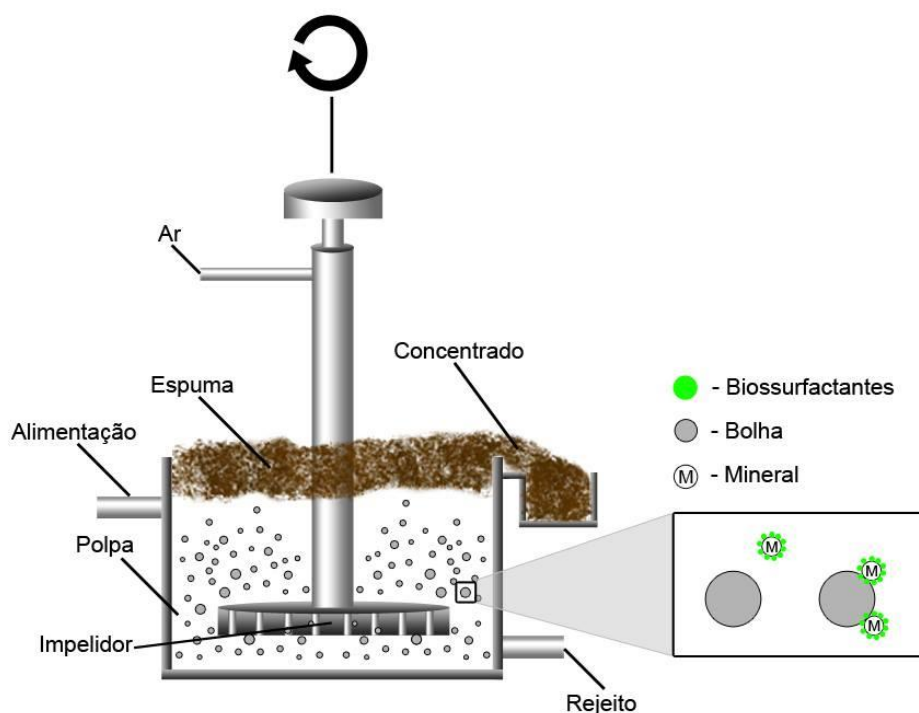


Figura 1 – Flotação em célula mecânica Denver (Adaptado de Wills & Finch, 2016).

O sucesso do processo de flotação depende de vários fatores diferentes, como tamanho da bolha, tamanho da partícula, velocidade da bolha, velocidade da partícula, densidade da polpa. Dependendo também das características químicas da superfície mineral, pH da suspensão, carga superficial, e forças de tensão superficial. (Harvey et al., 2005; Hunter et al., 2008; Farrokhpay, 2011; Hacha, 2016).

4.2.1.

Dupla camada elétrica

A explicação dos fenômenos ligados à carga superficial de uma fase sólida em contato com um líquido, foi possibilitada pela teoria da dupla camada elétrica (DCE) (Salopek, 1992). A formação da DCE acontece com a imersão de uma partícula em uma solução aquosa que produz uma região de inomogeneidade elétrica na interface sólido-líquido. Um excesso de carga (positiva ou negativa) aparentemente fixa na superfície sólida é equilibrada por uma região difusa de carga oposta (denominada contra-íons) (Fuerstenau & Pradip, 2005).

A Figura 2 representa a superfície mineral e a dupla camada elétrica formada em interface sólido-líquido. Este modelo é conhecido como o modelo de Stern da dupla camada elétrica. Os íons que são quimissorvidos na superfície mineral estabelecem a carga superficial e são conhecidos como íons determinadores de potencial (IDP). E, esses íons podem ser íons hidrogênio, íons hidroxila, íons coletor que formam sais insolúveis na superfície mineral ou íons que formam íons complexos na superfície mineral (Kelly & Spottiswood, 1982).

O plano que transpassa o centro de carga dos contra-íons ancorados próximo da superfície é chamado de plano de Stern, a camada de contra-íons ancorados próximo da superfície é chamada de camada de Stern, devido à presença desses íons de carga oposta há uma queda brusca e linear no módulo do potencial elétrico em função da distância à superfície. Adjacente a camada de Stern encontra-se a camada difusa de contra-íons conhecida como camada de Gouy cujo potencial elétrico decai exponencialmente com a distância em relação à superfície carregada, com uma distância característica (k^{-1} , o comprimento de Debye) que é inversamente proporcional à força iônica do meio (Fuerstenau & Pradip, 2005). No limite entre a camada de Stern e a camada de Gouy existe o plano de cisalhamento que ocorre devido ao movimento da solução em relação a superfície mineral, ou seja, os íons na camada de Stern permanecem adsorvidos na superfície mineral, enquanto que os íons da camada de Gouy são transportados com a solução (Kelly & Spottiswood, 1982).

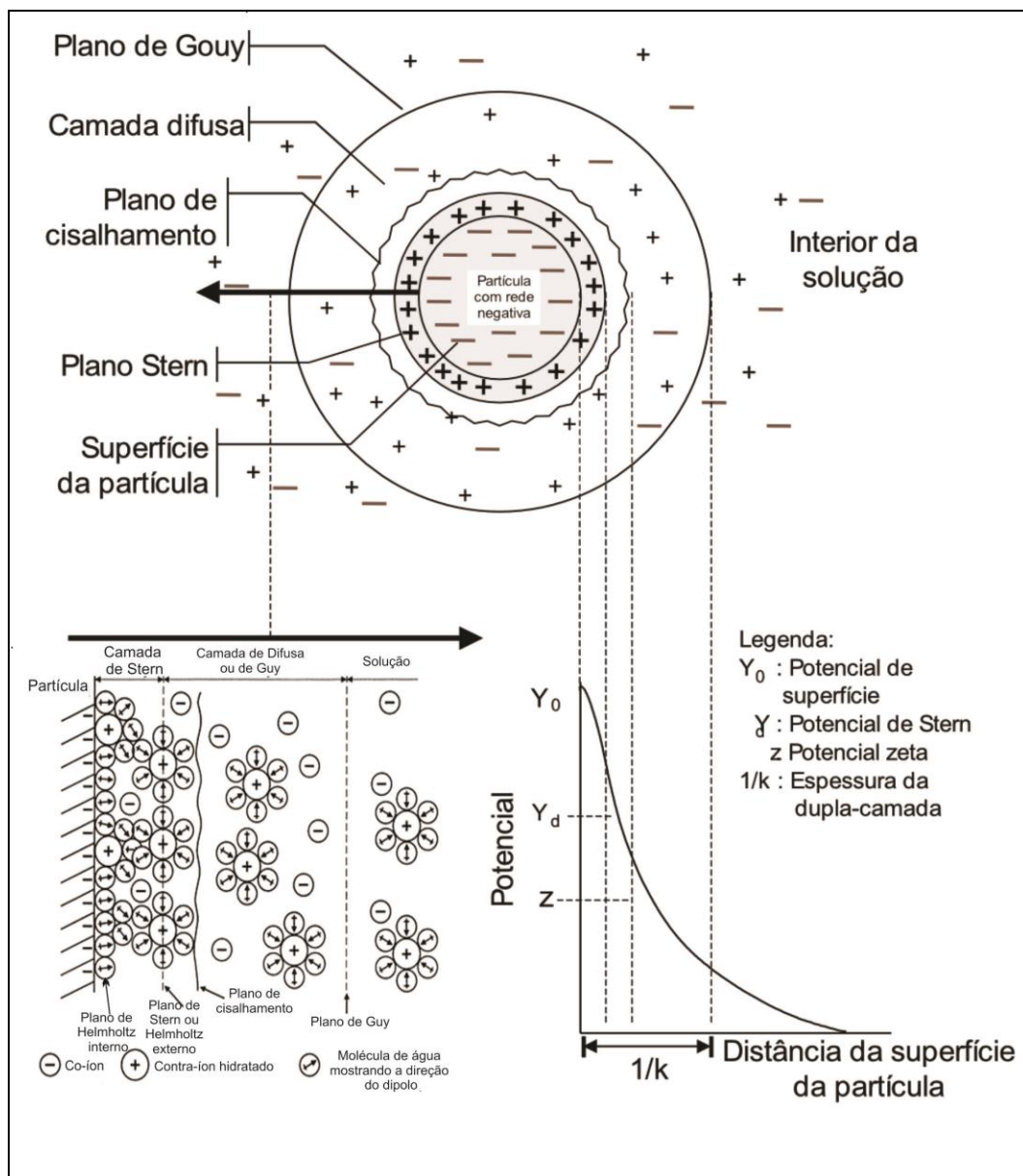


Figura 2 - Ilustração do modelo de dupla camada elétrica (Adaptado de Júnior & Varanda, 1999).

4.2.2. Potencial Zeta

Potencial zeta é o potencial elétrico no plano de cisalhamento quando o líquido é forçado a se mover em relação ao sólido, somente íons na camada difusa, fora do plano de cisalhamento são aqueles que estão envolvidos no processo eletrocinético. Todos os tipos de composições de carga na superfície no interior e exterior do plano de Stern podem apresentar o mesmo potencial zeta, dependendo do potencial de superfície, força iônica e adsorção específica (Fuerstenau & Pradip, 2005).

Uma técnica bem conhecida para medição de fenômenos eletrocinéticos a partir dos quais o potencial zeta pode ser determinado é a eletroforese, que é o processo pelo qual a aplicação de um campo elétrico faz com que partículas suspensas se movam através de um líquido e tem sido amplamente usada para investigação da adsorção de surfactantes na interface sólido/líquido de interesse para a flotação (Fuerstenau & Pradip, 2005).

A mobilidade das partículas está relacionada com a constante dielétrica do meio, com a viscosidade do líquido e com o potencial elétrico entre a partícula e o líquido em movimento. O potencial zeta assume valor nulo quando a carga líquida no plano de cisalhamento é nula, ou seja, o ponto isoelétrico (PIE) é o valor do logaritmo negativo da atividade dos íons determinadores de potencial correspondente ao valor do potencial zeta igual zero (Aguiar, 2014).

4.2.3. Ângulo de contato

O ângulo de contato é determinado por uma combinação de tensão superficial e forças externas (tipicamente gravidade) (Yuan & Lee, 2013). O ângulo de contato permite determinar o caráter hidrofóbico de uma partícula, podendo ser representado esquematicamente pela Figura 3 e sendo demonstrado pela Equação de Young (Equação 1).

A hidrofobicidade de um mineral aumenta com o ângulo de contato entre a interface sólido-gás, os minerais com alto ângulo de contato são considerados hidrofóbicos, ou seja, têm maior afinidade pelo ar do que pela água. Os minerais com baixo ângulo de contato são considerados hidrofílicos, tendo menor afinidade pela bolha de ar.

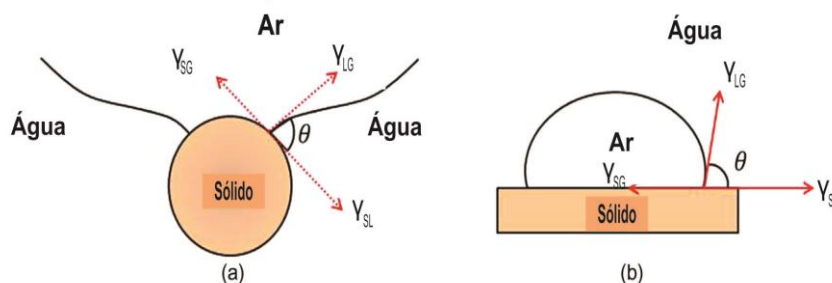


Figura 3 - (a) Partícula aderida na bolha, e (b) representação clássica do ângulo de contato e das forças de tensões superficiais (Adaptado de Wills & Finch, 2016).

A condição termodinâmica do equilíbrio entre as interfaces gás - sólido, líquido - sólido, gás - líquido, estabelece que as três energias livres interfaciais, ou tensões interfaciais, estão relacionadas pela equação de Young (Kelly & Spottiswood, 1982).

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad (1)$$

Onde:

γ_{SG} = Tensão interfacial sólido-gás (N/m)

γ_{SL} = Tensão interfacial sólido-líquido (N/m)

γ_{LG} = Tensão interfacial líquido-gás (N/m)

θ = Ângulo de contato entre as interfaces

A hidrofiliidade e/ou hidrofobicidade da superfície de uma partícula é importante, especialmente quando se considera a flotabilidade de um mineral de interesse e depressão do mineral de ganga associado. A interseção entre a interface líquido-sólido e a interface líquido-gás produz o ângulo de contato que define a hidrofobicidade de um mineral. Na flotação, partículas com ângulos de contato inferiores a 60° podem ser classificadas como hidrofílicas e podem precisar da ajuda de um coletor para serem separadas por flotação (Fuerstenau & Somasundaran, 2003; Wills & Napier-Munn, 2006; Yuan & Lee, 2013).

4.2.4. Tensão superficial

A tensão superficial é o trabalho (isotérmico e reversível) por uma unidade de área necessário para aumentar a área interfacial (Aguiar, 2014). Observa-se na Figura 4 que as moléculas no interior da fase líquida são atraídas por forças iguais, de todos os lados. Já as moléculas que se encontram na superfície têm uma força resultante no sentido do interior da fase líquida. Assim, a superfície tende a contrair-se espontaneamente fazendo com que o líquido assuma uma forma de menor área superficial (Aguiar, 2014).

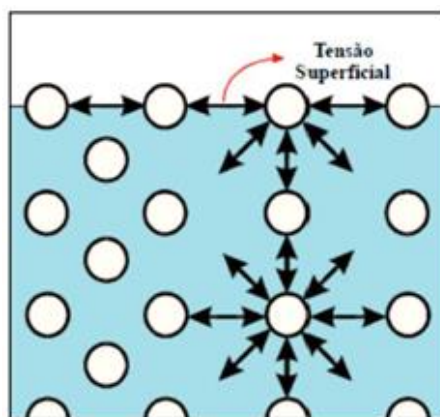


Figura 4 - Balanço de forças na interface e no seio de um líquido (Piróllo, 2006).

Os surfactantes podem provocar a redução da tensão superficial conforme as moléculas se arranjam na interface líquido/gás da superfície (Schambil e Schwuger, 1987; Braga et al., 2015). Esta redução da tensão superficial ocorre até um grau de compactação máximo do filme, a partir do qual ao invés de organizar-se na superfície, a espécie surfatante acrescentada à solução inicia a formação de agregados coloidais denominados micelas como mostrado na Figura 5. A concentração mínima para que isto é chamada de concentração micelar crítica (CMC), o valor da CMC pode sofrer influência de diversos aspectos como comprimento de cadeia, adição de eletrólitos ou ainda presença de impurezas (Rosen, 1989; Rao, 2004; Braga, 2015).

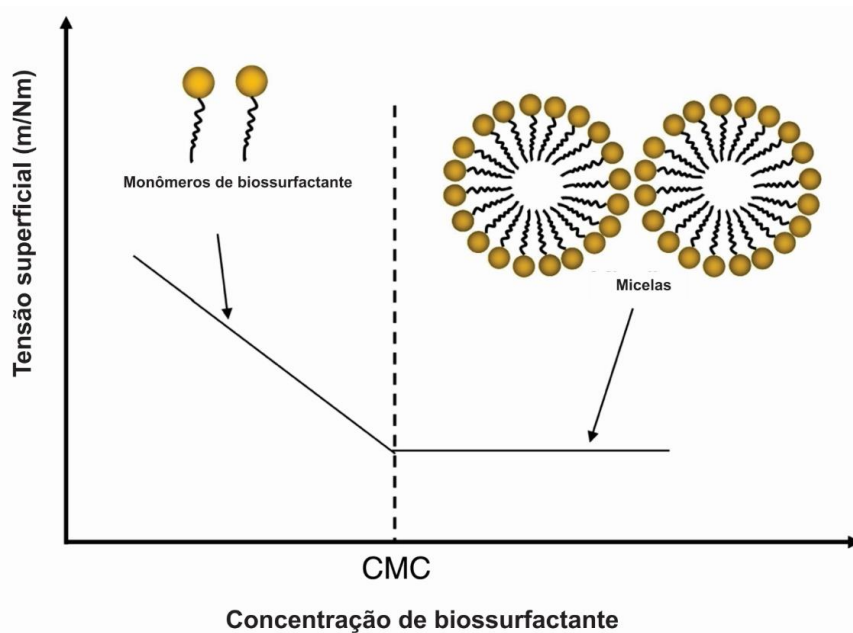


Figura 5 – Formação da concentração micelar crítica (Adaptado de Akbari et al., 2018).

Os biossurfactantes reduzem a tensão superficial e a tensão interfacial em soluções aquosas e misturas de hidrocarbonetos, agindo igualmente a surfactantes químicos (Das & Mukherjee, 2005; Szymanska & Sadowski, 2010). Biossurfactantes estudados por alguns autores como Oliveira (2018), Puelles (2016) e Rufino (2014) reduziram a tensão superficial de 72 mN/m até 25 mN/m.

Para a medição da tensão superficial existem vários métodos, entre os quais podemos mencionar, o método da placa Wilhelmy e o método do anel Du Noüy. Ambos são baseados na medição de força enquanto o valor é adquirido em equilíbrio quase termodinâmico (medição da tensão superficial estática) (Kramer et al., 2012).

4.2.5. Reagentes de flotação

Os reagentes utilizados na flotação têm várias funções são estas: coletores, depressores, espumantes, reguladores de pH, ativadores e dispersantes (Nascimento, 2010). Estes reagentes químicos são adicionados à polpa permitindo reforçar ou inibir as propriedades hidrofóbicas/hidrofílicas das espécies minerais. As proporções e tipos dos reagentes que são adicionados à polpa dependem das características mineralógicas das espécies minerais de interesse comercial (Dudenkov et al., 1980; Silva, 2016).

Os coletores são surfactantes que se adsorvem na superfície das partículas de uma determinada espécie mineral, que na grande maioria das vezes são hidrofílicas as transformam em hidrofóbicas. Em geral, os coletores são agentes tensoativos de estrutura heteropolar como apresentado na Figura 6. São moléculas anfipáticas ativas na superfície, do tipo R-Z (moléculas heteropolares) onde Z representa o grupo polar e R representa o grupo apolar. O grupo polar Z consiste em associações de dois ou mais átomos com ligações covalentes; este grupo possui um momento de dipolo permanente o que atribui a este grupo um caráter hidrofílico. O grupo apolar R é representado pelos hidrocarbonetos, não possuem dipolo permanente e representam a parte hidrofóbica da molécula anfipática (Leja 1983; Nascimento, 2010).

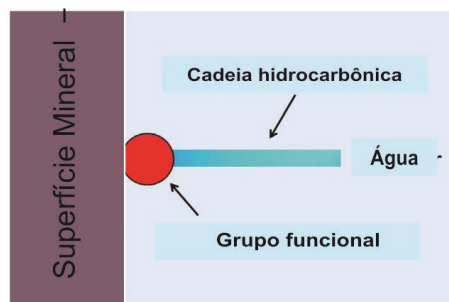


Figura 6 – Adsorção do coletor na superfície mineral mostrando a orientação da cadeia hidrocarbônica e do grupo funcional da molécula heteropolar (Adaptado de Wills e Finch, 2016).

A adsorção de coletores sobre a superfície mineral pode ocorrer pela atração eletrostática ou por interação química do coletor com os íons metálicos na superfície do mineral. Os dois primeiros mecanismos são fortemente influenciados pela dupla camada elétrica (Fuerstenau & Palmer, 1976). Na Figura 7 estão apresentados de forma resumida os tipos de coletores que podem ser classificados em aniônicos, catiônicos e não-iônicos, conforme a carga elétrica associada ao grupo polar, além de serem classificados conforme a estrutura do hidrocarboneto e do tipo específico do grupo polar.

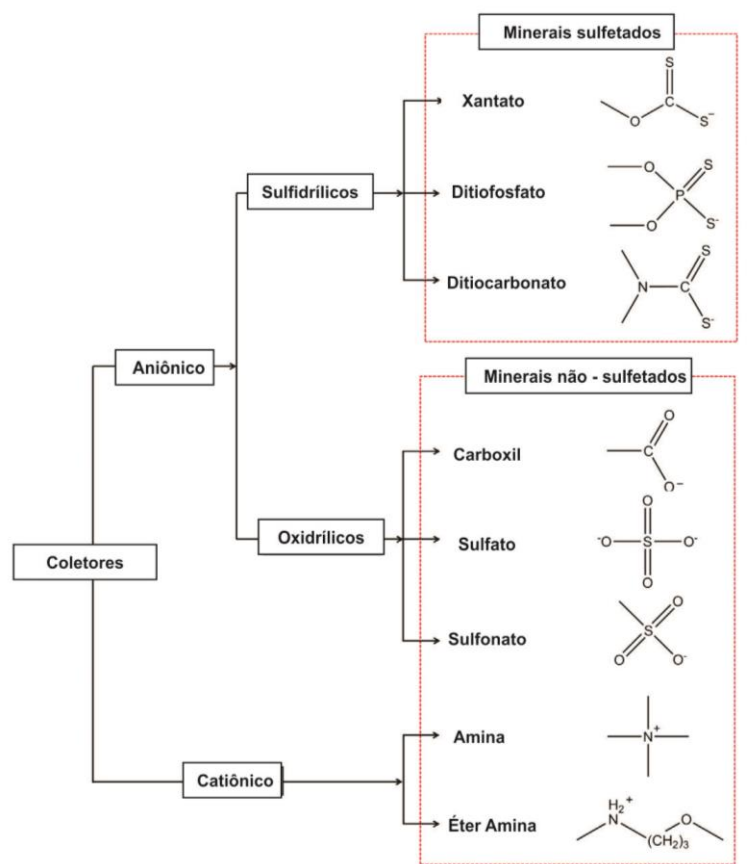


Figura 7 – Classificação dos coletores iônicos (Adaptado de Wills & Finch, 2016).

Coletores catiônicos

Os coletores catiônicos são representados pelas aminas e seus sais. As aminas são derivados da amônia pela substituição de um ou mais de seus átomos de hidrogênio por um número correspondente de grupos orgânicos. A classificação dada para as aminas depende do número de radicais hidrocarbônicos unidos ao átomo de nitrogênio (Baltar, 2010).

Na flotação de quartzo é comumente utilizado as éter-aminas ($R-(OCH_2)_3-NH_2$) parcialmente neutralizado com ácido acético. Esses coletores foram modificados com a inserção do grupo polar $(O-CH_2)_3$ entre o radical R e o grupo polar NH_2 da amina primária. Devido à presença da ligação covalente C-O característica do composto orgânico da função éter, os reagentes pertencentes a esta classe são conhecidas como éter-aminas (Araújo et al, 2005).

Coletores Aniônicos

Coletores aniônicos se diferenciam em dois tipos de acordo com a estrutura do grupo polar: sulfidrílicos e oxidrílicos. O grupo sulfidrílico refere-se ao grupo SH presente na forma indissociável do coletor. O termo tiol refere-se ao carbono ligado ao SH, isto é, $R-SH$ tanto o termo sulfidrílico como o tiol (tio) são utilizados para descrever essa classe de coletores. Eles são amplamente utilizados na flotação de minerais de sulfeto (Avotins et al., 1994; Wills & Finch, 2016). O outro tipo de coletores aniônicos é o oxidrílico (referindo-se para o grupo OH), e eles são usados principalmente na flotação de minerais não sulfetados.

Os ácidos graxos são os mais utilizados dentre os coletores aniônicos na flotação de minério de ferro (Trahar, 1963; Ma, 2012). Os ácidos graxos contêm de 8 a 18 carbonos em sua cadeia hidrocarbônica. Similar as aminas, os ácidos graxos são também eletrólitos fracos em solução aquosa logo, sua ionização depende do pH da solução. Em solução aquosa os ácidos graxos se dissociam liberando os íons hidrônio (Equação 2).



Para melhorar a solubilidade dos coletores carboxílicos e assegurar uma eficiente hidrofobização superficial saponifica-se os ácidos carboxílicos,

geralmente usando o hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio. A adsorção física desse coletor não é quase observada pois em meio ácido, quando a maioria dos minerais está abaixo do seu ponto isoelétrico, ou seja, com cargas superficiais positivas, o íon carboxílico reage com o hidrogênio e volta a sua fórmula molecular perdendo a capacidade de adsorver-se por atração eletrostática. Assim sendo, a ação dos coletores carboxílicos ocorre por adsorção química (Baltar, 2010).

Depressores

A depressão de minerais é usada para aumentar a seletividade da flotação tornando certos minerais hidrofílicos evitando assim sua flotação. Eles são fundamentais para a concentração econômica de muitos minérios. O depressor pode atuar mediante diferentes mecanismos, atuando sozinho ou em combinação, podendo tornar as espécies hidrofílicas ou bloqueando a adsorção de coletores. (Wills & Finch, 2016).

Segundo Baltar (2010) os depressores são divididos em duas classes: inorgânicos, orgânicos. Compostos orgânicos são divididos em polissacarídeos (amidos, dextrinas, carboximetilcelulose (CMC) e derivados). Os amidos são os depressores universais dos óxidos de ferro na flotação de minérios de ferro. (O amido pode ser extraído de várias espécies vegetais, como milho, mandioca, batata, trigo, arroz, araruta, etc.). No Brasil, o amido de milho tem sido usado na flotação de minério de ferro desde 1978 (Araújo, 2005).

Podemos mencionar alguns exemplos de depressores inorgânicos, tais como o silicato de sódio utilizado na depressão do quartzo na flotação direta de minério de ferro, sulfeto de sódio, cromato e dicromato de potássio, cianeto de sódio e hidrosulfuretos. Neste trabalho, será utilizado silicato de sódio como depressor do quartzo e detalhado no seguinte item.

Silicato de sódio

O silicato de sódio ($n\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$) é composto por dióxido de silício e óxido de sódio, e é utilizado como depressor ou dispersante de ganga silicatada mais usado na flotação aniônica direta (Silva, 2011). O processo de depressão do quartzo pelo silicato não é completamente compreendido (Qi et al., 1993). Segundo Ma (2012), o silicato de sódio se hidrolisa em meio aquoso produzindo várias espécies aniônicas, como pode ser visto no diagrama de distribuição em

diferentes pH apresentado na Figura 8. A variação dessas espécies de silicato de sódio depende da sua concentração, do pH, da temperatura e taxa de $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$. O efeito do depressor também pode variar de acordo com esses fatores.

Silva et al. (2013) explicaram que a principal razão para a dificuldade no entendimento do mecanismo de ação do silicato de sódio é a complexidade do processo de hidrólise que gera uma variedade de espécies iônica e coloidal: silicato coloidal SiO_2 (insolúvel), espécies monoméricas $\text{Si}(\text{OH})_4$, $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$

$\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$, HSiO_3^- e espécies de sílica polimérica $\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_6^{2-}$, $\text{Si}_2\text{O}_3(\text{OH})_4^{2-}$, entre outras.

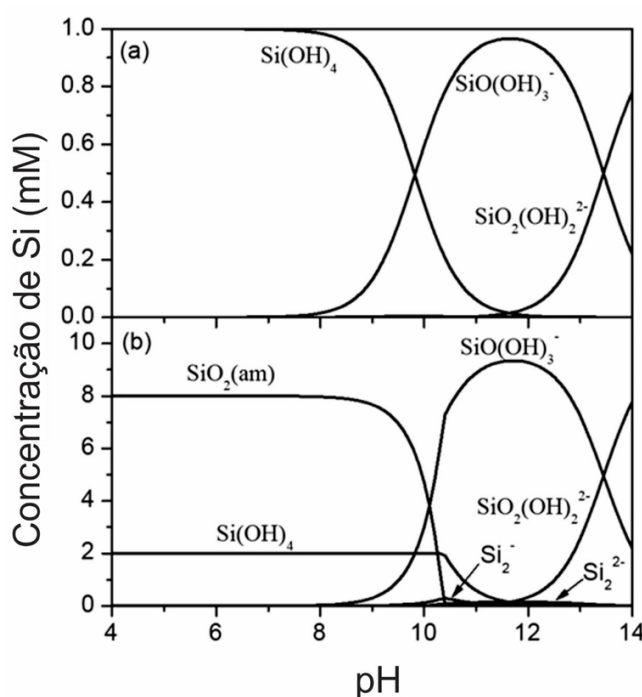


Figura 8 - Diagrama de distribuição de aniões de silicato em função do pH em a) 1×10^{-3} mol/L e b) 10×10^{-3} mol/L solução aquosa de metassilicato de sódio (Adaptado de Yang et al., 2008).

Segundo Fuerstenau & Somasundaran (2003) a máxima eficiência do silicato de sódio como depressor de ganga silicatada foi observada em pH 7 a 10. Outros estudos também afirmaram que em meio básico o silicato de sódio age como depressor de ganga silicatada como Silva et al. (2013) estudaram a ação do silicato de sódio na depressão da calcita e quartzo. Os autores observaram a ação depressora dos minerais com o aumento da concentração de silicato de sódio. Em concentrações acima de 1.500 g/t, a depressão alcançada

foi 96% para calcita e 97% para quartzo. A faixa de pH mais favorável para a ação depressor do silicato de sódio foi observada entre 5 e 8.

Pontes & Leal filho (2005) estudaram a purificação do talco do Paraná por flotação e alvejamento químico. Os autores observaram que o melhor desempenho da flotação foi obtido em pH 9,5 através do uso de silicato de sódio como depressor da ganga silicatada (quartzo, caulinita, tremolita e clorita) e flotanol D-14 ou óleo de pinho como agente espumante.

Por outro lado, outros estudos comprovaram que o silicato de sódio pode não ser efetivo na depressão da ganga e pode vir a deprimir também o óxido de ferro, por exemplo, Oliveira (2018) realizou ensaios de flotação do sistema hematita-quartzo em pH 3 em tubo de Hallimond variando a concentração de metassilicato de sódio (0-400 mg/L), e observou que quanto maior a concentração de depressor menor a flotabilidade da hematita.

Lopes & Lima (2009) realizaram a microflotação de hematita e quartzo em tubo de Hallimond com oleato de sódio e silicato de sódio. Ao comparar os valores obtidos para a flotabilidade da hematita e do quartzo condicionados com silicato de sódio, observou-se que o silicato de sódio se mostrou mais efetivo na depressão da hematita do que na depressão do quartzo em pH 7.

A depressão dos óxidos de ferro pode ser explicada pelo o fato de o silicato de sódio se adsorver na superfície mineral e formar complexos prejudicando na flotabilidade do ferro. Jordan et al. (2007) mostraram que os silicatos dissolvidos podem ser sorvidos na superfície de diferentes óxidos de ferro como goethita (α -FeOOH), hematita (α -Fe₂O₃) e magnetita (Fe₃O₄), com afinidades tornando-se maior na ordem dada. Foi demonstrado que a sorção de silicatos dissolvidos ocorre em uma ampla faixa de pH. Essas observações experimentais foram ajustadas graças ao modelo de complexação de superfície, usando duas superfícies complexos $\equiv FeH_3SiO_4$ e $\equiv FeH_2SiO_4^-$.

4.3.

Rotas de flotação de minério de ferro

Atualmente tem se desenvolvido várias rotas de flotação para a separação de minerais com diferentes composições químicas. As rotas de flotação do minério de ferro podem ser classificadas em cinco principais grupos: 1) Flotação catiônica reversa de óxidos de ferro, 2) Flotação catiônica reversa de quartzo, 3) Flotação aniônica direta de óxidos de ferro, 4) Flotação aniônica direta de quartzo (Ma, 2012).

4.3.1. Flotação aniônica direta

Este método de flotação tem se mostrado como uma rota atrativa de concentração de minérios de baixo teor e rejeitos armazenados em bacias de rejeitos. Esse método é usado para flotar o mineral de interesse que se encontra em menor quantidade e deprimir a ganga que se encontra em maior quantidade. Os ácidos graxos são os coletores mais utilizados nesse tipo de flotação, mas a depressão dos minerais de ganga ainda é um desafio a ser superado (Araújo et al, 2005; Santos, 2010)

Vários estudos utilizam esse método de flotação, por exemplo, Lopes (2009) que efetuou flotação direta de minério de ferro, usando coletores como o oleato de sódio, o sulfato e o hidroxamato de sódio e como depressor o metassilicato de sódio.

Nascimento (2010) estudou a flotação direta de minério de ferro usando oleato de sódio como coletor da hematita, e investigando três depressores da ganga silicatada (o metassilicato de sódio, o flúorsilicato de sódio e o hexametáfostato de sódio). Concluindo que o flúorsilicato de sódio apresentou melhor eficiência na depressão do quartzo.

Arantes et al. (2017) estudaram “a influência do módulo de silicato de sódio na flotação direta de minério de ferro”. Os ensaios de microflotação da hematita, efetuados em pH 7, condicionados com 50 mg/L de oleato de sódio e diferentes módulos de silicato de sódio mostram que a flotabilidade da hematita foi menor com maior módulo de silicato de sódio. Concluindo assim que, o silicato de sódio tem afinidade também pela hematita. Os valores de potencial zeta da hematita tornaram-se negativos em toda faixa de pH o que sugere a precipitação de SiO_2 amorfa e adsorção de espécies aniônicas presentes na solução sobre a superfície do mineral.

4.3.2. Circuito de flotação

A seleção do método (ou combinação dos métodos) e dos equipamentos mais adequados para a definição do circuito de concentração ou otimização de operações já existentes depende fundamentalmente de um conhecimento detalhado das características mineralógicas do minério. Informações básicas como: o grau de liberação, a susceptibilidade magnética, a densidade de cada mineral presentes nos tipos de minério, entre outros aspectos devem ser

considerados. Os três principais estágios usados no circuito de flotação são: *rougher*, *cleaner* e *scavenger*. O estágio *rougher* é a primeira etapa, a etapa de concentração do mineral de interesse. No estágio *cleaner* é feita a remoção das impurezas presentes no concentrado *rougher*, aumentando o teor do mineral de interesse. Na etapa *scavenger* o objetivo é a recuperação máxima do mineral de valor ainda existente na ganga mineral (Valadão & Araújo, 2012).

O circuito *rougher-scavenger-cleaner*, pode ser tratado como o arranjo convencional. A interação entre os estágios, no entanto, cria dificuldades no controle, como qualquer ação em um estágio afeta as outras etapas. Isso fez um debate sobre as vantagens de circuitos abertos *versus* fechados (Lauder, 1992; Wills & Finch, 2016). Esses estágios podem variar de acordo com o mineral de interesse a ser flotado.

4.4. Biotecnologia

A biotecnologia é definida como o uso de sistemas vivos ou materiais biologicamente derivados para utilização na indústria em variados campos tecnológicos. A inovação biotecnológica depende do desenho de conexões significativas dentro de vastas redes de conhecimento e colaborações entre especialistas interdisciplinares, envolvendo áreas como engenharia, computação, química, biologia, estatística e matemática que podem ser unificadas em uma tecnologia prática (Goh & Sze, 2018).

Os desenvolvimentos recentes na área de biotecnologia deram também a promessa de não apenas auxiliar no processamento mineral, como também nas operações de metalurgia, fornecendo meios para a biorremediação de problemas ambientais gerados pela indústria mineral (Smith et al., 1991). A biotecnologia vem sendo estudada como uma alternativa para o futuro, alguns estudos são mostrados a seguir:

Ijaz et al. (2017) descreveram alguns dos microorganismos utilizados na biolixiviação como *Chemolithophillic*, *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiooxidans*, *Acidophilus*, gênero *Thermophillic* de *Sulpholobus*, o uso de fungos tais como *Aspergillus niger* e *Penicillium simplicissimum* têm a capacidade de recuperar cobre e estanho até 65%, enquanto zinco, chumbo e alumínio entre 90-95%. Esses microorganismos auxiliam na lixiviação de minérios de sulfeto e biooxidação de minérios de metais preciosos de sulfeto refratário (Smith & Misra, 1993).

Manyuchi et al. (2018) estudaram o potencial para explorar o lodo de esgoto como matéria-prima para produção de bio-etanol. No lodo de esgoto hidrolisado foi introduzido *Bacillus flexus*, também foi utilizado levedura como catalisador durante a produção de bio-etanol. Concluíram que, o lodo de esgoto é uma boa matéria-prima para a produção de bio-etanol, sendo considerado uma alternativa para substituição dos combustíveis fósseis.

Farahat e Hirajima (2015) estudaram as características superficiais da linhagem *Bacillus megaterium*. Os resultados confirmaram a natureza hidrofílica da linhagem pelo ângulo de contato e energia livre de adesão entre as células microbianas. O biotratamento da dolomita com *B. megaterium* mudou significativamente as propriedades da superfície da dolomita, o ângulo de contato diminuiu de 69 ° para 38 ° e, como consequência, sua flotabilidade diminuiu de 95% para 25% após o tratamento, provando que a bactéria torna a dolomita hidrofílica.

Esses são alguns dos exemplos sobre pesquisas desenvolvidas na área biotecnológica, área que está em pleno desenvolvimento, as pesquisas são realizadas visando reduzir danos ambientais geradas pela indústria e substituição de reagentes perigosos.

4.4.1. Bioflotação

A bioflotação é uma tecnologia que emprega bactérias e/ou seus produtos metabólicos que pode agir como coletores, depressores ou espumantes, envolvendo a adesão das bactérias e/ou seus produtos metabólicos sobre os minerais, reedendo ao mineral uma superfície hidrofílica ou hidrofóbica (Botero, 2007; Rea et al., 2015). Alguns estudos mostraram que a superfície bacteriana possui carga negativa e que, juntamente com forças eletrostáticas, interações hidrofóbicas, entrópicas, ligações ácido-base, ligações de Van der Waals e ligações de hidrogênio possibilitam a adesão bacteriana ao mineral (Sharma & Rao, 2002, Rao et al., 2010).

A superfície celular dos microorganismos consiste principalmente de grupos funcionais derivados de fosfolipídios, proteínas e polissacarídeos. Alguns desses grupos funcionais podem induzir propriedades hidrofóbicas, uma vez que elas podem aderir seletivamente a superfície mineral (Vasanthakumar et al, 2012). Diferentes estudos mostram que vários tipos de bactérias, por exemplo, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptosirillum ferrooxidans*, *Rhodococcus opacus*,

Rhodococcus erythropolis, *Rhodococcus ruber*, *Bacillus megaterium* e seus produtos metabólicos podem ser usados na bioflotação de minerais sulfetados e óxidos (Deo & Natarajan, 1998; Vilinska & Rao, 2008; Rao et al, 2010; Dwyer, 2012; Merma & Torem, 2015; Kim et al., 2015; Farahat & Hirajima, 2015; Sanwani, 2016; Oliveira et al., 2017; kim et al., 2017; Sanwani et al., 2017; Hacha et al., 2018; Pollmann et al., 2018).

Uma particular importância pode ser dada para a mineração de minério de ferro, onde uma crescente demanda global por aço e esgotamento de jazidas de minério de ferro de alta qualidade. Para o processamento dos minérios de baixo teor, vários processos convencionais de beneficiamento, incluindo flotação e floculação estão realizando abordagens biotecnológicas (Houot, 1983; Dwyer, 2012).

Alguns estudos desenvolvidos com bactérias mostram o seu potencial como coletores de hematita. A maioria das bactérias estudadas são: *Rhodococcus Erythropolis* (Oliveira et al., 2017), *Mycobacterium phlei* (Dubel et al., 1992; Yang et al., 2007), *Bacillus polymyxa* (Deo & Natarajan, 1997; Shashikala e Raichuur, 2002), *Paenibacillus polymyxa* (Deo & Natarajan, 1998), *Rhodococcus opacus* (Natarajan & Deo, 2001; De Mesquita et al., 2003; Merma et al., 2013; Kim et al., 2015; Hacha et al., 2018), *Bacillus subtilis* (Sarvamangala & Natarajan, 2011) e *Rhodococcus ruber* (Lopez et al., 2015).

A bioflotação está em seu estágio de desenvolvimento. Assim, é necessário o desenvolvimento e escalonamento dos testes de flotação para avançar e consolidar esta biotecnologia para ser usada em escala industrial. A maior parte do trabalho sobre a bioflotação foi e é realizada em pequena escala (microflotação) e a ampliação dos resultados parece difícil, uma vez que os fatores físicos são diferentes em ambas as escalas. Porém, alguns estudos de bioflotação foram conduzidos em células de flotação em bancada (Kolahdoozan et al., 2004; Hosseini et al., 2005; Yüce et al., 2006; Mehrabani et al., 2011; Kumar et al., 2013).

4.4.2.

Rhodococcus opacus

O potencial comercial das espécies bacterianas *Rhodococcus* é cada vez mais conhecido. A ampla gama de produtos químicos transformados ou degradados por essas espécies bacterianas torná-las potencialmente útil na biotecnologia ambiental e industrial, assim como sua capacidade de sintetizar

vários produtos, como surfactantes, floclulantes, amidas e polímeros. (Bell et al., 1998)

Rhodococcus vem da palavra grega *Rodon*=rosa, *Coccus*=grão, membros do gênero *Rhodococcus* são atualmente colocados na sub-ordem de formação de ácido micólico *Corynebacterineae* na família *Nocardiaceae* dentro do filo *Actinobacteria* (Sutcliffe et al., 2010).

Os membros desta classificação são caracterizados por envelopes celulares distintos tipicamente dominados por grandes lipídios de cadeia ramificada, chamados de ácidos micólicos, e coletivamente eles são frequentemente chamados de micolatos, esses ácidos formam uma monocamada e é quimicamente e estruturalmente distinto das bactérias Gram-negativas, que contém bicamadas de micolatos. Além dos ácidos micólicos, essas bactérias compartilham uma série de outras características do envelope celular, mais notavelmente um polissacarídeo da parede celular do arabinogalactano (AG) que é covalentemente ligado ao peptidoglicano parede celular e, por sua vez, fornece suporte para ancoragem covalente de ácidos micólicos (Sutcliffe et al., 2010). Assim, a química e organização desses componentes pode ser visto na Figura 9, podendo também ser visto que a barreira de permeabilidade de ácidos micólicos e dimicolatos confere a hidrofobicidade à bactéria; além disso, pode facilitar a ingestão de substratos apolares, como hidrocarbonetos (Carvalho et al., 2009 apud Puelles, 2016).

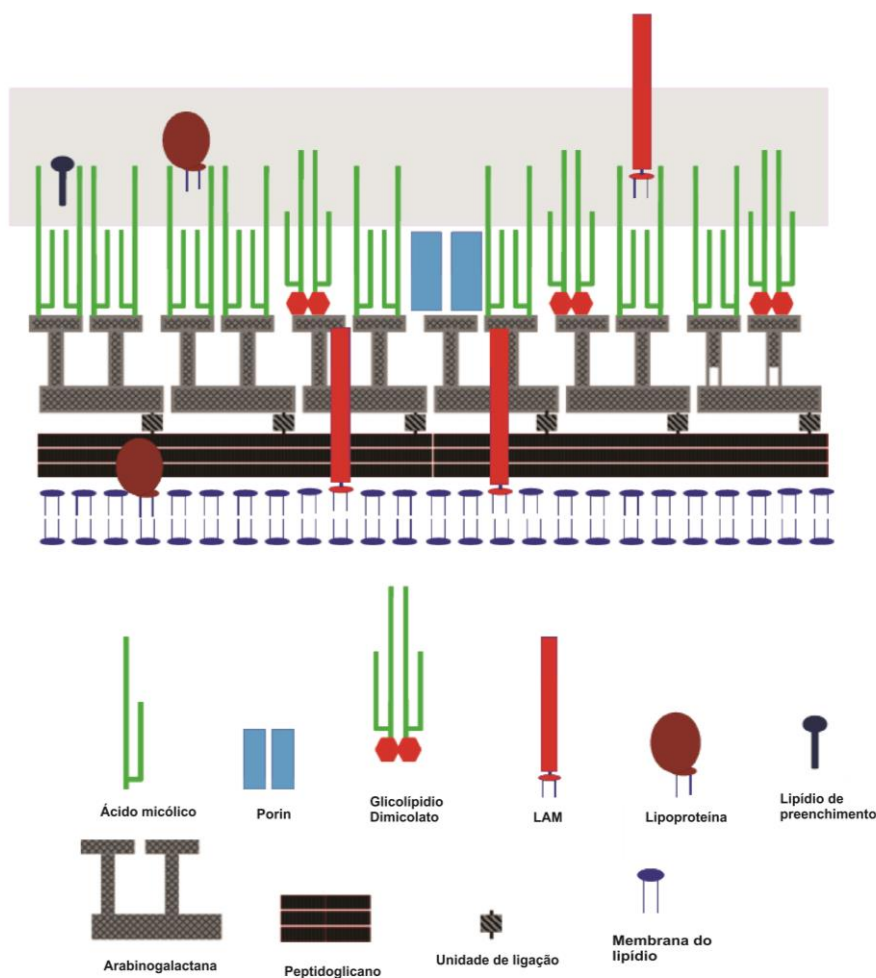


Figure 9 – Modelo de organização da célula *rhodococcal* (Adaptado de Minnikin, 1991).

Existem várias classificações para as bactérias do tipo *Rhodococcus*, algumas delas são mais conhecidas e utilizadas para diferentes fins como bioflotação, biofloculação (Yang et al., 2013) e biodegradação de gorduras animais e óleos vegetais (Kis et al., 2015). Alguns exemplos da família *Rhodococcus* aplicados no bioprocessamento podem ser mencionados tais como: *Rhodococcus ruber* na flotação de hematita (Lopez et al., 2015), *Rhodococcus opacus* e *rhodochrous* na biosorção de cádmio (II), chumbo(II), níquel(II), cobalto(II) and cromo(VI) (Dobrowolski et al., 2017) e *Rhodococcus erythropolis* na biosorção de cobre (Baltazar et al., 2018).

Em recentes anos, o biobeneficiamento de minerais vem sendo estudado com maior ênfase visando utilizar diferentes microorganismos e seus produtos metabólicos como depressores, coletores e espumantes (Botero et al., 2007). A bactéria *Rhodococcus opacus* é um desses microorganismos que vem sendo estudado, esta bactéria é uma representante da linhagem não patogênica de

nocardioformes Actinomycetales. Estas bactérias são Gram-positiva, unicelular, quimiorganotrófico e hidrofóbico (Czemierska et al., 2016).

Este microorganismo reside em ambientes de solo e água e é classificado como um dos mais importantes organismos, pode interagir com superfícies minerais devido à presença de diferentes tipos de compostos na superfície da bactéria. Este microorganismo possui polissacarídeos, ácidos carboxílicos, grupos lipídicos e ácidos micólicos na parede celular, responsável pelo comportamento anfotérico nas superfícies celulares (Warhurst et al., 1994; Botero et al., 2008; Dobrowolski et al., 2017).

Alguns exemplos de estudos utilizando a bactéria *Rhodococcus opacus* foram realizados, tais como na bioflotação de calcita e magnesita (Botero et al., 2007), na biosorção da bactéria na calcita e magnesita (Botero et al., 2008), na biosorção de íons de alumínio de águas residuais (Cayllahua & Torem, 2010), na bioflotação de malaquita (Kim et al., 2015), na bioflotação de óxidos de cobre (Kim et al., 2017), no tratamento de águas residuais contendo hidrocarbonetos (Goswami et al., 2018) e na eletroflotação de finos de minério de ferro (Hacha et al., 2018).

4.4.3. Biossurfactantes

Os microrganismos, tais como bactérias, leveduras e fungos, são capazes de produzir biossurfactantes. Os biossurfactantes quando comparado com os surfactantes sintéticos apresentam semelhante atividade superficial, menor toxicidade e maior biodegradabilidade (Wei et al., 2007; Khoshdast et al., 2012). A maioria dos biossurfactantes são aniônicos ou neutros, enquanto apenas alguns com grupos de amina são catiônicos (Mukherjee et al., 2006).

Os biossurfactantes são compostos anfifílicos produzidos por microrganismos que exibem atividade superficial (Didyk & Sadowski, 2012). Em geral, os biossurfactantes apresentam uma estrutura anfifílica composta de pelo menos uma porção hidrofóbica e outra hidrofílica. A porção hidrofílica pode conter grupos como éster, hidroxil, fosfato e carboxil ou um carboidrato (Maier, 2003). A parte hidrofóbica usualmente é formada por longas cadeias de ácidos graxos entre 10 a 18 átomos de carbono, na forma saturada ou insaturada, hidroxilada, linear ou ramificada (Lang, 2002).

Podem ser categorizados em dois grupos: i) o de baixo peso molecular e ii) o de alto peso molecular. Os biossurfactantes de baixo peso molecular são

glicolipídios ou lipopeptídeos, mas também podem pertencer aos grupos de ácidos graxos e fosfolipídios. E geralmente, os biossurfactantes poliméricos de alto peso molecular são produzidos por muitas bactérias de diferentes espécies. Eles são polissacarídeos, proteínas, lipopolissacarídeos, lipoproteínas ou misturas complexas desses lipoheteropolissacarídeos (Hausmann & Sylatk, 2015).

Os biossurfactantes também podem ser classificados em 5 categorias: i) glicolipídeos, ii) lipopeptídeos iii) lipoproteínas, iv) fosfolipídios e ácidos graxos, v) surfactantes poliméricos e surfactantes particulados. Alguns de desses tipos de biossurfactantes e os microorganismos de onde provem estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos biossurfactantes produzidos por diferentes microorganismos (Adaptado de Fleurackers, 2015).

Classificação de biossurfactantes	
Tipos de biossurfactantes	Espécies de microorganismos produtores
Glicolipídios	
Treose micolates	<i>Rhodococcus erythropolis</i> , <i>Arthrobacter paraffineu</i> , <i>Mycobacterium phlei</i> , <i>Nocardia erythropolis</i>
Ramnolipídios	<i>Pseudomonas sp.</i>
Sorolipídios	<i>Torulopsis bombicola/apicola</i> , <i>Torulopsis petrophilum</i> , <i>Candida sp.</i>
Fosfolipídios e ácidos graxos	
Fosfolipídios e ácidos graxos	<i>Candida sp.</i> , <i>Corynebacterium sp.</i> , <i>Acinetobacter sp.</i> , <i>Thiobacillus thiooxidans</i> , <i>Asperigillus sp.</i> , <i>Pseudomonas sp.</i> , <i>Penicillium sp.</i>
Lipopeptídeos e lipoproteínas	
Iturin A, Surfactin, Subsporin	<i>Bacillus subtilis</i>
Polymixin E1	<i>Bacillus polymyxa</i>
Globomycin	<i>Streptomyces globocaciense</i>
Surfactante poliméricos	
Lipoheteropolysaccharide (Emulsan)	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> RAG-1, <i>Arthrobacter calcoaceticus</i>
Heteropolysaccharide (Biodispersan)	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> A2
Surfactantes Particulados	
Membrane vesicles	<i>Acinetobacter sp. H01-N</i>
Fimbriae	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>

Os glicolípideos pertencem a classe de biossurfactante mais comum e mais estudada (Mulligan et al., 2014). Os três grupos biotecnologicamente importantes de glicolípideos microbianos são ramnolípideos, soforolípideos, trealoselípideos (De Faria, 2010). Ramnolípideos foram encontrados como exoprodutos do patógeno *P. aeruginosa*, a diminuição da tensão superficial da água até 29 mN/m constituem uma característica de tais componentes. A maioria dos estudos envolvendo ramnolípideos se concentra principalmente na avaliação da eficiência da biodegradação de hidrocarbonetos de petróleo (Arab & Mulligan, 2014). Os soforolípídios são produzidos por leveduras que pertencem ao gênero *Candida*. Estes agentes diminuem os valores de tensão superficial para aproximadamente 33 mN/m e uma redução na tensão interfacial de n-hexadecano e água de 40 a 5 mN/m (Morya & Kim, 2014). A CMC dos biossurfactantes varia de 1 a 2000 mg/L, enquanto as tensões interfaciais (óleo/água) e superficiais são de aproximadamente 1 e 30 mN/m respectivamente. Bons surfactantes são capazes de reduzir a tensão superficial da água de 72 para 35 mN/m (Hausmann & Syldatk, 2015).

Sabe-se que diferentes tipos de trealolípideos são produzidos por vários microrganismos, incluindo os gêneros de *Mycobacterium*, *Rhodococcus*, *Arthrobacter*, *Nocardia* e *Gordonia*, entre os trealolípídios, a trealose ésteres produzidos por *Rhodococcus erythropolis* foram estudados mais extensivamente (Dhanarajan et al., 2014).

Trealose lipídios são biossurfactantes produzidos pelo gênero *rhodococci* (Ortiz et al., 2009). O gênero *Rhodococcus* é capaz de transformar, biodegradar ou utilizar como fontes de carbono vários compostos hidrofóbicos (hidrocarbonetos, esteróides, lignina, etc.), produzindo glicolípideos contendo trealose como carboidrato. Seu biossurfactante tem a capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial a níveis observados nos surfactantes sintéticos, além de possuir baixa CMC. Esta capacidade pode ser comercial e industrialmente importante. *Rhodococcus erythropolis* produz glicolípideos com propriedades antiviral e antifúngica (Lang & Philp, 1998; Bicca et al., 1999; Bueno, 2008).

A estrutura química do lipídio succinol-trealose produzido por *Rhodococcus* sp. é mostrado na Figura 10. Este composto contém, '-D-trealose, um dissacarídeo não redutor, ligado por três ligações éster a três partes de ácido graxo. Entre esses ácidos graxos, os ácidos heptanóico, nonanóico, decanóico e undecanóico são os mais abundantes (Marquès et al., 2009). Uma quarta ligação

éster, formada com um resíduo succinol, fornece um grupo carboxila livre conferindo uma carga negativa líquida em pH neutro.

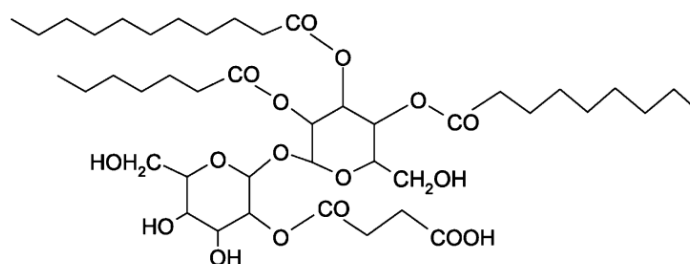


Figura 10 – Estrutura química da *Rhodococcus* sp. trealose lipídeo (Ortiz et al., 2009).

Aplicações industriais dos biosurfactantes

O aumento da preocupação com as questões ambientais, os avanços nos processos biotecnológicos e o surgimento de leis cada vez mais rigorosas levaram os biossurfactantes a se tornarem uma alternativa na substituição dos tensoativos químicos disponíveis no mercado (Henkel et al., 2012).

As diversas propriedades funcionais dos biossurfactantes, incluindo emulsificação, umedecimento, formação de espuma, limpeza, separação de fases, atividade de superfície e redução na viscosidade de líquidos pesados os tornam apropriados para muitas aplicações industriais e domésticas (Perfumo et al., 2010a; Satpute et al., 2010; Francchia et al., 2015).

Outras potenciais aplicações comerciais em indústrias adicionais, incluindo indústrias de tintas, cosméticos, têxteis, detergentes, agroquímicos, alimentos e farmacêuticas também surgiram (Banat et al., 2000, 2010; Francchia et al., 2015).

No processamento mineral, a aplicação de biossurfactantes como biorreagentes em operações como bioflotação, biofloculação, é uma nova maneira de recuperar os minerais (Rao et al., 2010). Nos últimos anos, vários estudos foram realizados sobre o uso de biossurfactantes como reagentes na flotação como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 –Aplicações de biossurfactante como reagentes na flotação.

Microrganismos produtores de biossurfactante	Aplicação	Mineral	Referência
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> MA01	Espumante	Cobre	Khoshdast et al. (2012)
<i>Bacillus circulans</i> e <i>Streptomyces</i> sp.	coletor	Serpentinita e quartzo	Didyk e Sadowski (2012)
<i>Lactobacillus pentosus</i>	Espumante	Sedimentos de rio	Vecino et al. (2013)
<i>surfactina</i> 105 e <i>liquesina-A</i>	Coletores	Zinco e cromo	Zouboulis et al. (2003)
<i>Rhodococcus opacus</i>	Coletor	Hematita	Puelles (2016)
<i>Rhodococcus erythropolis</i>	Coletor	Hematita	Oliveira (2018)

Assim, os biossurfactantes apresentam diversas vantagens em relação aos surfactantes sintéticos, podendo ser utilizados em uma gama de aplicações industriais como apresentados acima; entretanto, ainda não são amplamente utilizados devido aos altos custos de produção, associados a métodos ineficientes de recuperação do produto e ao uso de substratos caros (Nitschke & Pastore, 2002).

5

Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados e descritos os materiais e metodologias utilizados para a preparação e caracterização das amostras do rejeito de minério de ferro, no cultivo e crescimento da *Rhodococcus opacus*, na produção e extração do biossurfactante. Em seguida, são descritas as metodologias e os materiais utilizados nos estudos de tensão superficial, medidas de potencial zeta, espectroscopia no infravermelho e nos ensaios de flotação na célula Partridge-Smith e na célula mecânica CDC, como também o circuito de flotação.

5.1.

Preparação e caracterização das amostras

O rejeito do minério de ferro proveniente da flotação foi recebido em polpa. A amostra foi seca em temperatura ambiente (25 ± 5 °C), homogeneizada e quarteada como apresentado na Figura 11 para posterior caracterização (análises químicas, mineralógicas e granulométrica) e flotação.

Para realizar o potencial zeta e o FTIR, utilizou-se uma amostra de hematita pura fornecida por um fornecedor local de Araçuaí, em Minas Gerais, Brasil. Essa amostra foi pulverizada e armazenada até ser utilizada nos ensaios experimentais, o tamanho da partícula utilizada em ambas as análises <10 µm.

A análise granulométrica foi realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), utilizou-se 200 g de material para o peneiramento à úmido. As peneiras (+150 µm –20 µm) foram colocadas no agitador de peneiras, em seguida foi colocado o minério de ferro, e a água de lavagem para separação do material, o material retido em cada peneira foi seco e pesado.

Para as análises químicas por volumetria foram inicialmente pesados 0, 25 g de cada concentrado e rejeito obtido nos ensaios de flotação. Em seguida, as amostras foram moídas no gral para diminuição da granulometria desejada. As amostras moídas foram colocadas em Erlenmeyers de 500 mL para dar início as análises químicas pelo método de titulação (volumetria), o procedimento experimental utilizado está em anexo.

As análises químicas feitas por fluorescência de raios-x (FRX) foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo método de fusão com tetraborato de lítio em um espectrômetro Philips, PW1480 para corroboração dos resultados obtidos nas análises químicas por volumetria. A análise de difração de raios-x foi realizada no Centro de Tecnologia Mineral e foi obtida pelo método do pó no equipamento Bruker-AXS D5005.

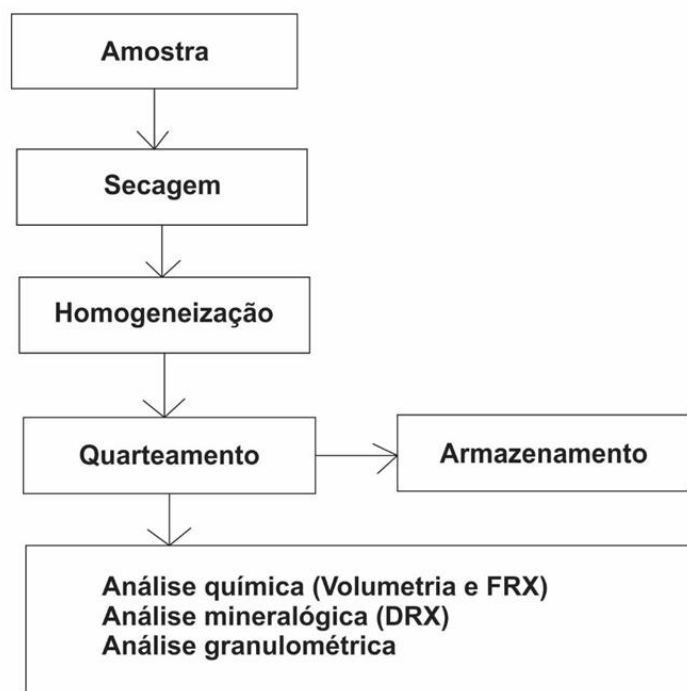


Figura 11 – Fluxograma das etapas de preparação do rejeito do minério de ferro.

Na Tabela 4 foram apresentadas as diferentes frações granulométricas do rejeito de minério de ferro utilizado para o teste de Difração de raios-x, e os ensaios de flotação e as frações granulométricas da hematita utilizada para a medição do potencial zeta e do FTIR.

Tabela 4 - Tamaho de partícula usados em diferentes estudos.

Ensaio	Fração (µm)
Flotação	+150 - 20
Potencial Zeta	-10
FTIR	-10
Difração de Raios X	-10

5.2.

Cultivo e crescimento da *Rhodococcus opacus*

A bactéria *Rhodococcus opacus* foi fornecida pela Coleção Brasileira de Microrganismos de Ambiente e Indústria - CBMAI - UNICAMP. Para a cultura das bactérias em meio sólido foram usados os componentes do meio de cultura *Yeast Malt Glucose* - YMG apresentado na Tabela 5. Primeiramente, os componentes do meio sólido foram misturados em um Becker com água deionizada, depois colocados em Erlenmeyers de 500 mL juntamente com as placas de Petri para autoclavação durante 20 min a 1,2 atm, depois foram levados para a capela esterilizada para a inoculação das bactérias. Então, a bactéria foi inoculada em meio sólido nas placas de Petri e estas placas foram levadas a incubação por 72 h a $(25 \pm 2^\circ\text{C})$ C. Após o crescimento bacteriano, as placas de Petri foram conservadas na geladeira a $(4 \pm 2^\circ\text{C})$ (Figura 12).

Tabela 5 – Componentes utilizados para o meio de cultura líquido e sólido utilizado para o crescimento da bactéria *Rhodococcus opacus*.

Componente	Líquido (g/L)	Sólido (g/L)
Glicose	20	20
Peptona	5	5
Extrato de malte	3	3
Extrato de levedura	3	3
Agar	--	20
pH	7,2	7,2

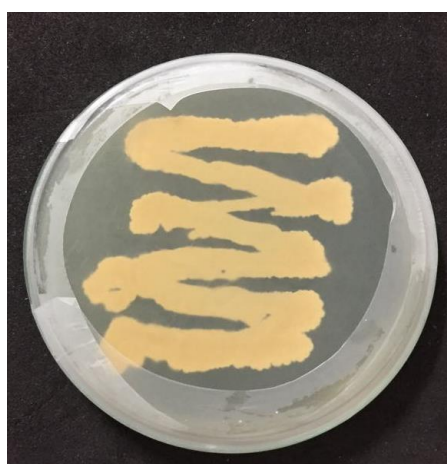


Figura 12 – Cultivo da bactéria *Rhodococcus opacus* em meio sólido após 72 horas.

Para a cultura em meio líquido foram utilizados Erlenmeyers de 500 ml, as placas de Petri inoculadas com as bactérias *Rhodococcus opacus*, e os

componentes utilizados no meio líquido que estão apresentados na Tabela 4. Após a produção do meio líquido e a autoclavação dos Erlenmeyers, foram levados para a capela para a inoculação das bactérias (Figura 13-A), e colocadas em shakers rotatórios (CIENTEC CT-712) a $(25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C})$ durante 7 dias como apresentado na Figura 13-B para o crescimento bacteriano.

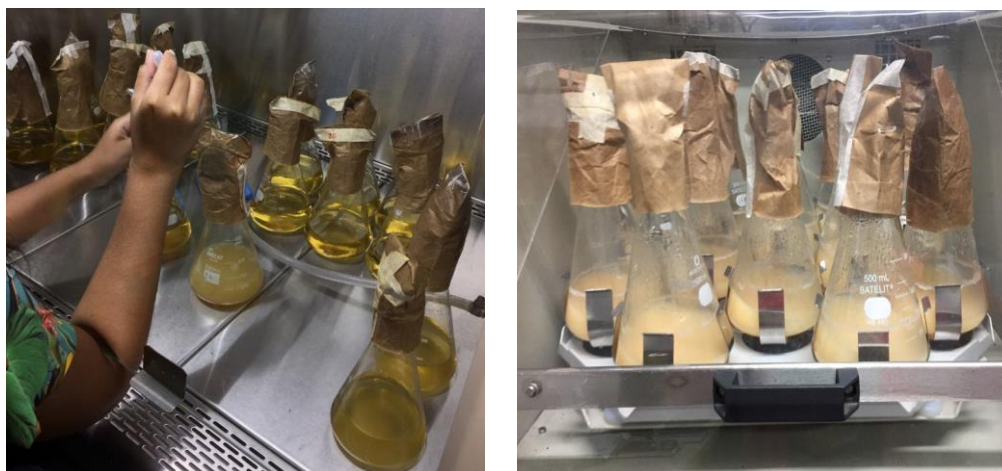


Figura 13 – A) Inoculação das bactérias no meio líquido, B) Crescimento bacteriano.

5.3. Extração do biossurfactante

No sétimo dia, após as bactérias atingirem seu crescimento, o meio líquido (caldo de fermentação) foi centrifugado em tubos Falcon de 50 mL a 4500 rpm durante 8 min. em uma centrífuga digital CIENTEC CT-5000. Os concentrados bacterianos obtidos foram ressuspensos em água deionizada e centrifugados mais uma vez para o descarte do meio de cultura remanescente.

Após a lavagem com água deionizada é obtida uma biomassa que é ressuspensa em álcool etílico a 95%. O frasco com biomassa ressuspensa com álcool etílico a 95% é deixado na geladeira a $(4 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C})$ por um dia e então, colocado na autoclave a 1,2 atm durante 20 minutos para ser submetido a um processo de esterilização e extração do biossurfactante.

Após o processo de esterilização e extração do biossurfactante, a solução álcool-biossurfactante-biomassa foi centrifugada a 4500 rpm durante 8 minutos. Após esta etapa foi retirada a biomassa e aproveitada a solução álcool-biossurfactante, esta solução foi colocado em beakers para o processo de secagem na estufa a $50 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

O biossurfactante seco foi diluído em água deionizada, em seguida filtrado para a separação da parte solúvel e insolúvel. A parte solúvel é colocada em um

balão e conservada na geladeira a $4 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 15 dias para posterior ensaios experimentais (Flotação, FTIR, tensão superficial, potencial zeta). O fluxograma simplificado do processo de extração do biossurfactante está apresentado na Figura 14.

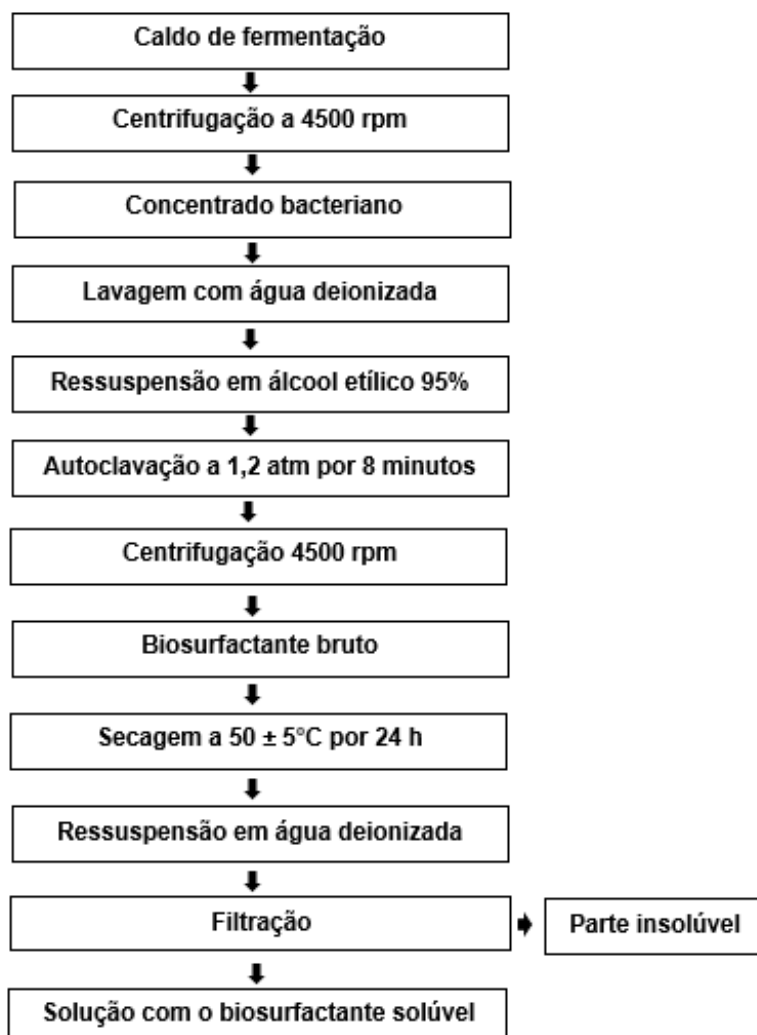


Figura 14 – Fluxograma simplificado de extração do biossurfactante (Adaptado de Puellas, 2016).

5.4. Medidas de tensão superficial

As medidas de tensão superficial foram realizadas utilizando o tensiômetro DC 200 Surface Electro Optics pelo método do anel de Nöuy como apresentada na Figura 15. Foram realizadas medições para avaliar o efeito do pH na tensão superficial para uma faixa de pH de 3 até 11 e uma concentração de biossurfactante fixa de 0,16 g/L. Também foram avaliados o efeito da

concentração do biossurfactante na tensão superficial para uma faixa de concentração de 0 até 2,32 g/L e fixado em pH 3.

As soluções utilizadas para as medições foram preparadas com água deionizada em um balão de 100 ml, as condições de análise foram padronizadas para todos os ensaios realizados a uma temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$. A metodologia utilizada para as medições está em anexo.

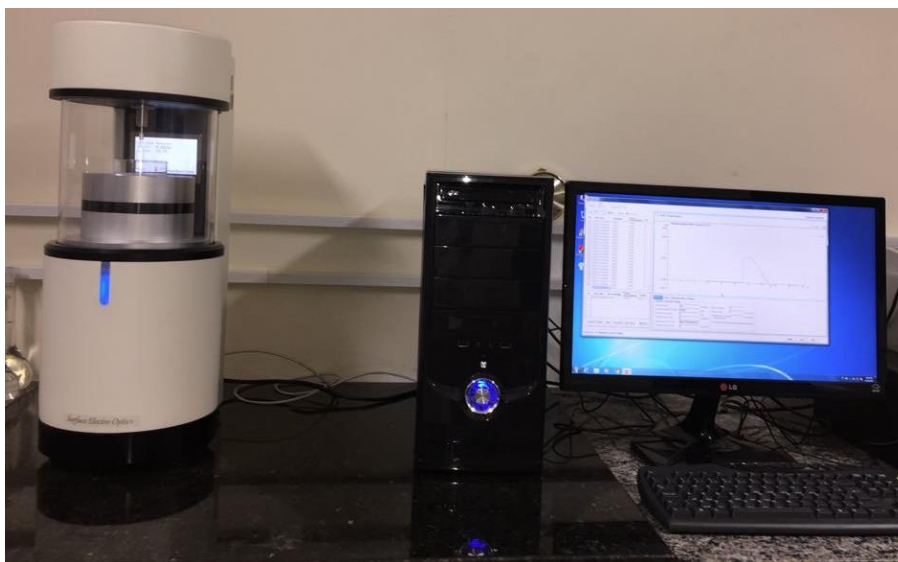


Figura 15 – Tensiômetro DC 200.

5.5.

Medidas de potencial zeta

As medições do potencial zeta foram realizadas antes e após a interação da hematita pura com o biossurfactante e o silicato de sódio. Estes estudos foram realizados no aparelho de micro eletroforese do tipo Malvern Zetasizer como apresentado na Figura 16 no Centro de Tecnologia mineral (CETEM). As medições do potencial zeta visaram o estudo dos possíveis mecanismos de interação entre o biossurfactante e a superfície mineral.

Para as medições do potencial zeta com eletrólitos indiferentes foi usado 0,001 gramas de hematita pura, colocado em suspensão em 10 ml de concentrações de eletrólitos indiferentes 10^{-3} , 10^{-2} mol/L de KCl e água deionizada. As amostras de biossurfactante/mineral, depressor/mineral foram obtidas do flotado, condicionadas em pH 3, com concentração de biossurfactante de 1000 g/t, concentração de depressor de 300 g/t e após secagem em estufa a $50 \pm 2^\circ\text{C}$ por 8 h. As amostras foram preparadas utilizando eletrólito indiferente

a uma concentração de 10^{-3} mol/L. A metodologia detalhada do ensaio de potencial zeta está em anexo.



Figura 16 – Aparelho do potencial Zeta-Malvern Zetasizer.

5.6. Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

Os espectros no infravermelho foram realizados no espectrofotômetro FTIR Scientific Nicolet 6700 FT-IR como apresentado na Figura 17. Os ensaios foram realizados pelo método da pastilha antes e após a interação do quartzo e da hematita com o biossurfactante e o silicato de sódio. As amostras de biossurfactante/mineral, depressor/mineral foram obtidas do flotado, condicionadas em pH 3, com concentração de biossurfactante de 1000 g/t, concentração de depressor de 300 g/t e após secagem em estufa a $50 \pm 2^\circ\text{C}$ por 8 h. A proporção de amostra e KBr foi de 1/200 (p/p). Para a obtenção das pastilhas, primeiramente foi realizada uma mistura homogênea entre a amostra e o KBr usando gral e pistilo. Em sequência, foi obtida a pastilha da mistura homogênea mediante compressão.

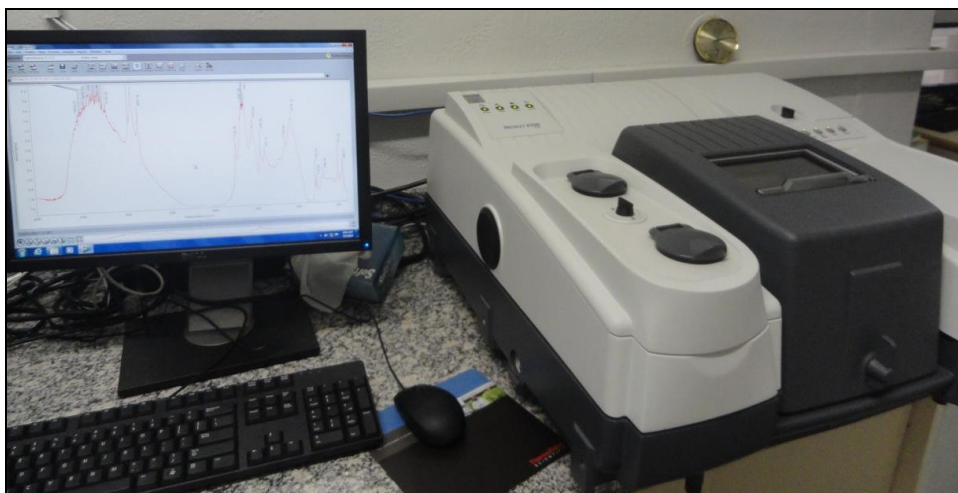


Figura 17– Espectrofotômetro FT-IR Scientific Nicolet 6700.

5.7. Ensaio de flotação

Os ensaios de flotação foram conduzidos primeiramente em célula Partridge-Smith em temperatura ambiente (25 ± 5 °C) com o intuito avaliar o efeito do pH, concentração do biossurfactante e do silicato de sódio a 5% (p/v) na flotação do rejeito de minério de ferro. Após os testes preliminares foi parametrizado o pH para fazer os ensaios de flotação na célula mecânica CDC variando a concentração de biossurfactante e depressor visando um futuro uso industrial desse biocoletor. A Tabela 6 apresenta as variáveis e os parâmetros estudados nos testes.

Tabela 6 - variáveis e os parâmetros estudados nos testes de flotação.

Variáveis e parâmetros dos testes de flotação		
Células de flotação	Partridge-Smith	CDC
pH	3, 5, 7, 9, 11	3
Concentração de biocoletor	1000, 2000, 4000, 6000, 8000 g/t	1000, 2000, 4000, 6000, 8000 g/t
Concentração de depressor	100, 300, 600, 900 e 1200 g/t	100, 300, 600, 900 e 1200 g/t
Minério de ferro	5 g	132,66 g
Agitação	Magnética	800 rpm
Volume	260 mL	800 mL
T. Condicionamento	5 min	5min
Tempo de flotação	5 min	5 min

5.7.1. Ensaio de flotação na célula Partridge-Smith

Para os ensaios de microflotação na célula Partridge-Smith utilizou-se um rotômetro para medir a vazão de ar, um agitador magnético para manter as partículas minerais em suspensão, uma bomba de vácuo-compressor para fornecer o ar necessário para a célula de flotação e a célula de flotação do tipo Partridge-Smith. Todos os testes de flotação realizados foram feitos em duplicata. O pH da solução foi ajustado com alíquotas de soluções diluídas de NaOH e HCl. A Figura 18 mostra a linha experimental da microflotação.

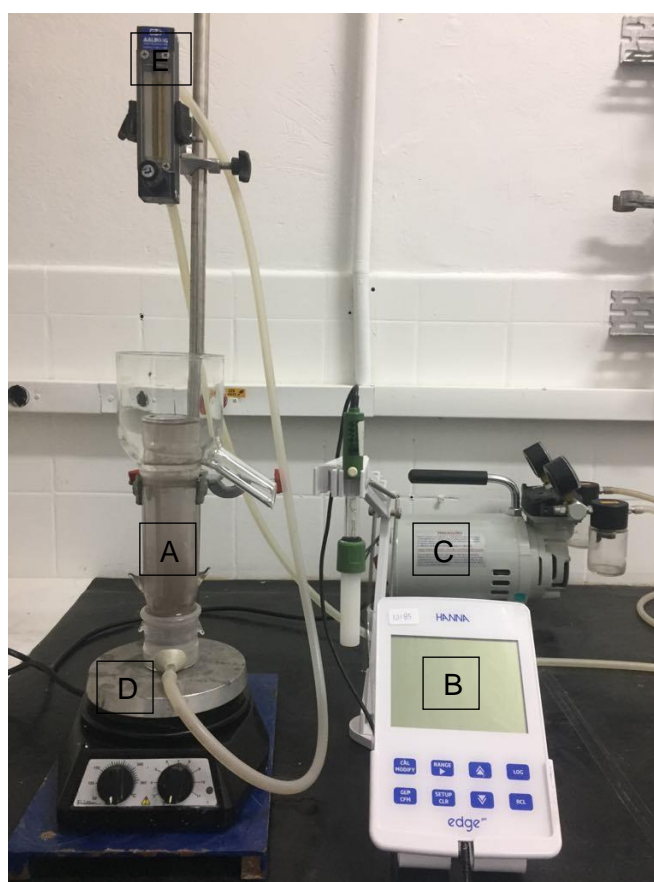


Figura 18 – Linha experimental da microflotação. A) Célula de flotação Partridge-Smith B) pHmetro, C) bomba de vácuo-compressor, D) Agitador magnético E) Rotômetro.

5.7.2.

Ensaio de flotação em bancada – Célula mecânica CDC

Os ensaios de flotação em bancada (*rougher*) e o circuito de flotação (*rougher, cleaner and scavenger*) foram conduzidos na célula mecânica CDC apresentada na Figura 19. Para tal precisou-se de um pHmetro para medir o pH da polpa, e a célula mecânica CDC. Todos os testes foram realizados em duplicata, utilizando 132,66 g de rejeito de minério de ferro equivalente a 15% de sólidos, o pH da solução foi ajustado com alíquotas de soluções diluídas de NaOH e HCl.



Figura 19 – A) Célula mecânica de flotação CDC.

6 Resultados e discussões

6.1. Análise química e mineralógica do minério de ferro

Os resultados da análise química realizado por volumetria e fluorescência de raios-x (FRX) podem ser encontrados na Tabela 7. Os resultados de análise volumétrica na amostra do rejeito de minério de ferro apresentaram um teor de Fe de 13,85%, e os resultados da FRX corroboram os resultados obtidos pelas análises volumétricas. A determinação de SiO_2 , Si, Fe_2O_3 foi feita por diferença do ferro total.

Tabela 7 – Análise química por FRX e volumétrica do rejeito de minério de ferro.

Composições (%)	SiO_2	Fe_2O_3	Fe	Si
Volumetria	80,20	19,80	13,85	37,00
FRX	80,30	19,73	13,80	37,53

A análise por difração de raios-x (DRX) do rejeito de minério de ferro apresentou as fases cristalinas da hematita como principal mineral portador do ferro e do quartzo como principal mineral portador de ganga (Figura 20).

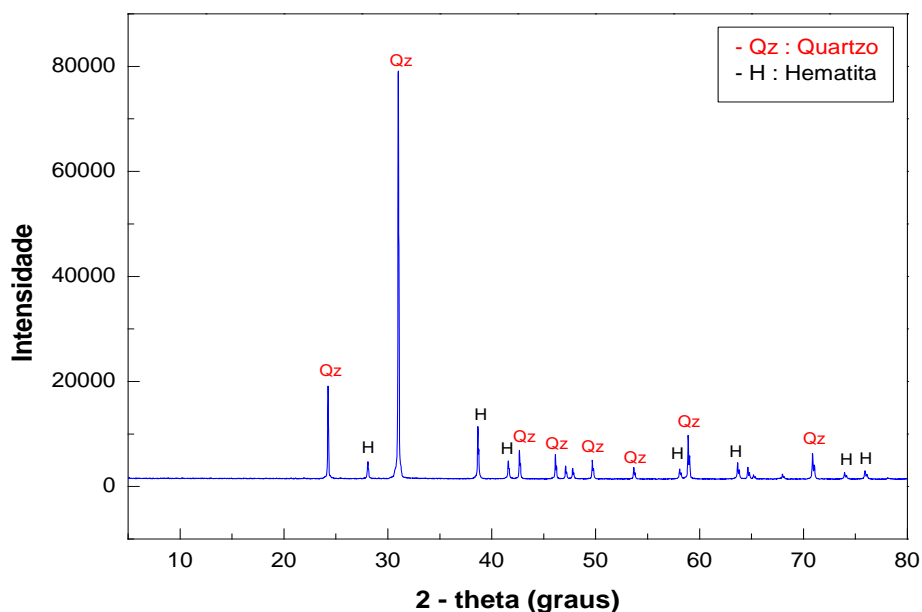


Figura 20 – Difratoograma de raios-x do rejeito de minério de ferro.

A curva da distribuição granulométrica da amostra de rejeito de minério de ferro (Figura 21) mostrou que 90% das partículas são $<106 \mu\text{m}$ e 15% partículas são $<20 \mu\text{m}$.

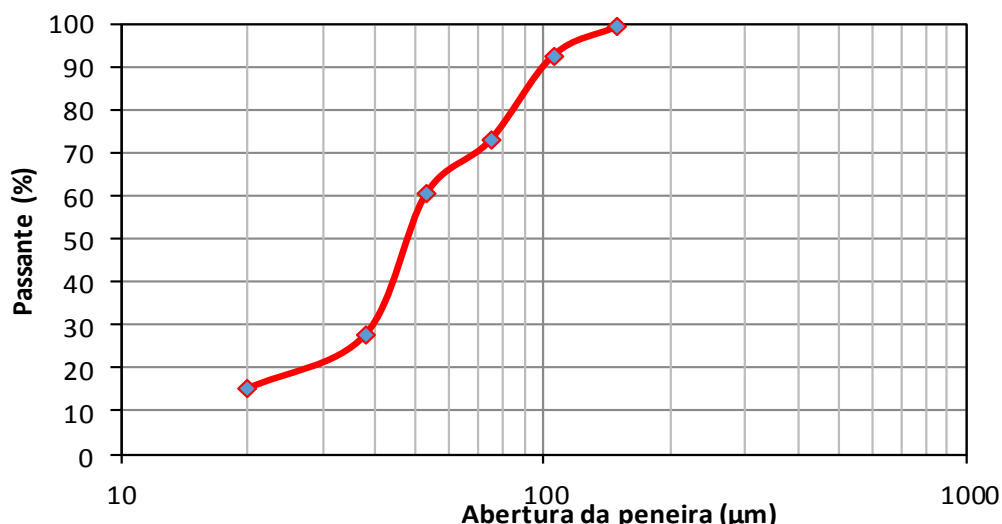


Figura 21 – Curva de distribuição granulométrica do rejeito do minério de ferro feita por peneiramento à úmido, partículas variando de $+150 \mu\text{m}$ - $20 \mu\text{m}$.

6.2. Medidas de tensão superficial

6.2.1. Efeito da concentração do biosurfactante

Os resultados do efeito da concentração de biosurfactante sobre a tensão superficial são apresentados na Figura 22. Foi observado que a tensão superficial da água diminuiu à medida que a concentração do biosurfactante aumentou, a tensão superficial da água pura apresentou um valor em torno de 71 mN/m ; após a adição de $0,16 \text{ g/L}$ do biosurfactante observou-se uma redução nos valores de tensão superficial para aproximadamente 36 mN/m , essa significativa redução da tensão superficial indica a influência dos compostos do biosurfactante. A concentração micelar crítica (CMC) foi atingida com a concentração de aproximadamente 1 g/L de biosurfactante.

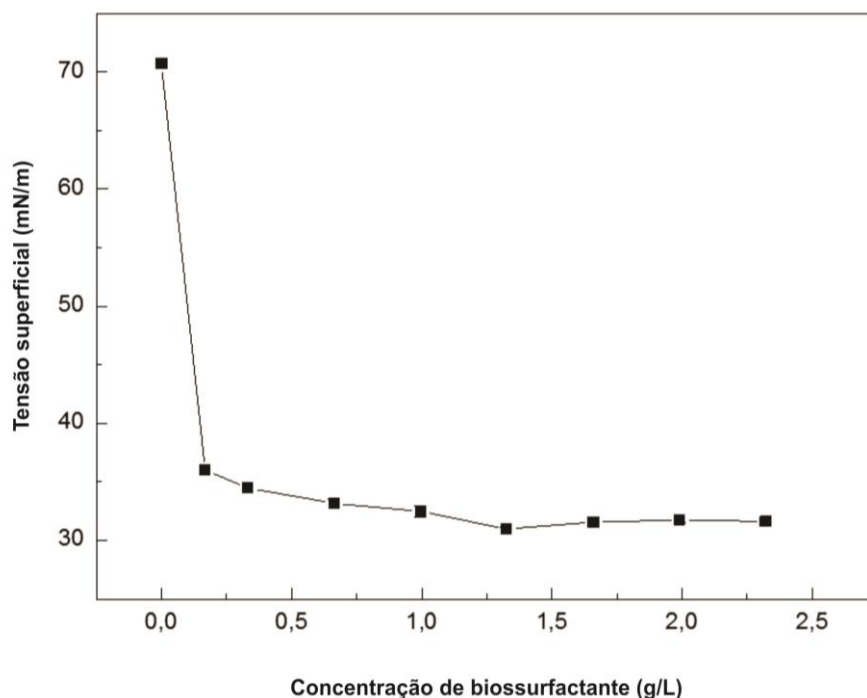


Figura 22 – Efeito da concentração de biossurfactante na tensão superficial da água a 21 ± 2 °C e pH 3.

O gênero *Rhodococcus* produz glicolípídeos contendo trealose, essa redução na tensão superficial pode ser atribuída devido a presença dessas substâncias surfactantes na interface líquido-gás (Puelles, 2016). O biossurfactante tem a capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial a níveis observados nos surfactantes sintéticos (Lang & Philp, 1998; Bicca et al., 1999). A natureza anfílica dos biossurfactantes faz com que eles sejam facilmente absorvidos pela interface líquido-gás reduzindo a tensão superficial (Szymanska & Sadowski, 2010).

Diferentes autores estudaram o efeito da concentração de diferentes biossurfactantes na tensão superficial, por exemplo, Christova & Stoineva (2014) avaliaram as propriedades dos biossurfactantes proveniente das bactérias *Rhodococcus*, os autores observaram que os biossurfactantes baixaram a tensão superficial da água de 72mN/m para aproximadamente 19 mN/m.

Oliveira (2018) estudou a tensão superficial em função da concentração do biossurfactante proveniente da estirpe bacteriana *Rhodococcus erythropolis*. Nesse estudo o autor observou a diminuição da tensão superficial da água de 73,72 mN/m para 62,89 mN/m, essa diminuição foi atribuída devido a presença de substâncias surfactantes trealolípídeos no biocoleto.

Puelles (2016) estudou a tensão superficial em função da concentração do biossurfactante proveniente da bactéria *Rhodococcus opacus* em pH neutro. O

autor observou um decrescimento da tensão superficial da água de 72 mN/m para 50,5 mN/m e uma concentração micelar crítica ao redor de 0,092 g/L.

Rufino et al. (2014) estudaram a tensão superficial do biossurfactante produzido pela *Candida lipolytica* UCP 0988. Os autores observaram a redução da tensão superficial da água de 70 mN/m para 25 mN/m com o aumento da concentração do biossurfactante.

Didyk & Sadowsky (2012) estudaram os biossurfactantes produzidos por *Bacillus circulans* e *Streptomyces sp.* para biomodificação das superfícies da serpentinita e do quartzo. Os biossurfactantes produzidos pela bactéria foram capazes de diminuir a tensão superficial da água de 72 mN/m para 28,6 mN/m (*Bacillus circulans*) e para 29,3 mN/m (*Streptomyces sp.*)

6.2.2. Efeito do pH

A Figura 23 apresenta os resultados do efeito do pH na tensão superficial para uma concentração de biossurfactante de 0,16 g/L. Na faixa de pH de 3 até 7 foram encontrados menores valores de tensão superficial em torno de 35 mN/m. Na faixa de pH entre 9 e 11, observou-se valores de 44,7 mN/m e 47,2 mN/m. Assim, pode-se constatar que na região ácida existe uma maior adsorção do biossurfactante na interface líquido/gás, ocorrendo maior diminuição da tensão superficial.

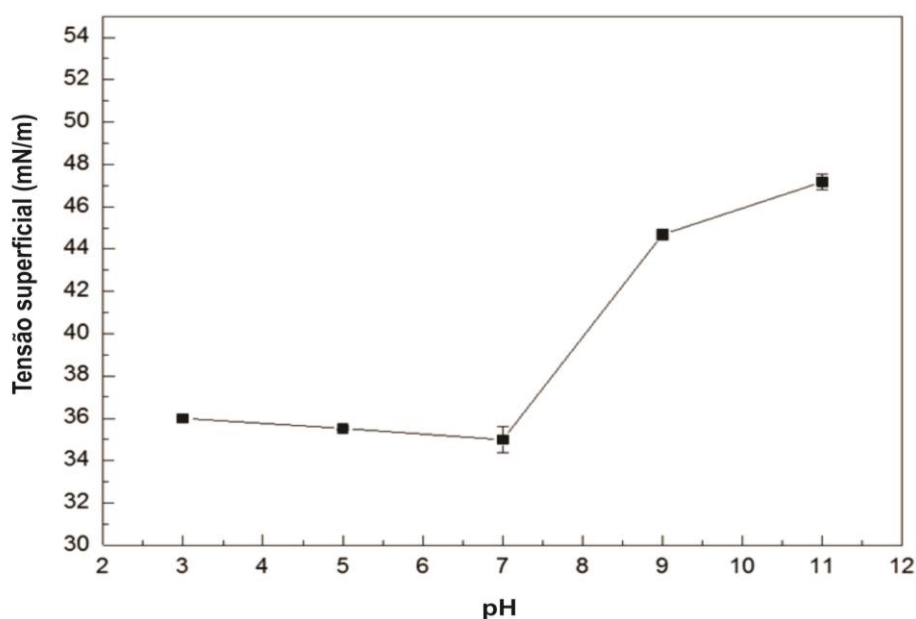


Figura 23 – Efeito do pH na tensão superficial da água a 21 ± 2 °C e concentração de biossurfactante 0,16 g/L.

A bactéria *R. opacus* apresentou um comportamento similar em pH ácido, Merma et al. (2013) avaliaram o efeito do pH na tensão superficial da água após a adição de biomassa da *R. opacus*. Os autores observaram que a tensão superficial diminui em meio ácido, atingindo o menor valor de 54,3 mN/m em pH 3. Acima de pH 7 houve um aumento no valor da tensão superficial e consequentemente não ocorre uma boa flotabilidade do mineral.

Oliveira (2018) estudou a tensão superficial em função do pH utilizando o biossurfactante produzido pela bactéria *Rhodococcus erythropolis*. Nesse estudo o autor observou que o valor de pH não alterou expressivamente a tensão superficial da água, alcançando a mínima tensão superficial em torno de 64mN/m em pH 3.

6.3. Medidas de potencial zeta

A Figura 24 apresenta os resultados obtidos nas medições de potencial zeta da hematita em diferentes concentrações de cloreto de potássio (eletrólito indifferente). O aumento da concentração do KCl provocou a diminuição da magnitude do potencial zeta da hematita, este comportamento ocorreu sem alterar o ponto isoelétrico (PIE) encontrado em torno de pH de 6,2. Esta diminuição está associada ao efeito de compressão da dupla camada elétrica causado pelo aumento da força iônica na solução (Hunter, 1981; Fuerstenau & Pradip, 2005).

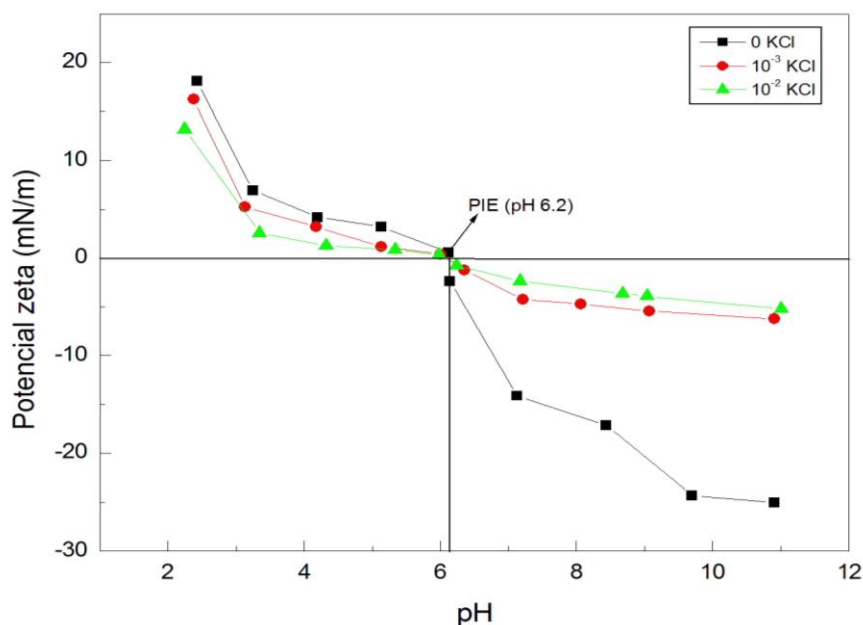


Figura 24 – Perfis do potencial zeta da hematita em diferentes concentrações de eletrólito indifferente (KCl), tamanho de partículas < 10 µm.

Os valores do PIE da hematita são encontrados geralmente na região de pH ácido a neutro, por exemplo, Parks (1965) apresentou um intervalo do PIE da hematita entre o pH 2,2 a 6,9. Oliveira et al. (2017), Oliveira (2018) e Hacha et al. (2018) apresentaram o PIE da hematita em torno de pH 5,2. Puelles (2016) apresentou o PIE da hematita, com concentração de eletrólito indiferente (10^{-3} mol/L NaCl), em torno de pH 7,5. De Mesquita et al. (2003) relataram um PIE da hematita em pH 5,1.

A explicação para estes diferentes resultados pode ser relacionada a diferentes fatores como a heterogeneidade mineral, a presença de impurezas na superfícies das amostras, as diferenças mineralógicas e ao tipo de amostras (naturais ou artificiais) (Lopes et al., 2009; Ma, 2012; Quast, 2015).

Ma (2012) explicou que abaixo do valor do pH referente ao PIE da hematita existe uma predominância da espécie $\equiv FeOH_2^+$, o que confere carga elétrica positiva a superfície da hematita. Perto do PIE há uma neutralidade dos grupos $\equiv FeO^-$ e $\equiv FeOH_2^+$ sendo a carga da partícula igual a zero. Acima do valor do pH referente ao PIE da hematita existe uma predominância da espécie $\equiv FeO^-$ o que confere carga elétrica negativa a superfície da hematita.

A Figura 25 apresenta os perfis de potencial zeta da hematita antes e após a interação com o biossurfactante com uma concentração de eletrólito indiferente (KCl) de 10^{-3} mol/L. Observa-se que após a interação da hematita com o biossurfactante ocorreu um ponto de reversão de carga em pH 3,6. Essa reversão de carga do PIE pode ser explicado devido à maior presença de grupos funcionais aniônicos do que grupos não iônicos ou catiônicos presentes no biossurfactante que podem ter se adsorvido na superfície do mineral. O gênero *Rhodococci* geralmente produzem biossurfactantes com diversidade estrutural, e frequentemente ocorrem como uma mistura complexa, a composição pode ter mono-, di-, tri-, tetramicولات que representam biossurfactantes lipídicos de trealose do tipo não-iônico e tetra-ésteres trealose constituindo o tipo aniônico de biossurfactantes (Lang & Philp, 1998; Kuyukina & Ivshina, 2010; Christova & Stoineva, 2014).

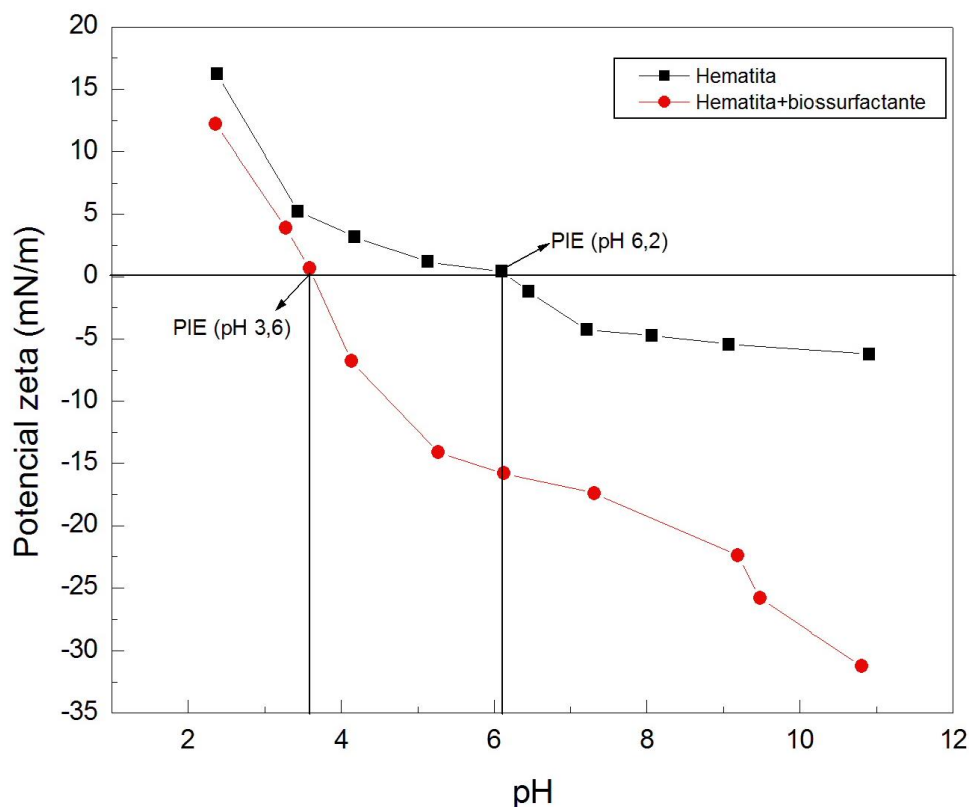


Figura 25 - Perfis do potencial zeta da hematita antes e após a interação com o biossurfactante, tamanho de partícula: $<10\ \mu\text{m}$, $[\text{KCl}]$: $10^{-3}\ \text{mol/L}$.

Outros estudos comprovam esse mesmo comportamento da hematita após a interação com o biossurfactante, por exemplo, Oliveira (2018) estudou a interação do biossurfactante proveniente da estirpe bacteriana *Rhodococcus erythropolis*. O autor observou a reversão de carga do PIE da hematita após a interação com o biossurfactante, mudando de pH 5,2 para pH 4,4. Puelles (2016), estudou a interação do biossurfactante proveniente da estirpe bacteriana *Rhodococcus opacus*. O autor observou a reversão de carga do PIE da hematita após a interação com o biossurfactante, mudando de pH 7,5 para pH 3,9.

A Figura 26 apresenta os perfis de potencial zeta da hematita antes e após a interação com o silicato de sódio com uma concentração de eletrólito indiferente de $10^{-3}\ \text{mol/L}$. Observa-se que após a interação da hematita com o silicato de sódio ocorreu um ponto de reversão de carga em pH 4,2.

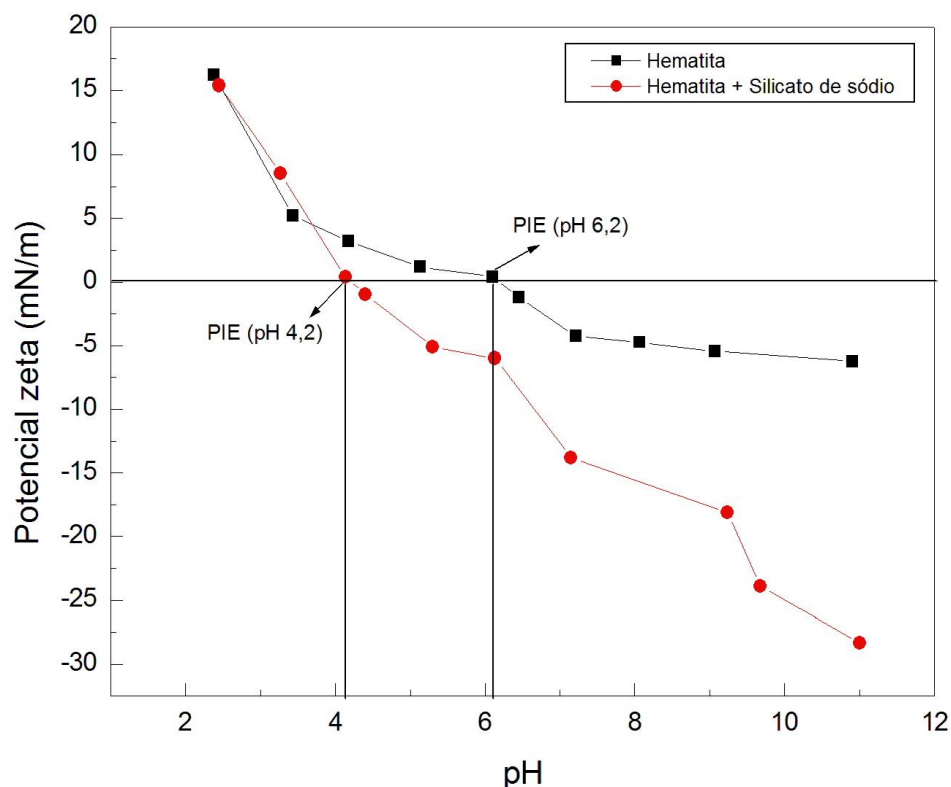


Figura 26 - Perfis do potencial zeta da hematita antes e após a interação com o silicato de sódio, tamanho de partícula: $<10 \mu\text{m}$, $[\text{KCl}]$: 10^{-3} mol/L .

Essa reversão de carga do PIE do mineral após a interação com o silicato de sódio pode ser causada pela adsorção de espécies monoméricas de silicato na superfície da hematita. Sob condições ácidas predominam o ácido silícico $\text{Si}(\text{OH})_4$ e SiO_2 como mostrado no diagrama de solubilidade de silicatos (Qi et al., 1993), em curvas de especiação (Jordan et al., 2007; Yang et al., 2008) e calculadas de acordo com os equilíbrios (modelo 1) por Marinakis & Shergold, 1985. Para entender a interação do silicato de sódio nas superfícies de óxidos, alguns autores, como Hansen et al. 1994, Jordan et al. 2007, Jolstera et al. 2010 realizaram estudos de adsorção que indicaram que as espécies de silicatos solúveis foram adsorvidas em superfícies de óxidos como a maghemita, goethita, hematita, magnetita, ao longo do amplo intervalo de pH ($2,8 < \text{pH} < 11$).

Lopes (2009) efetuou medidas de potencial zeta da hematita e do quartzo antes e após a interação com oleato de sódio e metassilicato de sódio condicionados em água destilada. E observou a reversão de carga do PIE da hematita no pH 3,5 quando usou oleato de sódio combinado com silicato de sódio.

6.4. Espectroscopia no Infravermelho – FTIR

A Figura 27 apresenta os espectros de absorbância do FTIR da hematita. As bandas de absorção $465,99\text{ cm}^{-1}$ e $545,42\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas ao modo de vibração do estiramento do grupamento Fe-O característico da hematita (Hacha et al., 2018; Oliveira, 2018).

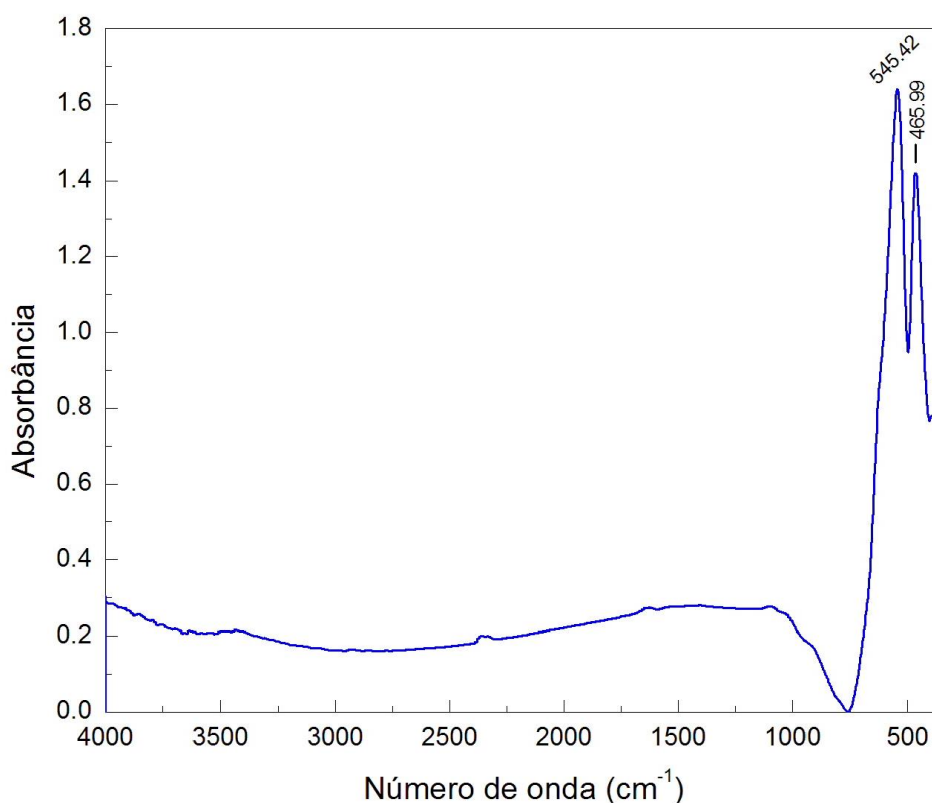


Figura 27 – Espectro do FTIR da hematita.

A Figura 28 apresenta os espectros de absorbância do FTIR do biossurfactante. A banda de absorção $3346,34\text{ cm}^{-1}$ pode indicar a presença de grupos hidroxila e grupos amina (NH) (Merma et al., 2017; Hacha et al., 2018; Merma et al., 2019). A banda de absorção de $1629,52\text{ cm}^{-1}$ pode corresponder aos alcenos (C=C), grupos cetonas (Puelles, 2016). As bandas de absorção entre 1500 cm^{-1} e 1300 cm^{-1} correspondem ao estiramento dos grupos CH_2 e CH_3 (Puelles, 2016; Merma et al., 2019). A banda de absorção $1040,57\text{ cm}^{-1}$ corresponde às vibrações do grupo funcional alceno (Puelles, 2016). Os grupos alceno, alceno, álcool e cetona podem indicar a presença de ácidos micólicos, produzidos pelos *Rhodococci*, esses grupos são responsáveis pela hidrofobicidade do mineral (Nishiuchi et al., 2000; Puelles, 2016).

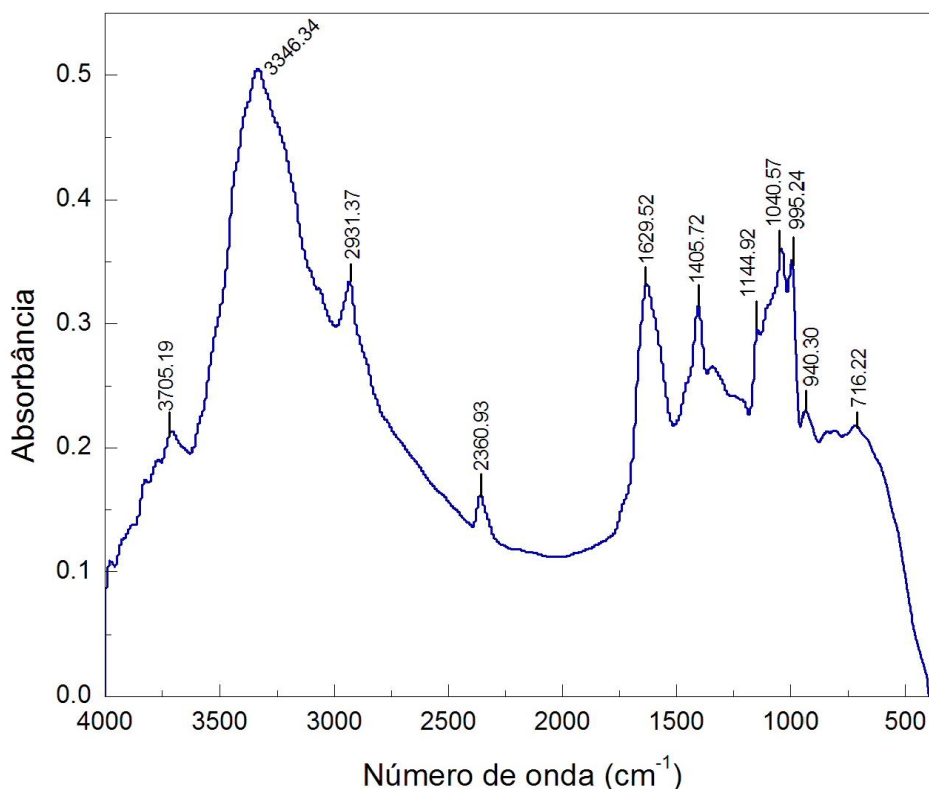


Figura 28 – Espectro do FTIR do biossurfactante.

A Figura 29 apresenta os espectros de absorvância do FTIR do silicato de sódio. A banda de absorção $472,21\text{ cm}^{-1}$ refere-se à vibração de flexão assimétrica de Si-O (Liu et al., 2015). A banda de absorção $1393,94\text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuída ao grupo Si-CH₂Cl (Launer & Arkles, 2013). A banda de absorção $1643,17\text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuída as moléculas de água constitucionais, modos de flexão e alongamento de OH (Bobrowski et al., 2012). A banda de absorção $2358,14\text{ cm}^{-1}$ está dentro da faixa de 2400 cm^{-1} e 2100 cm^{-1} e pode ser atribuído a vibrações de hidrogênio pontes entre o Si(OH)₄ e a rede de silicato, também podem corresponder ao grupo silano (Si-H) (Bobrowski et al., 2012). A banda de absorção $3450,35\text{ cm}^{-1}$ pode corresponder as vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (Deo & Natarajan, 1998).

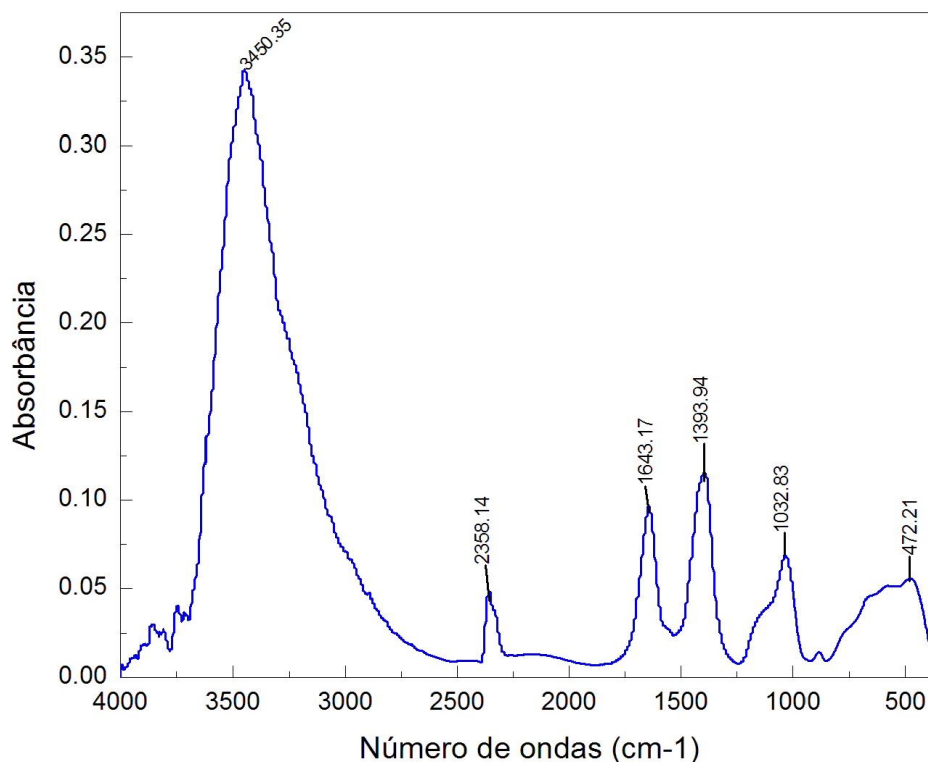


Figura 29 – Espectro do FTIR do silicato de sódio.

A Figura 30 apresenta os espectros de absorbância do FTIR da hematita após a interação com o biossurfactante em pH 3. As bandas de absorção características da hematita $465,99\text{ cm}^{-1}$ e $545,42\text{ cm}^{-1}$ que correspondem as vibrações de estiramento do grupo Fe-O são mantidas. Além disso, novas bandas de absorção são formadas como a banda de absorção $3426,29\text{ cm}^{-1}$ que pode indicar a presença de grupos hidroxila (Hacha et al., 2018; Merma et al., 2019). A banda de absorção $1084,56\text{ cm}^{-1}$ pode corresponder ao estiramento assimétrico dos grupos fosfato $[\text{PO}_2]$ presentes nos fosfolipídios e nos núcleos (Puelles, 2016; Merma et al., 2017; Merma et al., 2019). A banda de absorção a $1632,92\text{ cm}^{-1}$ pode indicar a presença de grupos alcenos ($\text{C}=\text{C}$), grupo carbonila ($\text{C}=\text{O}$) e $\text{C}=\text{N}$ (Puelles, 2016; Merma et al., 2019). Puelles (2016) reportou no FTIR bandas de absorção similares da hematita após a interação com o biossurfactante proveniente da *R. opacus*.

Portanto, as bandas de absorção observadas após a interação do biossurfactante com a hematita mostram que alguns grupos funcionais, como grupos alcenos ($\text{C}=\text{C}$), grupo carbonila, $\text{C}=\text{N}$ se adsorveram na superfície da hematita, podendo indicar a presença de ácidos micólicos que é responsável pela hidrofobização do mineral.

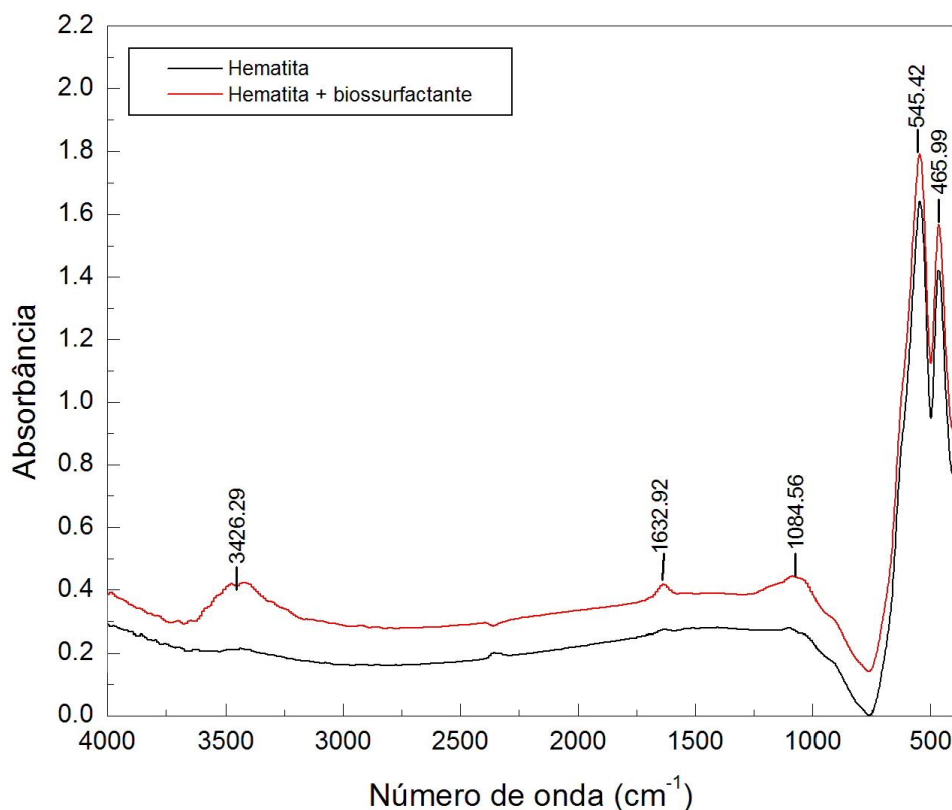


Figura 30 – Espectro do FTIR da Hematita após interação com o biossurfactante.

A Figura 31 apresenta os espectros de absorvância da hematita após a interação com o silicato de sódio em pH 3. As bandas de absorção características da hematita, $545,42\text{ cm}^{-1}$ e $465,99\text{ cm}^{-1}$ foram mantidas no espectro. Observou-se a banda de absorção $2357,53\text{ cm}^{-1}$ correspondente as vibrações de pontes de hidrogênio entre o Si(OH)_4 e a rede de silicato (Brobowski et al., 2012). A banda de absorção 1083 cm^{-1} pode corresponder as vibrações de estiramento Si-O-Si (Yang et al., 2008). A banda de absorção $3449,58\text{ cm}^{-1}$ pode corresponder as vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (Deo & Natarajan, 1998). Portanto, com o surgimento de novas bandas de absorção características do silicato de sódio na superfície da hematita, pode-se concluir que ocorreu a adsorção de espécies silicatadas na superfície mineral.

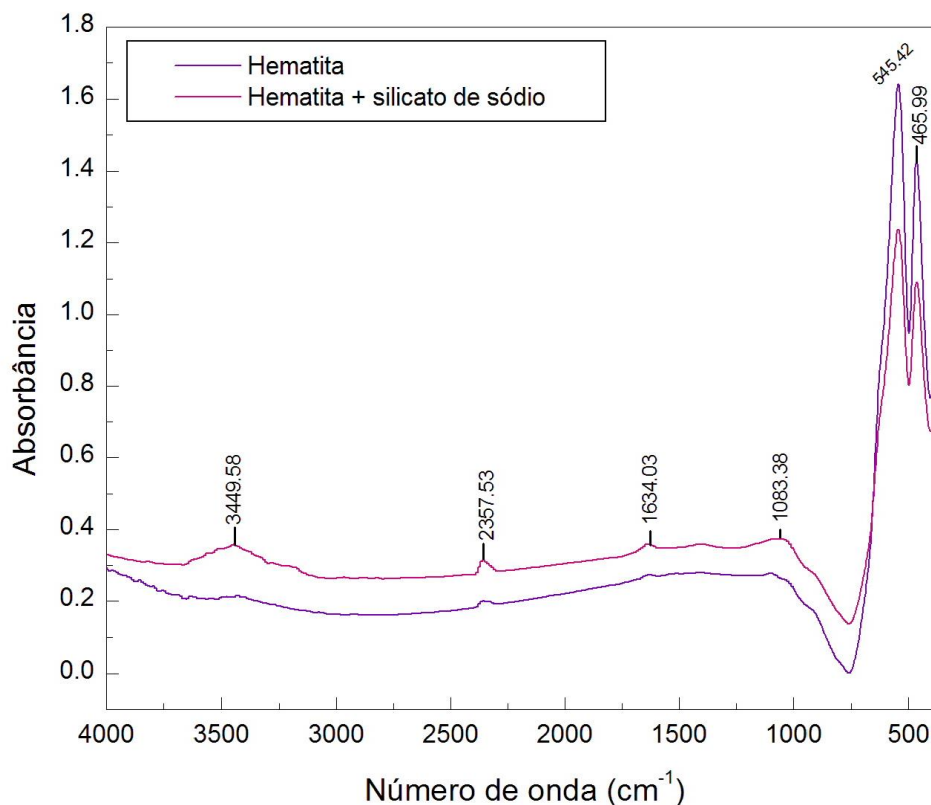


Figura 31 – Espectro do FTIR da Hematita antes e após interação com o silicato de sódio.

A Figura 32 apresenta os espectros de absorvância do quartzo após a interação com o biosurfactante em pH 3. Antes da interação, o quartzo apresentou a banda de absorção $459,89\text{ cm}^{-1}$ que pode ser atribuída à vibração de flexão assimétrica de Si-O (Liu et al., 2015, 2017). A banda de absorção $690,08\text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuída à vibração de flexão assimétrica de Si-O (Liu et al., 2015, 2017). A banda de absorção 784 cm^{-1} pode ser atribuída à vibração de estiramento simétrico de Si-O. A banda de absorção $1085,74\text{ cm}^{-1}$ que pode ser atribuída à vibração de estiramento assimétrico de Si-O, que era frequentemente considerado o primeiro pico característico de absorção de quartzo (Liu et al., 2017; Oliveira, 2018). Após a interação do quartzo com o biosurfactante foi observado que as bandas de absorção características do mineral não tiveram uma grande variação, e surgiu uma nova banda de absorção $3442,98\text{ cm}^{-1}$ que corresponde as vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (Deo & Natarajan, 1998). Portanto, observou-se que houve baixa absorção dos grupos funcionais do biosurfactante sobre a superfície do quartzo.

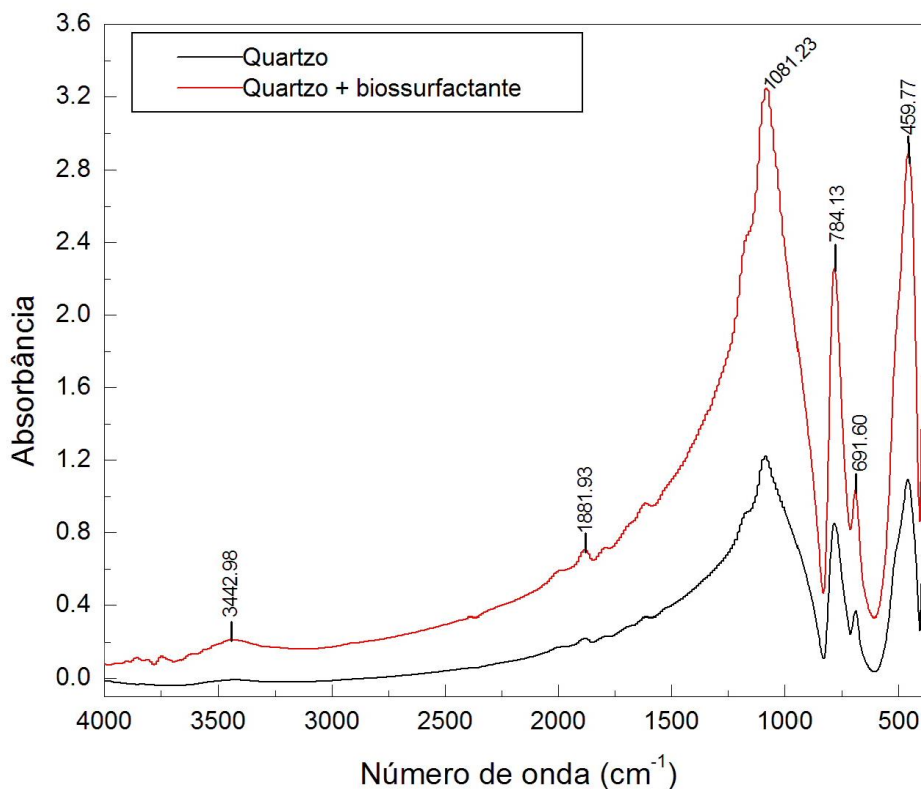


Figura 32 - Espectro do FTIR do quartzo antes e após a interação com o biossurfactante.

A Figura 33 apresenta os espectros de absorvância do quartzo após a interação com o silicato de sódio em pH 3. As bandas de absorção características do quartzo tiveram um pequeno deslocamento. Além disso, ocorreu o surgimento da banda de absorção 1623 cm^{-1} que pode ser atribuída à deformação assimétrica do grupo C-H e da banda de absorção $3449,04\text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuída as vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (Puelles, 2016; Hacha et al, 2018). Como as principais bandas de absorção do quartzo não obtiveram uma grande variação, pode-se afirmar que houve uma baixa adsorção do silicato na superfície do quartzo. Logo, houve um baixo efeito depressor sobre o mineral.

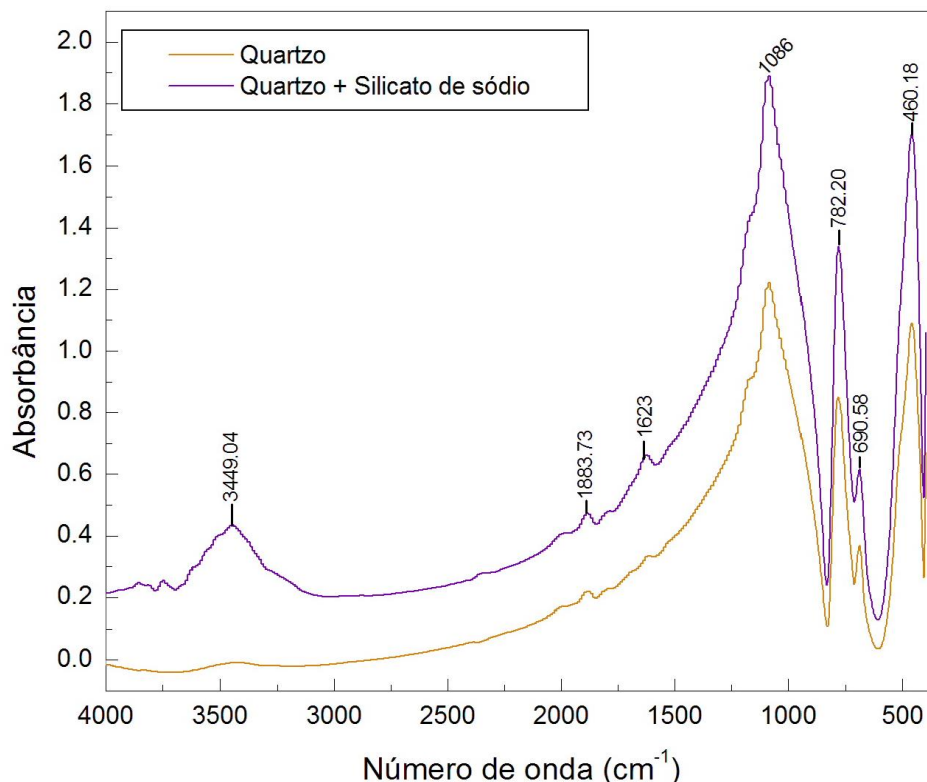


Figura 33 - Espectro do FTIR do quartzo antes e após a interação com o silicato de sódio.

6.5. Ensaio de flotação

6.5.1. Ensaio preliminares de flotação – célula Partridge-Smith

6.5.1.1 Efeito do pH

A Figura 34 apresenta os resultados do efeito do pH sobre a recuperação metalúrgica e teor de Fe para uma concentração de biossurfactante de 4000g/t. Segundo os resultados obtidos, o aumento do pH afeta negativamente a recuperação metalúrgica e melhora o teor de ferro até pH 5, acima desse pH, a recuperação metalúrgica e o teor de Fe cai significativamente. Segundo as condições avaliadas os melhores resultados para a recuperação metalúrgica e teor de Fe foram aproximadamente em torno de 37% e 28%, respectivamente, em pH 2. Este resultado pode ser atribuído às diferentes substâncias orgânicas, como polissacarídeos, ácidos graxos, fosfolipídios e aminoácidos presentes no biossurfactante que podem ser ativados em uma determinada faixa de pH,

contribuindo para a adsorção do biossurfactante na superfície da hematita (Puelles, 2016).

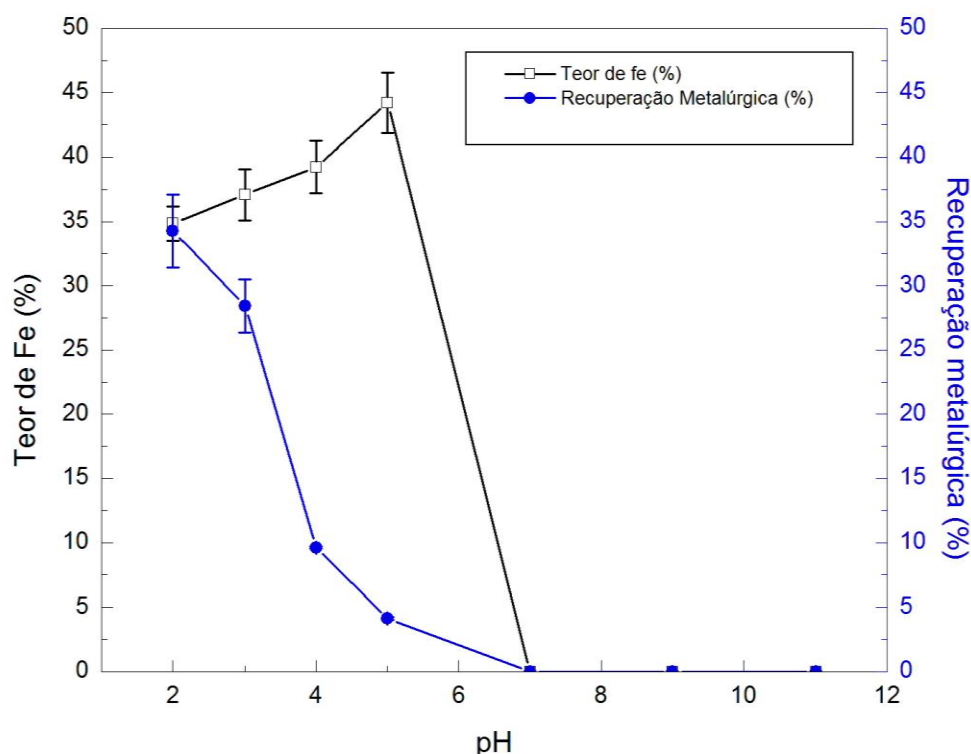


Figura 34 - Efeito do pH sobre a recuperação metalúrgica e teor do Fe (concentração de biossurfactante de 4000 g/t) utilizando a célula Patridge-Smith, tamanho de partículas +150 μ m -20 μ m, tempo de flotação 5 min, tempo de condicionamento 5 min.

Outros estudos realizados encontraram um comportamento semelhante sobre o efeito do pH no processo de flotação utilizando biossurfactantes, por exemplo, Puelles (2016) estudou a flotabilidade da hematita utilizando biossurfactante proveniente da bactéria *Rhodococcus opacus* e Oliveira (2018) estudou a capacidade de flotação da hematita utilizando biossurfactante proveniente da *Rhodococcus erythropolis* em um tubo de Hallimond. Os autores observaram que a maior flotabilidade ocorreu em pH 3. Os autores explicaram que em meio ácido pode ocorrer uma atração eletrostática entre a superfície mineral e o biossurfactante, pois o mineral apresenta carga positiva e os biossurfactantes apresentam compostos aniônicos o que favorece a adesão e, portanto, máxima recuperação da hematita.

Um surfactante convencional que apresenta características similares ao biossurfactante em pH ácido é o sulfonato comercial (AERO 825). Lopes (2009) estudou o oleato de sódio, o hidroximato e o sulfonato como coletores para a flotação da hematita. A autora observou que para uma dosagem de 500 mg/L de

sulfonato (AERO 825), em uma faixa de pH ácido (2 até 4), foi alcançada uma flotabilidade de hematita de aproximadamente 98% e acima de pH 4 a flotabilidade cai bruscamente.

6.5.1.2

Efeito da concentração de biossurfactante

A Figura 35 apresenta os resultados do efeito da concentração do biossurfactante sobre a recuperação metalúrgica e teor de Fe em pH 3. O aumento da concentração de biossurfactante afetou negativamente o teor de ferro e melhorou a recuperação metalúrgica até atingir 6000 g/t de concentração de biossurfactante, nessa concentração a recuperação e o teor de ferro foi em torno de 37%. Acima dessa concentração a recuperação metalúrgica decresceu, esta diminuição pode ser atribuída ao valor da concentração micelar crítica (CMC) do biossurfactante em torno de 1 g/L, onde ocorre a saturação do meio líquido com a formação de micelas.

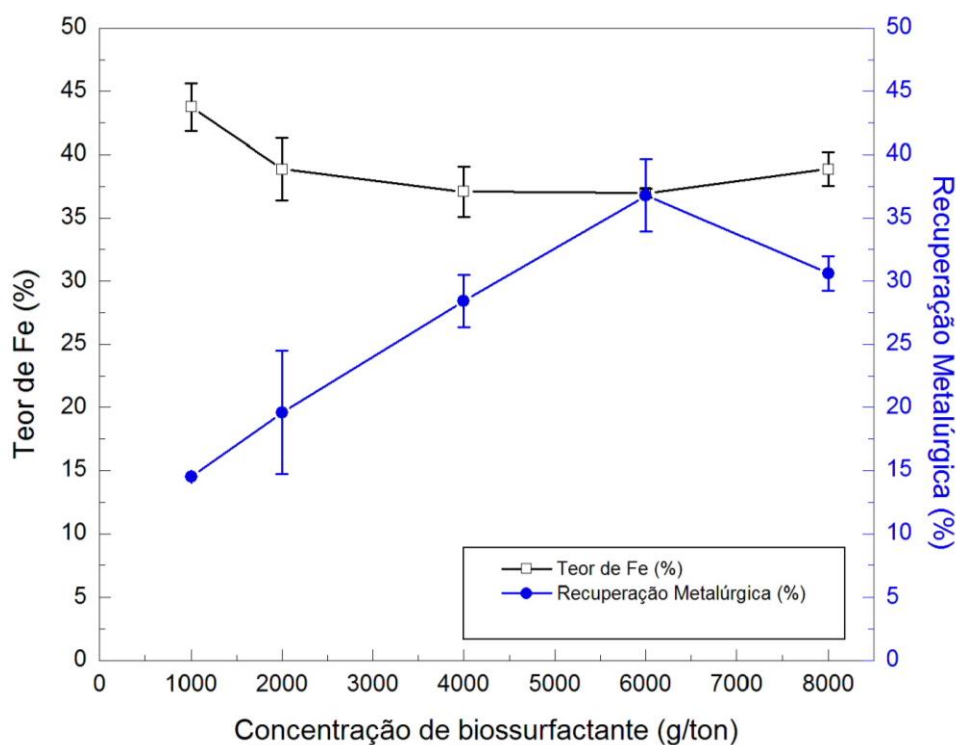


Figura 35 – Efeito da concentração do biossurfactante sobre a recuperação metalúrgica e teor do ferro em pH 3 utilizando a célula Patridge-Smith, tamanho de partículas +150 μm -20 μm , tempo de flotação 5 min, tempo de condicionamento 5 min.

Experimentos prévios de microflotação em tubo de Hallimond mostraram que o biossurfactante atuam como coletores da hematita, por exemplo, Merma et al. 2018 mostraram a maior flotabilidade da hematita foi em pH 3, utilizando uma

concentração de 50 mg/L de biossurfactante extraído da bactéria *Rhodococcus erythropolis*, nessas condições foi obtido uma recuperação de 98%. Puelles (2016) atingiu uma flotabilidade de aproximadamente 96% com uma concentração de 100 mg/L de biossurfactante extraído da bactéria *Rhodococcus opacus*, em pH 3. Oliveira (2018) estudou o efeito da concentração da biossurfactante *Rhodococcus erythropolis* na flotação da hematita. O autor observou que a maior flotabilidade, em torno de 99,88% da hematita ocorreu com a concentração de biossurfactante 100 mg/L em pH 3.

6.5.1.3 Efeito da concentração do depressor

A Figura 36 apresenta os resultados do efeito da concentração do silicato de sódio sobre a recuperação metalúrgica e teor de ferro para uma concentração de 4000 g/t de biossurfactante em pH 3. O aumento da concentração de depressor afetou negativamente a recuperação metalúrgica e melhorou levemente o teor de ferro. O melhor resultado foi obtido utilizando 100 g/t de silicato de sódio, nesta condição foram atingidas uma recuperação metalúrgica e teor de ferro de 24% e 37,42% respectivamente.

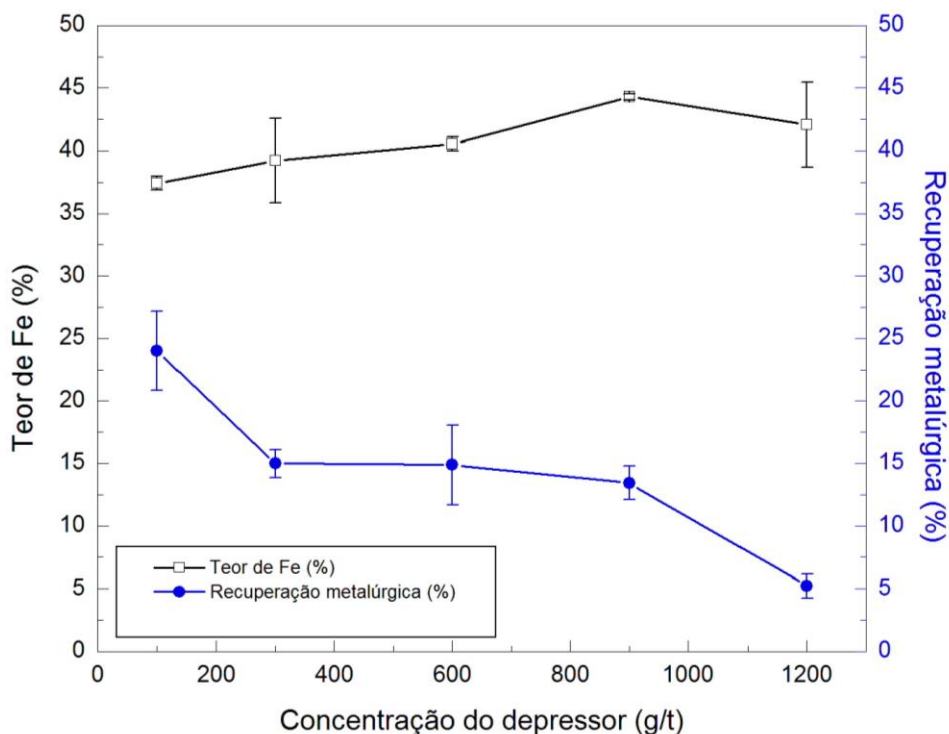


Figura 36 - Efeito da concentração do silicato de sódio na flotação do rejeito de minério do ferro utilizando a célula Patridge-Smith, solução de silicato de sódio a 5% (p/v), tamanho de partículas +150 μ m -20 μ m, tempo de flotação 5 min, Tempo de condicionamento 5 min.

Na literatura encontram-se estudos que comprovam que o silicato de sódio pode prejudicar na flotação da hematita. Por exemplo, Oliveira (2018) realizou ensaios de flotação do sistema hematita-quartzo em pH 3 e em tubo de Hallimond variando a concentração de metassilicato de sódio (0-400 mg/L), e observou que quanto maior a concentração de depressor menor a flotabilidade da hematita.

Lopes e Lima (2009) realizaram microflotação da hematita e do quartzo em tubo de Hallimond com oleato de sódio e silicato de sódio. Ao comparar os valores obtidos para a flotabilidade da hematita e do quartzo condicionados com silicato de sódio, os autores observaram que o silicato de sódio se mostrou mais efetivo na depressão da hematita (0,66% de flotabilidade em pH 7) do que na depressão do quartzo (15,9% de flotabilidade em pH 9).

Yang et al. (2008) estudaram a ação de silicatos em solução aquosa, os autores observaram que o aumento da concentração de silicato em solução aumenta a distribuição das espécies de silicatos tornando-se mais complexa, formando dímeros, trímeros, oligômeros e o SiO_2 coloidal em pH ácidos.

Lopes et al. (2011) relataram que ainda não se sabe quais espécies são responsáveis pelo efeito depressivo do silicato de sódio: silicato coloidal ou ânion silicato e explicou que o silicato coloidal é responsável pela depressão por forças eletrostáticas e o ânion silicato tem a capacidade de adsorver em superfícies carregadas negativamente por quimissorção.

Portanto, no pH ácido a depressão de hematita com o aumento da concentração de silicato de sódio pode ser atribuída às espécies de silicatos adsorvidas na superfície da hematita, mantendo a hidrofilicidade do mineral ou comprimindo o mineral.

6.5.2.

Ensaio de flotação em bancada – célula mecânica CDC

6.5.2.1

Efeito da concentração do biossurfactante

A Figura 37 apresenta os resultados do efeito da concentração do biossurfactante sobre a recuperação metalúrgica e teor de ferro em pH 3. O aumento da concentração de biossurfactante afeta negativamente a recuperação de ferro e o teor de ferro. As concentrações de 2000 g/t e 4000 g/t apresentaram resultados semelhantes na recuperação metalúrgica, em torno de 28,50% e 25,50%, e teor de Fe, em torno de 44%, respectivamente. Os diferentes

resultados obtidos na flotação realizada na célula Partridge-Smith e na célula mecânica de flotação CDC podem ser atribuídos a diferentes fatores. Segundo Kim et al. (2017) os fatores físicos (por exemplo, força de cisalhamento, porcentagem de sólidos) são diferentes em ambas as escalas, podendo afetar a flotabilidade mineral.

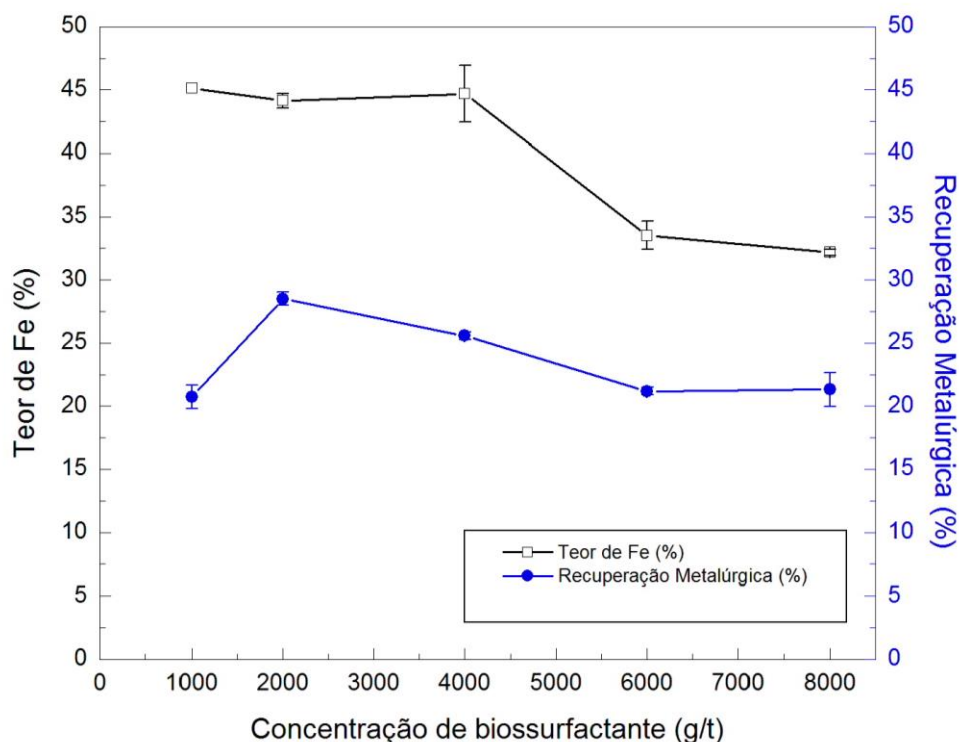


Figura 37 – Efeito da concentração do biossurfactante na flotação de rejeito de minério do ferro utilizando célula mecânica CDC, tamanho de partículas +150 μm -20 μm , tempo de flotação 5 min, tempo de condicionamento 5 min.

Segundo a literatura, o biossurfactante extraído do gênero *Rhodococcus* é aniônico (Christova & Stoineva, 2014) e, com base em estudos de eletroforese, o ponto isoelétrico de hematita foi em torno de 6,2. Portanto, a superfície da hematita é positivamente carregada e o biossurfactante é carregado negativamente, isso pode resultar na interação eletrostática e na recuperação da hematita (Puelles, 2016).

Comparando com coletores químicos aniônicos, o biossurfactante apresenta um comportamento similar ao AERO 825 (sulfonato) que atingiu 57,90% de teor de ferro, usando uma concentração de 1200 g/t AERO 825 (sulfonato) em pH ácido (Lopes, 2009). Martins et al. (2015) estudaram a flotação aniônica do rejeito de minério de ferro da mina Cauê. A amostra estudada continha teores médio iniciais de 27% Fe e 59% SiO_2 . O estudo realizado na etapa *Rougher* em pH ~ 5, com dosagem de coletor (ácidos graxos)

fixa em 200 g/t, obtive resultados de recuperação de Fe e teor de Fe em torno de 63% e de 34% respectivamente, e 7% de SiO_2 foi encontrado no concentrado.

6.5.2.2

Efeito da concentração do depressor

A Figura 38 apresenta os resultados do efeito da concentração do silicato de sódio sobre a recuperação metalúrgica e teor de ferro com concentração de 4000 g/t de biossurfactante em pH 3. A recuperação metalúrgica tem um leve aumento com o aumento da concentração do depressor, o teor de Fe atingiu 57,72% com uma concentração de silicato de sódio de 600 g/t, após essa concentração, o teor de ferro cai substancialmente.

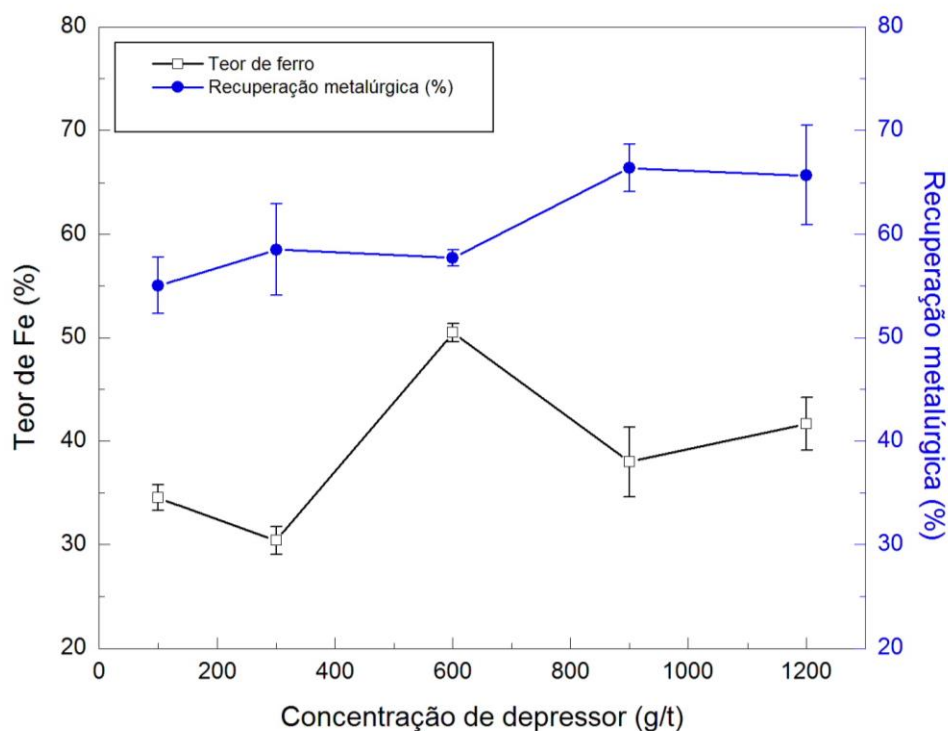


Figura 38 - Efeito da concentração do silicato de sódio na flotação de rejeito de minério de ferro, utilizando célula mecânica CDC, solução de silicato de sódio a 5% (p/v), tamanho de partículas +150 μm -20 μm , tempo de flotação 5 min, tempo de condicionamento 5 min.

Outros autores estudaram a utilização do silicato de sódio na flotação da hematita, por exemplo, Arantes e Lima (2013) observaram que as recuperação e teor de ferro foram superiores a 90% e a 55% respectivamente, neste estudo foi usado silicato de sódio como depressor. Em geral, o maior teor de Fe e o menor teor de SiO_2 foram provenientes de baixa densidade de polpa (60%) e dosagem de silicato de sódio (25 g/t) e alto teor de oleato de sódio (1200 g/t) em pH 7.

Lopes (2009) estudou as melhores condições de flotação (*rougher*) usando oleato de sódio (coletor) e silicato de sódio (depressor) da hematita e obteve os melhores resultados utilizando as concentrações de 1200 g/t de oleato de sódio, 600 g/t de silicato de sódio em pH 7. Nessas condições foram obtidos um teor de ferro no concentrado de 58,1%, recuperação metalúrgica de Fe de 88% e teor de sílica de 14,4%

6.6.3 Circuito de flotação

A Tabela 8 apresenta os resultados do circuito de flotação na célula mecânica de flotação CDC. Os testes foram feitos com circuito de flotação convencional, que consiste na etapa *rougher*, na etapa *cleaner* (concentrado da etapa *rougher*) e *scavenger* (rejeito da etapa *rougher*), foram avaliados a concentração de biossurfactante e a concentração de depressor em pH 3. Comparando o teste 1 e o teste 2 que foi realizado sem depressor observa-se que com o aumento da concentração de biossurfactante o teor de Fe e a recuperação metalúrgica do concentrado da etapa *cleaner* e *scavenger* praticamente não alteram os resultados. Para avaliar a ação do silicato de sódio é necessário comparar o teste 1 com o teste 3 e o teste 2 com o teste 4. Percebe-se que a concentração de depressor na flotação induz a diminuição do teor de Fe e recuperação metalúrgica do concentrado da etapa *cleaner* e *scavenger*. Portanto, o melhor resultado foi obtido no teste 1, que utiliza apenas biossurfactante como coletor da hematita, na etapa *scavenger* obteve 18,11% de recuperação metalúrgica e o 43,56% de teor de Fe. Na etapa *cleaner* obteve 44,11% de recuperação metalúrgica e o 64,78%, teor de Fe, a Figura 39 apresenta o concentrado e o rejeito após a etapa *cleaner*.



Figura 39 - Concentrado e o rejeito após a etapa *cleaner* do teste 1 do circuito de flotação.

Tabela 8 – Condições e resultados do circuito de flotação na célula mecânica de flotação CDC em pH 3, tamanho de partículas +150 µm -20 µm, tempo de flotação 5 min., Tempo de condicionamento 5 min.

Condições							Etapas	Rec. mássica (%)	Rec. Metal. (%)	Teor (%)	
RG		SCV		CL		Si				Fe	
BS	SS	BS	SS	BS	SS						
Teste 1	4000 g/t	0	2000 g/t	0	4000 g/t	0	SCVConc.	5.76	18.11	17.63	43.56
							SCV Rej.	79.04	26.77	43.60	4.69
							CL Conc.	9.43	44.11	3.45	64.78
							CL Rej.	4.74	7.80	31.51	22.78
Teste 2	2000 g/t	0	1000 g/t	0	3000 g/t	0	SCVConc.	5.04	18.27	13.16	50.26
							SCV Rej.	84.88	43.81	41.96	7.15
							CL Conc.	5.11	25.01	1.36	67.91
							CL Rej	3.94	8.58	26.59	30.16
Teste 3	4000 g/t	600 g/t	2000 g/t	900 g/t	4000 g/t	300 g/t	SCVConc.	5.41	15.01	21.06	38.42
							SCV Rej	84.22	31.24	43.30	5.14
							CL Conc.	4.97	20.59	8.38	57.41
							CL Rej.	3.86	5.73	33.00	20.55
Teste 4	2000 g/t	600 g/t	1000 g/t	900 g/t	3000 g/t	300 g/t	SCVConc.	3.11	8.13	22.56	36.19
							SCV Rej.	91.44	47.19	41.96	7.15
							CL Conc.	1.48	6.22	7.78	58.30
							CL Rej.	3.01	4.85	31.81	22.34
RG = rougher; SCV = scavenger; CL = cleaner; BS = biossurfactante; SS = silicato de sódio											

Nas condições avaliadas o silicato de sódio não age como depressor da ganga, e ainda pode prejudicar na flotação da hematita, segundo Jordan et al. (2007) o silicato de sódio dissolvido pode ser adsorvido na superfície de diferentes óxidos de ferro como goethita (α -FeOOH), hematita (α -Fe₂O₃) e magnetita (Fe₃O₄), com afinidades tornando-se maior na ordem dada.

Alguns estudos utilizam circuitos de flotação para elevar os teores dos minerais de interesse, por exemplo, Silva et al. (2015) fizeram uma reavaliação do circuito convencional de flotação do minério de ferro da mina germano. O circuito de flotação antes da modificação era composto das etapas: *rougher*, *cleaner*, *recleaner* e *scavenger*. Com a reavaliação a etapa *recleaner* foi transformada em *cleaner* da *scavenger*. Com a modificação do circuito, a carga circulante foi reduzida de 38% para 15% e o teor de Fe subiu para 41,7%, aumentando o tempo de residência. O teor de Fe no rejeito global foi reduzido de 10,92% (média 2013) para 10,2% gerando ganhos de recuperação em massa e metalúrgica.

7 Conclusões

Os resultados obtidos nas medições de tensão superficial demonstraram o grande poder surfactante do biocoleto. Com a concentração mínima de biossurfactante, a tensão superficial da água deionizada foi alcançada em torno de 36 mN/m. A concentração micelar crítica (CMC) foi atingida com uma concentração de aproximadamente 1 g/L.

Os resultados dos estudos eletroforéticos da hematita antes da interação com os reagentes apresentou PIE em pH 6,2. Após interação da hematita com biossurfactante ocorreu um ponto de reversão de carga em pH 3,9 e após a interação da hematita com silicato de sódio ocorreu um ponto de reversão de carga em pH 4,2 demonstrando a interação do biossurfactante e do silicato de sódio na superfície da hematita.

Os resultados da espectroscopia no infravermelho (FTIR) indicaram a presença de grupos funcionais característicos do biossurfactante e do silicato de sódio na superfície da hematita e a baixa adsorção do biossurfactante e do silicato de sódio na superfície do quartzo. Na superfície da hematita foram encontrados grupos funcionais como, C=N, grupos carbonila (C=O), grupos fosfato (PO₂), grupos alcenos (C=C). O resultado do FTIR indicou também a presença de grupos característicos do silicato de sódio na superfície da hematita como Si(OH)₄, Si-O-Si.

Os ensaios de microflotação do rejeito de minério de ferro utilizando a célula Patridge-Smith apresentaram na concentração de biossurfactante de 6000g/t e em pH 3 maior recuperação metalúrgica e teor de Fe, em torno de 37%, respectivamente. O aumento da concentração de silicato de sódio provocou diminuição da recuperação metalúrgica, afetando negativamente a recuperação da hematita. Isso pode ser atribuído à predominância de espécies silicatadas em meio ácido, que podem ser adsorvidos na superfície da hematita por forças eletrostáticas, mantendo o mineral hidrofílico.

Os ensaios de flotação na célula mecânica CDC (*rougher*) apresentaram nas concentrações de 2000 g/t e 4000 g/t resultados semelhantes para o teor de Fe em torno de 44%, e recuperação metalúrgica de 28,50% e 25,50%, respectivamente. Os ensaios de flotação usando silicato de sódio atingiu

aproximadamente 50,50% de recuperação metalúrgica e 58% de teor Fe utilizando uma concentração de silicato de sódio de 600 g/t.

O circuito de flotação (*rougher, cleaner, scavenger*) conseguiu incrementar o teor de Fe. O teste 1 apresentou maior recuperação metalúrgica e teor de Fe aproximadamente 44 % e 65 %, respectivamente. Nesse teste foi utilizado maiores concentrações de biossurfactante e não foi adicionado silicato de sódio na flotação. Nos testes 3 e 4, o silicato de sódio afetou negativamente a recuperação metalúrgica e o teor de Fe como apresentado nos testes de microflotação.

Por fim, conclui-se que a utilização do biossurfactante proveniente da estirpe bacteriana *Rhodococcus opacus* como biocoletor da hematita do rejeito de minério de ferro foi viável, demonstrando um grande potencial como coletor da hematita. Os resultados se mostraram satisfatórios, os estudos são exploratórios e demanda maiores pesquisas e esforços para se alcançar concentrados com teores coerentes aos exigidos pelo mercado.

ABAKA-WOOD, G.B.; ADDAI-MENSAH, J.; SKINNER, W. Selective flotation of rare earth oxide from hematite and quartz mixtures using oleic acid as a collector. **Advanced Powder Technology**, v.29, p. 1886-1899, 2018.

AGUIAR, M.A.M. Clatratos na flotação catiônica reversa de minério de ferro. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 107 p., 2014.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Informe Mineral (1º-2018). Brasília: ANM, 2018.

ANDRADE, F.R.D.; GOBBO, A.L.; SOUSA, L.F.A. Iron ore classification by XRD-Rietveld and cluster analysis: Classificação de minério de ferro por DRX-Rietveld e análise de agrupamento, **Revista Geologia USP**. São Paulo, v. 16, n. 2, p. 1-24, 2016.

ARAB, F.; MULLIGAN, C.N. Chapter three: Rhamnolipids. In: C. N. MULLIGAN, S.K. SHARMA, A. MUDHOO (Eds), *Biosurfactants: Research Trends and Applications*, 1 edition, p. 49-104: CRC Press, 2014.

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

ARANTES, R.S.; LIMA, R.M.F. Influence of sodium silicate modulus on iron ore flotation with sodium oleate. **International Journal of Mineral Processing**, v. 125, p. 157-160, 2013.

ARANTES, R.S.; SOUZA, T.F.; LIMA, R.M.F. Influência do módulo do silicato de sódio na flotação de minério de ferro: estudos fundamentais. **Tecnologia em Metalúrgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 39-45, 2017.

AVOTINS, P.V.; WANG, S.S.; NAGARAJ, D.R. Recent advances in sulfide collector development. In: Mulukutla, P.S. (Ed.), *Reagents for Better Metallurgy*. SME, Littleton, CO, USA, p. 47-56, 1994

AKBARI, S.; ABDURAHMAN, N.H.; YUNUS, R.M.; FAYAZ, F.; ALARA R.O. Biosurfactants - a new frontier for social and environmental safety: a mini review. **Biotechnology Research and Innovation**, v 2, n. 1, p. 81-90, 2018.

BALTAR, C.A.M. Flotação no tratamento de minérios. Editada universitária: UFPE, 2º Ed, 2010.

BALTAZAR, M.P.G.; GRACIOSO, L.H.; AVANZI, I.R.; KAROLSKI, B.; TENÓRIO, J.A.S.; NASCIMENTO, C.A.O.; PERPETUO, A.E. Copper biosorption by *Rhodococcus erythropolis* isolated from the Sossego Mine – PA – Brazil. **Journal of Materials and research technology**, v.379, 2018.

BELL, K.S.; PHILP, J.C.; AW, D.W.J.; CHRISTOFI, C. The genus *Rhodococcus* – A review. **Journal of Applied Microbiology**, v. 85, p.195–210, 1998.

BEZERRA, C.G. Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de

cimento. Dissertação de mestrado - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 158 p., 2017.

BEZERRA, M.S. Estudo da produção de biossurfactantes sintetizados por *pseudomonas aeruginosa* AP029-GVIA utilizando manipueira como fonte de carbono. Tese de doutorado – Engenharia química, Universidade Federal do Rio grande do Norte. Natal, 125 p., 2012.

BICCA, F.C.; FLECK, L. C.; AYUB, M.A.Z. Production of Biosurfactant by Hydrocarbon Degrading *Rhodococcus ruber* and *Rhodococcus erythropolis*. **Revista de Microbiologia**, v. 30, n. 8, p. 231-236, 1999.

BOTERO, A. E. C.; TOREM, M. L.; MESQUITA, L. M. S. Fundamental studies of *Rhodococcus opacus* as a biocollector of calcite and magnesite. **Minerals Engineering**, v.20, p.1026-1032, 2007.

BOTERO, A.E.C.; TOREM, M.L.; DE MESQUITA, L.M.S. Surface chemistry fundamentals of biosorption of *Rhodococcus opacus* and its effect in calcite and magnesite flotation. **Minerals Engineering**, v. 21, p.83–92, 2008.

BOBROWSKI, A.; STYPUŁA, B.; HUTERA, B.; KMITA, A.; DROŻYŃSKI, D.; STAROWICZ, M. FTIR spectroscopy of water glass - the binder moulding modified by ZnO nanoparticles. **Metalurgija**, v.51, n.4, p.477-480, 2012.

BRAGA, A.S.; PINTO, T.C.S.; MATAI, P.H.L.S.; LEAL FILHO, L.S. Concentração micelar crítica e concentração crítica de coalescência de reagentes de flotação. **Holos**, v. 7, p. 140 -147, 2015.

BRASIL, 2012, Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Governo Federal. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS_consultaspublicas.pdf> Acesso em: 04 out. 2018.

BUENO, S.M. Bactérias produtoras de biossurfactantes: isolamento, produção, caracterização e comportamento num sistema modelo. Tese de Doutorado - Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. São José do Rio Preto, 99 p., 2008.

BULATOVIC, S.M. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: v. 1: Flotation of sulfide ores. Elsevier, 2007.

CARVALHO, C.C.; WICK, L.Y.; HEIPIEPER, H.J. Cell wall adaptations of planktonic and biofilm *Rhodococcus erythropolis* cells to growth on C5 to C16 nalkane hydrocarbons. **Applied microbiology and biotechnology**, v.82, n.2, p.311-320, 2009.

CAYLLAHUA, J.E.B.; TOREM, M.L. Biosorption of aluminum ions onto *Rhodococcus opacus* from wastewaters. **Chemical Engineering Journal**, v. 161, p. 1-8, 2010.

CARLOS, D.U.; UIEDA, L.; BARBOSA, V.C.F. Imaging iron ore from the Quadrilátero Ferrífero (Brazil) using geophysical inversion and drill hole data. **Ore Geology Reviews**, v.61, p. 268–285, 2014.

CHRISTOVA, N.; STOINEVA, I. Trehalose Biosurfactants. In: Biosurfactants Research Trends and Applications, CRC Press, Boca Raton, p.183-190, 2014.

CZEMIERSKA, M.; SZCZEŚ, A.; PAWLIK, A.; WIATER, A.; JAROSZ-WILKOŁAZKA, A. Production and characterisation of exopolymer from *Rhodococcus opacus*. **Biochemical Engineering Journal**, v.112, p.143–152, 2016.

D'AVILA, L.S.C. Influência das Características do Itabirito Concentrado no Desempenho do Processo de Sinterização. Dissertação de Mestrado - Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 92 p., 2015.

DAS, K.; MUKHERJEE, A.K. Characterization of biochemical properties and biological activities of biosurfactants produced by *Pseudomonas aeruginosa* mucoid and non-mucoid strains isolated from hydrocarbon-contained soil samples. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 69, p.192-199, 2005.

DEO, N.; NATARAJAN, K.A. Interaction of *Bacillus polymyxa* with some oxide minerals with reference to mineral beneficiation and environmental control. **Minerals Engineering**, v.10, n. 12, p.1339–1354, 1997.

DEO, N.; NATARAJAN, K.A. Studies on interaction of *Paenibacillus polymyxa* with iron ore minerals in relation to beneficiation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 55, n.1, p.41–52, 1998.

DE MESQUITA, L.M.S.; LINS, F.A.F.; TOREM, M.L. Interaction of a hydrophobic bacterium strain in a hematite–quartz flotation system. **International Journal of Mineral Processing**, v. 57, p. 609-618, 2003.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário mineral brasileiro: Principais Substâncias metálicas, Brasília: DNPM, 2016.

DE FARIA, A.F. Produção, purificação, e caracterização química de biosurfactanes produzidos por *Bacillus Subtilis* em glicerina residual. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 173 p., 2010.

DHANARAJAN, G.; SEN, R. Amphiphilic molecules of microbial origin. In: Biosurfactants Research Trends and Applications, CRC Press, Boca Raton, p.175–180, 2014.

DIDYK, A.M.; SADOWSKI, Z. Flotation of serpentinite and quartz using biosurfactants. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v.48, n.2, p. 607–618, 2012.

DOBROWOLSKI, R.; SZCZES, A.; CZEMIERSKA, M.; JAROSZ-WIKOŁAZKA, A. Studies of cadmium(II), lead(II), nickel(II), cobalt(II) and chromium(VI) sorption on extracellular polymeric substances produced by *Rhodococcus opacus* and *Rhodococcus rhodochrous*. **Bioresource Technology**, v.225, p.113–120, 2017.

DUBEL, J.; SMITH, R.W.; MISRA, M.; CHEN, S. Microorganisms as chemical reagents: the hematite system. **Minerals Engineering**, v.5, n. 3-5, p.547–556, 1992.

DUDENKOV, S.V.; SHUBOV, L.Y.; GLAZUNOV, L.A. - Fundamentos de la teoria y la practica de empleo de reactivos de flotacion. Trad. URSS: MIR, 1980.

DWYER, R.; BRUCKARD, W.J.; REA, S.; HOLMES, R.J. Bioflotation and bioflocculation review: microorganisms relevant for mineral beneficiation. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Transactions of the institutions of Mining and Metallurgy: Section C)**, v.121, p. 65-71, 2012.

EKMEKYAPAR, F.; ASLAN, A.; BAYHAN, Y.K.; ÇAKICI, A. Biosorption of copper (II) by nonliving lichen biomass of *Cladonia rangiformis hoffm*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, n. 1, p. 293-298, 2006.

EL-MIDANY, A.A., ABDEL-KHALEK, M.A. Reducing sulfur and ash from coal using *Bacillus subtilis* and *Paenibacillus polymyxa*. **Fuel**, v.115, p. 589-595, 2014.

FARROKHPAY, S. The significance of froth stability in mineral flotation - A review. **Advances in colloid and interface science**, v. 166, n. 1, p. 1-7, 2011.

FARAHAT, M.; HIRAJIMA, T. Surface Characteristics of *Bacillus megaterium* and Its Adsorption Behavior onto Dolomite. **International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering**, v.9, n.11, 2015.

FLEURACKERS, S. Biosurfactants versus Chemically Synthesized Surface-Active Agents. In: KORASIC, N.; SUKAN, F.V. Biosurfactants Production and Utilization - Processes, Technologies, and Economics, CRC Press, 2015.

FRACCHIA, L.; Ceresa, C.; Franzetti, A.; Cavallo, M.; Gandolfi, I.; Van Hamme, J.; Gkorezis, P.; Marchant, R.; Banat, I.M. Industrial Applications of Biosurfactants. Biosurfactants Production and Utilization - Processes, Technologies, and Economics, CRC Press, 2015.

FONTES, W.C. Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento. Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 112 p., 2013.

FUERSTENAU, M.C.; PALMER, B.R. - Anionic flotation of oxides and silicates. In Fuerstenau, M. C. Flotation, v. 1, AIME. New York, p. 148 – 196, 1976.

FUERSTENAU, M.C.; SOMASUNDARAN, S. Flotation. In: Fuerstenau, M.C., Han, K.N. (Eds.), Principles of Mineral Processing. SME, Littleton, CO, USA, p. 245-306, 2003.

FUERSTENAU, D.W.; PRADIP. Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals. **Advanced Colloid Interfacial Science**, v.114, p.9–26, 2005

GOSWAMI, L.; MANIKANDAN, N.A.; DOLMAN, B.; PAKSHIRAJAN, K.; PUGAZHENTHI, G. Biological treatment of wastewater containing a mixture of polycyclic aromatic hydrocarbons using the oleaginous bacterium *Rhodococcus opacus*. **Journal of Cleaner Production**, v.196, p.1282-1291, 2018.

GOH, W.W.B.; SZE, C.C. AI Paradgims for teaching biotechnology. **Trends in biotechnology**. 2018.

GOMES, M.A. Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro. Dissertação de mestrado – Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 89 p., 2009.

HACHA, R.R. Eletroflotação de partículas finas de hematita em célula modificada de Partridge Smith usando *Rhodococcus opacus* como biorreagente. Tese de Doutorado - Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 174 p., 2016.

HACHA, R.R.; TOREM, M.L.; MERMA, A. G.; COELHO, V.F.S. Electroflotation of fine hematite particles with *Rhodococcus opacus* as a biocollector in a modified Partridge–Smith cell. **Minerals Engineering**, v. 126, p. 105-115, 2018.

HANSEN, H.C.B.; WETCHE, T.P.; RAULUND-RASMUSSEN, K.; BORGGAARD, O.K. Stability constants for silicate adsorbed to ferrihydrite. **Clay Minerals**, v.29, p. 341–350, 1994.

HAUSMANN, R.; SYLDATK, C. Types and Classification of Microbial Surfactants. In: KORASIC, N.; SUKAN, F.V. Biosurfactants Production and Utilization - Processes, Technologies, and Economics, CRC Press, 2015.

HARVEY, P. A. et al. Influence of sodium dodecyl sulphate and Dowfroth frothers on froth stability. *Minerals engineering*, v. 18, n. 3, p. 311-315, 2005.

HENKEL, M.; MÜLLER, M.M.; KÜGLER, J.H.; Lovaglio, R.B.; Contiero, J.; Sylatk, C.; Hausmann, R. Rhamnolipids as biosurfactants from renewable

resources: concepts for next-generation rhamnolipid production. **Process Biochemistry**, v.47, p. 1207–1219, 2012.

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

HOSSEINI, T.R.; KOLAHDOOZAN, M.; TABATABAEI, Y.S.M.; OLIAZADEH, M.; NOAPARAST, M.; ESLAMI, A.; MANAFI, Z.; ALFANTAZI, A. Bioflotation of Sarcheshmeh copper ore using *Thiobacillus ferrooxidans* bacteria. **Minerals Engineering**, v. 18, 371- 374, 2005.

HUNTER, R.J. Zeta Potential in Colloid Science – Principles and Applications. Academic Press Inc., 1981. (Colloid science series)

HUNTER, T.N.; PUGH, R.J.; FRANKS, G.V.; JAMESON, G.J. The role of particles in stabilising foams and emulsions. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 137, n. 2, p. 57-81, 2008.

IJAZ, K.; WATTOO, I.J.; ZESHAN, B.; MAJEED, T.; RIAZ, T.; KHALID, S.; BAIG, S.; SALEEM, A.M. Potential impact of microbial consortia in biomining and bioleaching of commercial metals. *Advancements in Life Sciences*. **International Quarterly Journal of Biological Sciences**, v. 5, p. 13-18, 2017.

JOLSTERÅ, R.; GUNNERIUSSON, L.; FORSLING, W. Adsorption and surface complex modeling of silicates on maghemite in aqueous suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 342, p. 493–498, 2010.

JORDAN, N.; MARMIER, N.; LOMENECH, C.; GIFFAUT, E.; EHRHARDT, J.-J. Sorption of silicates on goethite, hematite, and magnetite: Experiments and modelling. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 312, p. 224–229, 2007.

JUNIOR JAFELICCI, M.; VARANDA, L.C. O mundo dos colóides. **Química nova na escola**, n. 9, 1999.

KELLY, E.G.; SPOTTIWOOD, D.J. Introduction to mineral processing. Michigan University: Wiley, 491 p., 1982.

KIM, G.; PARK, K.; CHOI, J.; GOMEZ-FLORES, A.; HAN, Y.; CHOI, S.Q.; KIM, H. Bioflotation of malachite using different growth phases of *Rhodococcus opacus*: Effect of bacterial shape on detachment by shear flow. **International Journal of Mineral Processing**, v.143, p.98–104, 2015.

KIM, G.; CHOI, J.; SILVA, R.A.; SONG, Y.; KIM, H. Feasibility of bench-scale selective bioflotation of copper oxide minerals using *Rhodococcus opacus*. **Hydrometallurgy**, v.168, p. 94-102, 2017.

KIS, A.; LACZI, K.; ZSÍROS, S.; RAKHELY, G.; PEREI, K. Biodegradation of animal fats and vegetable oils by *Rhodococcus erythropolis* PR4. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.105, p.114-119, 2015.

KHOSHDAST, H.; SAM, A.; MANAFI, Z. The use of rhamnolipid biosurfactants as a frothing agent and a sample copper ore response. **Minerals Engineering**, v. 26, p.41–49, 2012.

KOLAHDOOZAN, M.; TABATABAEI, Y.S.M.; YEN, W.T.; HOSSEINI, T.R.; SHAHVERDI, A.R.; OLIAZADEH, M.; NOAPARAST, M.; ESLAMI, A.; MANAFI, Z. Bioflotation of low grade Sarcheshmeh copper sulfide. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 57, p. 485-490, 2004.

KOSARIC, N. Biosurfactants and their applications for soil bioremediation. **Food Technology Biotechnology**, v.39, p. 295-304, 2001.

KRAMER, A.; GAULOCHE, S.; MARTINS, M.; LEAL FILHO, L.S. Surface Tension Measurement for Optimization of Flotation Control. **Procedia Engineering**, v. 46, p. 111-118, 2012.

KUMAR, V.V.; RAMARAO, K.D. Sharma Microbial induced flotation studies on sphalerite ore. **Journal Materials Science and Engineering A**, v.3, p. 488-493, 2013.

KUYUKINA, M.S.; IVSHINA, I. B. Rhodococcus Biosurfactants: Biosynthesis, Properties, and Potential Applications. In: Alvarez, H.C.M. (Ed.) *Biology of Rhodococcus*, Springer, p. 373-391, 2010.

LANG, S.; PHILP, J.C. Surface-active lipids in rhodococci. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 74, p. 59-70, 1998.

LANG, S. Biological Amphiphiles: Microbial Surfactants. **Opinion in Colloid and Interface Science**, v.7, p.12-30, 2002.

LAUNER, J.P.; ARKLES, B. Infrared analysis of organosilicon compounds: spectra-structure correlations. **Silicon Compounds: Silanes & Silicones**, p. 175- 178, 2013

LAUDER, D.W. The recycle mechanism in recirculation separation systems. **Minerals Engineering**, V.5, n.6, p. 631-647, 1992.

LEJA, J. Flotation Surfactants. In: Leja, J. *Surface Chemistry of Froth Flotation*. 2nd Printing., New York and London: Plenum Press, p. 205 – 339, 1983.

LIU, W.; WANG, X.; LIU, W.; WEI, D.; WANG, B.; SHEN, Y. Synergistic Adsorption of N-dodecyl Ethylenediamine Along with Polyethylene Glycol (PEG) on Quartz. **International Journal of Electrochemical Science**, v.10, p.9310-9323, 2015.

LIU, W.; LIU, W.; WEI, D.; LI, M.; ZHAO, Q.; XU, S. Synthesis of N, N-Bis (2-hydroxypropyl) laurylamine and its flotation on quartz. **Chemical Engineering Journal**, v.309, p. 63–69, 2017.

LOPES, G. M.; LIMA, R. M. F. Flotação direta de minério de ferro com oleato de sódio. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 323-329, 2009.

LOPES, G.M. Flotação direta de minério de ferro. Dissertação de mestrado – Engenharia de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 176 p., 2009.

LOPES, G.M.; PERES, A.E.C.; PEREIRA, C.A. ANTÔNIO, L.M. The use of sodium silicate as a dispersant/depressant in the mineral industry. XXIV ENTMME, Salvador, 2011.

LOPEZ, L.Y.; MERMA, A.G.; TOREM, M.L.; Pino, G.H. Fundamental aspects of hematite flotation using the bacterial strain *Rhodococcus ruber* as bioreagent. **Minerals Engineering**, v. 75, p.63–69, 2015.

MARTINS, M.; MONTE, M.B.M.; SILVA, W.; BICALHO, L.S.; LEAL FILHO, L.S. Flotação aniônica de rejeito do minério de ferro de cauê. In: 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, 2015, Rio de Janeiro-RJ.

MARINAKIS, K.I.; SHERGOLD, H.L. Influence of sodium silicate addition on the adsorption of oleic acid by fluorite, calcite and barite. **International Journal of Mineral Processing**, v.14, p. 177-193, 1985.

MARQUÉS, A.M.; PINAZO, A.; FARFAN, M.; ARANDA, F.J.; TERUEL, J.A.; ORTIZ, A.; MANRESA, A.; ESPUNY, M.J. The physicochemical properties and chemical composition of trehalose lipids produced by *Rhodococcus erythropolis* 51T7. **Chemicals and Physics of Lipids**, v.158, n. 2, p.110 – 117, 2009.

MA, M. Iron ore flotation. 131 p, 2012.

MANYUCHI, M.M.; CHIUTSI, P.; MBOHWA, C.; MUZENDA, E.; MUTUSVA. T. Bio ethanol from sewage sludge: A bio fuel alternative. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 123-127, 2018.

MAIER, R. Biosurfactants: Evolution and Diversity in Bacteria. **Advances in Applied Microbiology**, v. 52, p.101-116, 2003.

MAKKAR, R.S.; CAMEOTRA, S.S. Biosurfactant production by a thermophilic *Bacillus subtilis* strain. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 18, p. 37-42, 1997.

MCMURRY, J. Organic Chemistry. Brooks/Cole 8 ed., Canada, 2012.

MEDEIROS, A.R.S.; BALTAR, C.A.M. Importance of collector chain length in flotation of fine particles. **Minerals Engineering**, v. 122, p 179-184, 2018.

MERMA, A.G.; TOREM, M.L.; MORAN, J.V.; MONTE, M.B.M. On the fundamental aspects of apatite and quartz flotation using a Gram positive strain as a bioreagent. **Minerals Engineering**, v. 48, p. 61-67, 2013.

MERMA, A.G.; TOREM, M.L. Bioflotation of apatite and quartz: Particle size effect on the rate constant. **REM –Revista Escola de Minas**, v. 68, n. 3, p. 343-350, 2015.

MERMA, A.G.; HACHA, R.R.; TOREM, M.L. Cellular Adaptation: Culture conditions of *R. opacus* and bioflotation of apatite and quartz. **REM - International Engineering Journal**, v. 70, n.1, p.67-76, 2017.

MERMA, G.A.; OLIVEIRA, C.A.C; TOREM, M.L.; DOS SANTOS, B.F. Comparison Study of Hematite Bioflotation by *R. erythropolis* and its Biosurfactant: Experiments and Neural Network Modeling. **Chemical Engineering Transactions**, v. 65, p. 439-444, 2018.

MERMA, G.A.; OLIVEIRA, C.A.C; HACHA, R.R.; TOREM, M.L.; DOS SANTOS, B.F. Optimization of hematite and quartz bioflotation by an artificial neural network (ANN). **Journal of Materials Research and Technology**, V. 8, n. 3, p. 3076-3087, 2019.

MEHRABANI, J.V.; NOAPARAST, M.; MOUSAVI, S.M., DEHGHAN, R., RASOOLI, E.; HAJIZADEH, H. 2010. Depression of pyrite in the flotation of high pyrite low-grade lead–zinc ore using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Minerals Engineering**, v. 23, 10-16, 2010.

MIGLIORELLI, S.A.F. Produção de biosurfactantes por cepas bacterianas cultivadas em corantes sintéticos. Dissertação de Mestrado – Ciência e tecnologia de alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 90 p., 2003.

MINNIKIN, D.E. Chemical principles in the organization of lipid components in the mycobacterial cell envelope. *Research in Microbiology*, 142(4), 423-427,1991.

MORYA, V.K.; KIM, E. Sophorolipids: Characteristics, Production, and Applications. In: *Biosurfactants Research Trends and Applications*, CRC Press, Boca Raton, p.105-117, 2014.

MULLIGAN, C.N.; SHARMA, S.K.; MUDHOO, A.; MAKHIJANI, k. Green Chemistry and Biosurfactant Research. In: Biosurfactants Research Trends and Applications, CRC Press, Boca Raton, p.1- 23, 2014.

MUKHERJEE, S.; DAS, P.; SEN, R. Towards Commercial Production of Microbial Surfactants. **Trends in Biotechnology**, v. 24, p.509-515, 2006.

NASCIMENTO, D.R. Flotação aniônica de minério de ferro. Dissertação de mestrado – Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 116 p., 2010.

NATARAJAN, K.A.; DEO, N. Role of bacterial interaction and bioreagents in iron ore flotation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 62, p. 143–157, 2001.

NITSCHKE, M.; PASTORE, G.M. Biossurfactantes: propriedades e aplicações. **Química Nova**, v. 25, n.5, p.772-776, 2002.

NISHIUCHI, Y.; BABA, T.; YANO I. Mycolic acids from Rhodococcus, Gordonia, and Dietzia. **Journal of Microbiological Methods**, v. 40, n.1, p.1-9, 2000.

OLIVERA, C.A.C.; MERMA, A.G.; PUELLES, J.G.S.; TOREM, M.L. On the fundamentals aspects of hematite bioflotation using a Gram positive strain. **Minerals Engineering**, v.106, p.55-63, 2017.

OLIVEIRA, C.A.C. Flotação do sistema hematita-quartzo utilizando o biossurfactante solúvel produzido por Rhodococcus erythropolis. Tese de Doutorado - Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 148 p., 2018.

ORTIZ, A.; TERUEL, J.A.; ESPUNY, M.J.; MARQUÉS, A.; MANRESA, A.; ARANDAA, F.J. Interactions of a bacterial biosurfactant trehalose lipid with phosphatidylserine membranes. *Chemistry and Physics of Lipids*, v.158, p.46–53, 2009.

PARKS, G.A. The isoelectric points of solid oxides, solid hydroxides and aqueous hydroxo systems. **Chemical Reviews**, v.65, p.177–198, 1965.

PATTANAIK, A.; VENUGOPAL, R. Investigation of Adsorption Mechanism of Reagents (Surfactants) System and its Applicability in Iron Ore Flotation – An Overview. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 25, p. 41-65, 2018.

PERES, A.C.C.; ARAUJO, A. C. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: CHAVES, A. P. (Org.). Flotação: o estado da arte no Brasil (Coleção Teoria e prática do tratamento de minérios, vol. 4). São Paulo: Signus Editora, 2006. p. 1-29.

PERFUMO, A.; SMYTH, T. J. P.; MARCHANT, R.; and BANAT, I.M. Production and roles of biosurfactants and bioemulsifiers in accessing hydrophobic substrates. In: K. N. Timmis (Ed.) Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, p. 1501–1512, 2010a.

PIRÔLLO, M.P.S. Estudo da produção de biossurfactantes utilizando hidrocarbonetos. Dissertação de mestrado – Instituto de biociências, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 73 p., 2006.

POLLMANN, K.; KUTSCHKE, M.S.; RAFF, J.; LAWACEK, G.H.; LEDERER, F.L. Bio-recycling of metals: Recycling of technical products using biological applications. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 4, p. 1048-1062, 2018.

PONTES, I.F.; LEAL FILHO, L.S. Purificação de talco do Paraná por flotação e alvejamento químico. In: XXI Encontro Nacional de tratamentos de minérios e metalurgia extrativa. Natal – RN, 2005.

PRASAD, M.S. Reagents in the mineral industry – Recent trends and applications. **Minerals Engineering**, v. 5, p. 279-294, 1992.

PROMMACHAN, O. Production and application of biosurfactant from *Bacillus MUV4*. Tese de Doutorado – Biotecnologia, Prince of Songkla University. Índia, 107 p., 2002.

PUELLES, J.G.S. Flotação de hematita utilizando biossurfactante extraído da *Rhodococcus opacus*. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Materiais, Processos químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 112 p., 2016.

QUAST, K. Effects of solution ageing on the zeta potential characteristics of a hematite ore. **Advanced Powder Technology**, v. 26, n. 4, p. 1219-1224, 2015.

QI, G. W.; KLAUBER, C.; WARREN, L.J. Mechanism of action of sodium silicate in the flotation of apatite from hematite. **International Journal of Mineral Processing**, v. 39, n. 3–4, p. 251-273, 1993.

RAO, S.R. Physical chemistry of interfaces. In: RAO, S. R (Ed.) Surface chemistry of froth flotation. Springer US: New York, v.1, p. 143-208, 2004.

RAO, K.H.; VILINSKA, A.; CHERNYSHOVA, I.V. Minerals bioprocessing: R & D needs in mineral biobeneficiation. **Hydrometallurgy**, v.104, p.465–470, 2010.

REA, S.M.; MCSWEENEY, N.J.; DWYER, R.B.; BRUCKARD, W.J. Application of biotechnology in iron ore beneficiation. In: Iron Ore: Liming, L. (Ed.) Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. **Elsevier**, p. 373-391, 2015.

ROSEN, M. J. Surfactants and interfacial phenomena. 2nd ed.; New York. Chapter 2-5, p. 33-229, 1989.

ROSIÈRE, A.C.; JÚNIOR CHEMALE, F. Itabirito e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão. **Geonomos**, v.8, n. 2, p. 27-43, 2000.

RUFINO, R.D.; LUNA, J.M.; TAKAKI, G.M.C.; SARUBBO, L.A. Characterization and properties of biosurfactant by *Candida lipolytica* UCP 0988. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 17, p. 34-38, 2014.

SATPUTE, S. K.; BANPURKAR, A. G.; DHAKEPHALKAR, P. K.; BANAT, I. M.; CHOPADE, B.A. Methods for investigating biosurfactants and bioemulsifiers: A review. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 30, p.127–144, 2010.

SALOPEK, B.; KRASIC, D.; FILIPOVIC, S. Measurement and application of zeta potential. **Rudarsko – geolosko – naftni zbornik**, v. 4, p. 147-151, 1992.

SANWANI, E.; CHAERUN, S.; MIRAHATI, R.; WAHYUNINGSIH, T. Bioflotation: bacteria-mineral interaction for eco-friendly and sustainable mineral processing. **Procedia Chemistry**, v. 19, p. 666–672, 2016.

SANTOS, E.P. Alternativas para o tratamento de ultrafinos de minério de ferro da mina do Pico /MG por flotação em coluna. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 136 p., 2010.

SARVAMANGALA, H.; NATARAJAN, K.A. Microbially induced flotation of alumina, silica/calcite from haematite. **International Journal of Mineral Processing**, v.9, n.1, p.70–77, 2011.

SHARMA, P.K.; RAO, K.H. Analysis of different approaches for evaluation of surface energy of microbial cells by contact angle goniometry. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 98, p.341–46, 2002.

SHASHIKALA, A.R.; RAICHUUR, A.M. Role of interfacial phenomena in determining adsorption of *Bacillus polymyxa* onto hematite and quartz. **Colloids and Surfaces B**, N.1, v.24, p.11–17, 2002.

SILVA, P.M.A.; VIANA, P.J.; CAVALCANTE, L.B.A. Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração. 2011.

SILVA, J.P.P.; BALTAR, C.A.M.; LEITE, J.Y.P.; PERES, A.E.C. Elucidação da ação do silicato de sódio como depressor na flotação de calcita e quartzo. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia-GO, 2013.

SILVA, A.A.; PERES, A.E.C.; DE OLIVEIRA, P.S.; SILVA, J.P.M. Reavaliação de circuito de flotação convencional de minério de ferro. In: XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas-MG, 2015.

SILVA, A.A. Reavaliação de Circuito de Flotação Convencional de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado - Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 98 p., 2016.

SILVA, R.G.O. Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de mineração de ferro. Dissertação de Mestrado - Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto, 132 p., 2010.

SMITH, R.W.; MISRA, M. Recent Developments in the Bioprocessing of Minerals. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 12, p. 37-60, 1993.

SMITH, R.W.; MISRA, M.; DUBEL, J. Mineral bioprocessing and the future. **Minerals Engineering**, v. 4, n. 7-11, p. 1127-1141, 1991.

SCHMITT, J.; FLEMING, H-C. FTIR-spectroscopy in microbial and material analysis. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 41, p. 1-11, 1998

SUTCLIFFE, I.C.; BROWN, A.K.; DOVER, L.G. The Rhodococcal Cell Envelope: Composition, Organisation and Biosynthesis. In: Alvarez, H.M. (Ed.) *Biology of Rhodococcus*, v.16, 2010.

SZYMANSKA, A.; SADOWSKI, Z. Effects of biosurfactants on surface properties of hematite. **Adsorption**, v.16, p. 233–239, 2010.

TRAHAR, W.J. The flotation of iron ore, CSIRO ore-dressing investigations, Circular, n. 7, 1963.

TRAHAR W.J. The selective flotation of galena from sphalerite with special reference to the effects of particle size. **International Journal of Mineral Processing**, v. 3, n. 2, p. 151-166, 1976.

VASANTHAKUMAR, B.; RAVISHANKAR, H.; SUBRAMANIAN, S. A novel property of DNA - as a bioflotation reagent in mineral processing. **PLOS ONE**, v.7, n.7, 2012.

VALADÃO, G.E.S.; ARAÚJO, A.C. Introdução ao tratamento de minérios. Editora UFMG, 1º ed., 2012.

VECINO, X.; DEVESA-REY, R.; CRUZ, J.M.; MOLDES, A.B. Evaluation of biosurfactant obtained from *Lactobacillus pentosus* as foaming agent in froth flotation. **Journal of Environmental Management**, v.128, p.655-660, 2013.

VILINSKA, A.; RAO, K.H. Leptosirillum ferrooxidans-sulfide mineral interactions with reference to bioflotation and bioflocculation. **The Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. V.18, p.1403–1409, 2008.

WEI, Y.H.; LAI, C.C.; CHANG, J.S. Using Taguchi experimental design methods to optimize trace element composition for enhanced surfactin production by *Bacillus subtilis* ATCC 21332. **Process Biochemistry**, v.42, p.40–45, 2007.

WILLS, B.A.; NAPIER-MUNN, T.J. Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Elsevier Science & Technology Books, 456 p., 7^o Ed., 2006.

WILLS, B.A.; FINCH, J. Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Elsevier Science & Technology Books, 512 p., 8^o Ed., 2016.

WOLFF, A.P. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale. Dissertação de Mestrado – Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 107 p., 2009.

YANG, H.; ZHANG, Q.; JIANG, Z. Adsorbability of *Mycobacterium phlei* on hematite surface. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, v. 14, p.103–106, 2007.

YANG, X.; ROONASI, P.; HOLMGREN, A. A study of sodium silicate in aqueous solution and sorbed by synthetic magnetite using in situ ATR-FTIR spectroscopy. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 328, p. 41–47, 2008.

YANG, H.; TANG, Q.; WANG, C.; ZHANG, J. Flocculation and flotation response of *Rhodococcus erythropolis* to pure minerals in hematite ores. **Minerals Engineering**, v. 45 p.67–72, 2013.

YANG, C.; CUI, C.; QIN, J.; CUI, X. Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 36–42, 2014.

YUAN, Y.; LEE, T.R. Contact angle and wetting properties. In: Bracco, G., Holst, B. (Eds.), *Surface Science Techniques*, Springer, p. 3–29, 2013.

YÜCE, A.E.; TARKAN, H.M.; DOGAN, M.Z. Effect of bacterial conditioning and the flotation of copper ore and concentrate. **African Journal of Biotechnology**, v.5, p. 448-452, 2006.

ZOUBOULIS, A.I.; MATIS, K.A.; LAZARIDIS, N.K.; GOLYSHIN, P.N. The use biosurfactants in flotation: application for the removal of metal ions. **Minerals Engineering**, v.16, n.11, p. 1231 – 1236, 2003.

9

Anexos

9.1

Metodologia experimental da análise química de ferro total

Reagentes necessários:

- a) Ácido clorídrico P.A. (HCl).
- b) Cloreto estanhoso a 10 % - pesar 2,5 g e dissolver em 30 ml de ácido clorídrico. Após a dissolução, adicionar 20 ml de água deionizada.
- c) Cloreto de mercúrio a 5% (HgCl₂) - pesar 5 g e dissolver em 100 ml de água deionizada.
- d) Solução sulfo-fosfórica – 300 ml de água deionizada, 300 ml de H₂SO₄ e 300 ml de H₃PO₄. Adicionar o H₂SO₄ lentamente na água, esperar esfriar a solução e então, adicionar o H₃PO₄.
- e) Solução indicadora – pesar 0,1 g de difenilamino sulfonato de sódio em 100 ml de água deionizada.
- f) Solução de K₂Cr₂O₇ – secar o dicromato de potássio a 100 graus por 1 hora na estufa. Pesar 4,904g e dissolver com água deionizada em um balão volumétrico de 1 litro.

Procedimentos de análise:

- a) Pesar 0,25 g de amostra e transferir para um Erlenmeyer de 500 ml contendo um pouco de água (5-10 ml);
- b) Adicionar 20 ml de HCl e 3 gotas de solução de cloreto estanhoso a 10%;
- c) Aquecer em chapa branda (80-90 graus) até a decomposição total da amostra;
- d) Retirar da chapa e, adicionar em agitação constante, gota a gota a solução de cloreto estanhoso até o desaparecimento da coloração amarelada. Adicionar uma gota em excesso;
- e) Lavar as paredes do Erlenmeyer com água fria até 50 ml.

- f) Resfriar em temperatura ambiente e então adicionar 10 ml de cloreto de mercúrio 5%, agitar brandamente e deixar em repouso por 5 minutos;
- g) Diluir com água deionizada até 200 ml;
- h) Adicionar 15 ml de solução sulfo-fosfórica;
- i) Adicionar 3 gotas de solução indicadora;
- j) Titular com solução de $K_2Cr_2O_7$ até a mudança de cor para violeta.

1. Cálculo do ferro total

$$\% Fe_{Total} = \left(\frac{Volume_{K_2Cr_2O_7} * 0.1 * 0.055845 * 100}{Peso_{Amostra}} \right)$$

9.2.

Potencial Zeta

9.1.1.

Etapas preliminares

1. Preparação das amostras minerais com tamanho de partícula <38 µm;
2. Preparação de soluções para titulação;
3. Adequação de soluções buffers (padrões) a temperatura ambiente (25°C).

9.1.2

Procedimento detalhado

9.1.2.1

Medição automática

1. Ligar o aparelho Zetasizer – Malvern;
2. Ligar o aparelho que regula o pH (bomba dosadora do Zetasizer);
3. Ligar o computador;
4. Manuseio na bomba dosadora do Zetasizer;
 - a. Tirar a proteção do eletrodo;

- b. Tirar a tampa superior;
- c. Encaixar o eletrodo na frente das mangueiras que entrará as soluções (buffers);
- d. Conectar o fio do eletrodo atrás do aparelho, do lado esquerdo;
- e. Ligar o botão atrás do aparelho;
- f. Lavar o eletrodo;
- g. Secar o eletrodo;

5. Abrir o programa Zetasizer no computador;

6. Criar um arquivo novo no programa:

- a. File
- b. New
- c. Measurement file
- d. Colocar o nome da amostra

7. Calibrar o pH na bomba dosadora do Zetasizer (Este procedimento é realizado com o suporte do programa Zetas

- b. Calibration points
- c. Regular pH para 1,68, encaixar o tubo de pH 1,68, colocar um agitador magnético (peixe) dentro do tubo;
- d. Esperar até o final da medição do pH;
- e. Tirar o tubo do equipamento, tirar o agitador magnético (peixe), tampar o tubo;
- f. Lavar e secar o eletrodo;
- g. Regular pH para 4, encaixar o tubo de pH 4, colocar um agitador magnético (peixe) dentro do tubo
- h. Esperar até o final da medição do pH;
- i. Tirar o tubo do equipamento, tirar o agitador magnético (peixe), tampar o tubo;
- j. Lavar e secar o eletrodo;
- k. Regular pH para 7, encaixar o tubo de pH 7, colocar um agitador magnético (peixe) dentro do tubo;
- l. Esperar até o final da medição do pH;
- m. Tirar o tubo do equipamento, tirar o peixe, tampar o tubo;
- n. Lavar e secar o eletrodo;
- o. Regular pH para 10, encaixar o tubo de pH 10, colocar um agitador magnético (peixe) dentro do tubo
- p. Esperar até o final da medição do pH;

- q. Tirar o tubo do equipamento, tirar o agitador magnético (peixe), tampar o tubo;
- r. Lavar e secar " o eletrodo;
- s. Clique OK

8. Os ensaios foram feitos sendo do meio ácido para o meio básico. Então, as soluções tritantes usadas foram:

- a. HCl 0,05 M;
- b. KOH 0,05 mol;
- c. KOH 0,1 mol;

9. Completar os tubos (tubos de plástico com solução reguladora de pH) da bomba dosadora do Zetasizer de acordo com as suas necessidades;

10. Clicar em MPT-2 (Ícone no programa):

a. Para tirar as bolhas de ar das mangueirinhas, coloque um Becker:

- i. Apertar o botão Prime;
- ii. Fazer pelo menos 5 ciclos;
- iii. Após o final dos ciclos, apertar OK;
- iv. Lavar e secar o eletrodo;

b. Para colocar a sua amostra:

- i. Conectar a célula nas 2 mangueiras;
- ii. Colocar sua amostra em tubo com solução de 10 ml, adicionando o agitador magnético e amostra mineral;
- iii. Colocar o tubo no aparelho;
- iv. apertar o botão Fill para iniciar;
- v. Apertar o botão Fill para parar;
- vi. Se tiver bolha na célula coloque no reverso;
- vii. Revezar até sair as bolhas;
- viii. apertar o botão OK.

11. Colocar a amostra no aparelho

- a. Apertar o botão verde do aparelho da esquerda, a tampa irá se abrir;
- b. Colocar a célula no aparelho da esquerda com cuidado;
- c. Tampar

12. Iniciar a medição;

- a. Clicar em Measure
- i. Clicar Measurment;

ii. Titration;

iii. pH;

iv. Potencial zeta;

b. Sample

i. Colocar um nome na amostra

c. Titulação

i. Vermelho – Colocar o ácido, qual a solução e a concentração da solução;

ii. Amarelo – Colocar a base, qual a solução e a concentração da solução;

iii. Verde – Colocar a base, qual a solução e a concentração da solução;

d. Seqüência

i. Marca ou começar pelo pH inicial

ii. End – pH ácido;

iii. Colocar incremento – 0,5

iv. Colocar a precisão – 0,15 ou 0,2

v. Clicar OK

13. Limpeza do sistema:

a. Tirar a mostra utilizada;

b. Colocar em um béquer em baixo dos tubos, para tirar a mostra contida nas mangueiras;

c. Clique em MPT-2 (Ícone no programa):

d. Clicar no botão Fill

e. Clicar no botão Fill

f. Se tiver bolha na célula coloque no reverso;

g. Revezar até sair as bolhas;

h. clicar OK

i. Colocar um tubo com água destilada;

j. Clicar no botão clean;

k. Clicar no botão OK. Pode pausar quando quiser.

l. Retirar o tubo com água e coloque o béquer de volta;

m. Apertar Fill – Vai sair a água da célula e das mangueiras;

n. Desconectar as mangueiras da célula e coloque-o sobre um papel toalha, coloque também as mangueiras sobre papel toalha;

o. Desligar o programa e o computador;

p. Desligar o aparelho do meio;

q. Desligar o aparelho da esquerda;

r. Limpar e secar o eletrodo;

- s. Colocar a tampa de volta no eletrodo;
- t. Guardar tudo.

9.3. FTIR

9.3.1 Etapas preliminares

1. Cominuir as amostras com gral e pistilo até atingir um tamanho adequado ($<38\ \mu\text{m}$) e secar na estufa por 8 horas.
2. Secar o KBr durante 8 horas no forno mufla.

9.3.2 Preparação da pastilha.

OBS: A preparação de esta pastilha é para usar o modo transmission E.P.S.

A pastilha é uma mistura da sua amostra (sólida) com brometo de potássio (KBr) numa relação de 1/200. Desta forma se quiser preparar uma única pastilha siga as seguintes instruções ou nas proporções adequadas (1/200) abaixo:

1. Pesar 0,5 mg da sua amostra (balança de 4 casas);
2. Pesar 99,5 mg de KBr (balança de 4 casas);
3. Misturar e moer no gral com pistilo;
4. Colocar a mistura no molde de pastilhas (acessório da prensa de laboratório), preencher todo o espaço;
5. Colocar o molde na prensa e a acione, colocando uma pressão de 1,2 toeladas durante 45 segundos. A pastilha formada será translúcida e com um diâmetro de 7 mm;
6. Verificar as condições físicas da pastilha (Uniforme, não quebradiça, translúcida);
7. Levar para a medição no equipamento.

9.3.3 Uso do aparelho Nicolet 6700 (FTIR).

1. Para iniciar ligue o computador e abra o programa Nicolet 6700.
2. Abrir um arquivo novo e salvar.

3. Modificar as configurações do processo, caso seja necessário. Ex. maior resolução ou faixa na qual realizar as medidas.

4. Coloque uma pastilha de KBr (branco) no suporte para pastilhas do dispositivo (modo transmission E.P.S).

5. Realizar uma medida do branco. É recomendado fazer medidas de branco antes de cada nova medida.

6. Verificar que o espectro do branco seja coerente com a literatura.

7. Realizar a análise da sua amostra.

8. Salvar o espectro.

9.4

Tensão superficial

9.4.1

Etapas preliminares

1. Calibrar a balança

a) Apertar o botão “calibration” e então “balance Calibration”, colocar o valor do peso (50 g).

b) Colocar o peso no suporte.

c) Clique no botão ‘Start’.

d) Quando aparecer ‘Load Standard Weight’, adicionar o peso de calibração (50 gramas) e clique no botão ‘yes’ depois do tempo de estabilização por alguns segundos.

e) Quando a calibração terminar, aparecerá ‘calibration completed’

2. Limpeza para Anel Du Noüy

a) Colocar levemente o anel sobre a chama azul do bico de Bunsen.

9.4.2

Tensão superficial (Método Anel Du Noüy) - Procedimento

Parte 1: Antes de começar a executar

1. O objetivo do teste é executar um experimento simples de tensão superficial com o anel Du nöuy. Não tocar na superfície do anel.

2. Limpar o anel Du nöuy.

Parte 2: Execução de aquisição de dados.

1) Escolher o ‘method’ na barra de menu principal.

2) Escolher 'Dynamic contact angle' na barra do menu principal, colocar os parâmetros de acordo com o teste a ser realizado.

É normal colocar o anel na maior parte do líquido para garantir que esteja totalmente umedecido e a velocidade na qual isso é feito é ajustada automaticamente na aproximação do anel no valor (recomenda-se a profundidade de imersão: 5 a 10 mm).

3) Colocar a solução no recipiente de amostra.

7) Fixar o anel Du Nöuy, tomando cuidado para não manusear a parte a ser imersa.

8) Certificar-se de que o fundo do sólido está paralelo em relação ao líquido.

9) Selecionar 'Tare' na barra 'Zero Adjust' na barra de menu principal.

10) No início de qualquer medição, a balança é tarada a 0 mg e, à medida que o sólido atinge a superfície do líquido, haverá uma mudança significativa no peso.

11) Clique no botão 'Start Measurement' da barra do menu principal.

12) O sistema realiza a análise automática e exibe os resultados a seguir

13) Salvar os dados selecionando 'Save'.

9.5

FTIR

Tabela – Análise granulométrica do minério de ferro

Abertura da peneira (µm)	Massa retida (g)	Massa retida (%)	Massa acumulada (%)	Massa passante (%)
+212	0	0,00		100
- 212 +150	1,47	0,74	0,74	99,27
-150 + 106	13,4	6,70	7,44	92,57
-106 + 75	39,57	19,79	27,22	72,78
-75 + 53	24,61	12,31	39,53	60,48
- 53 +38	65,47	32,74	72,26	27,74
- 38 +20	24,88	12,44	84,70	15,30
-20	30,6	15,30	100,00	0,00
total	200	100,00	0,00	

9,6

Tabelas dos testes de flotação

Teste de flotação realizado na célula Partridge-Smith, com concentração de biocoleto de 4000 g/t, variando o pH (2, 3, 4, 5, 7, 9,11).

pH	Massa Flotada (g)		R, Mássica (%)		Fe(%)		R, metalúrgica Fe(%)	
	Testes	Duplic,	Média	Erro (%)	Média	Erro(%)	Média	Erro (%)
2	0,65	0,71	13,60	0,60	34,85	1,34	34,28	2,83
3	0,52	0,54	10,60	0,20	37,08	2,01	28,41	2,08
4	0,16	0,18	3,40	0,20	39,24	2,01	9,61	0,08
5	0,07	0,06	1,30	0,10	44,21	2,33	4,13	0,10
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Teste 1 – pH 2

Ensaio 1	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO ₂	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)
Concentrado	0,65	13,49	31,45	8,44	52,10	47,90	33,51
Rejeito	4,17	86,51	48,43	92,03	88,50	11,50	8,04
Total	4,82						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 1- Duplicata

Ensaio 1	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO ₂	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)
Concentrado	0,71	14,73	37,10	8,55	48,27	51,73	36,19
Rejeito	4,16	86,31	48,31	91,81	88,50	11,50	8,04
Total	4,82						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 2 - pH 3

Ensaio 2	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO ₂	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)
Concentrado	0,52	10,79	26,34	6,47	49,86	50,14	35,07
Rejeito	4,23	87,76	43,66	94,71	89,78	10,22	7,15
Total	4,75						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 2 – Duplicata

Ensaio 2	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,54	11,20	30,48	5,94	44,11	55,89	39,09
Rejeito	4,29	89,00	35,98	98,10	91,70	8,30	5,81
Total	4,83						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 3 - pH 4

Ensaio 3	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,16	3,32	9,53	1,64	41,04	58,96	41,24
Rejeito	4,46	92,53	53,23	98,08	88,18	11,82	8,27
Total	4,62						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 3 – Duplicata

Ensaio 3	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,18	3,73	9,68	2,10	46,77	53,23	37,23
Rejeito	4,67	96,89	63,27	100,84	86,59	13,41	9,38
Total	4,85						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 4 - pH 5

Ensaio 4	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,07	1,45	4,23	0,70	40,12	59,88	41,88
Rejeito	4,73	98,13	61,03	102,89	87,23	12,77	8,94
Total	4,8						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 4 – Duplicata

Ensaio 4	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,06	1,24	4,03	0,50	33,47	66,53	46,54
Rejeito	4,77	98,96	66,16	102,62	86,27	13,73	9,61
Total	4,83						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste de flotação realizado na célula Partridge-Smith, variando concentração de biossurfactante em pH 3.

Biocoletor (g/t)	Massa Flotada (g)		R, Mássica (%)		Fe(%)		R, metalúrgica Fe(%)	
	Testes	Duplic,	Média	Erro (%)	Média	Erro (%)	Média	Erro (%)
1000	0,22	0,24	4,60	0,20	43,74	1,86	14,50	0,01
2000	0,41	0,28	6,90	1,30	38,87	2,46	19,60	4,88
4000	0,52	0,54	10,60	0,20	37,08	2,01	28,41	2,08
6000	0,63	0,75	13,80	1,20	36,97	0,34	36,80	2,87
8000	0,54	0,55	10,90	0,10	38,87	1,34	30,61	1,34

Teste 5 - Concentração de biossurfactante (1000 g/t)

Ensaio 5	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,22	4,40	14,52	1,90	34,68	65,32	45,69
Rejeito	4,58	91,60	83,94	93,49	81,86	18,14	12,69
Total	4,8						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 5 – Duplicata

Ensaio 5	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,24	4,80	14,52	2,40	40,12	59,88	41,88
Rejeito	4,62	92,40	61,10	100,13	86,91	13,09	9,16
Total	4,86						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 6 - Concentração de biossurfactante (2000 g/t)

Ensaio 6	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,41	8,20	21,56	4,90	47,95	52,05	36,41
Rejeito	4,41	88,20	48,37	98,03	89,14	10,86	7,59
Total	4,82						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 6 – Duplicata

Ensaio 6	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,28	5,60	16,71	2,86	40,92	59,08	41,33
Rejeito	4,51	90,20	72,74	94,51	84,03	15,97	11,17
Total	4,79						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 7 - Concentração de biossurfactante (4000 g/t)

Ensaio 7	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,52	10,40	26,34	6,47	49,86	50,14	35,07
Rejeito	4,23	84,60	43,66	94,71	89,78	10,22	7,15
Total	4,75						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 7 - Duplicata

Ensaio 7	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,54	10,80	30,48	5,94	44,11	55,89	39,09
Rejeito	4,29	85,80	35,98	98,10	91,70	8,30	5,81
Total	4,83						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 8 - Concentração de biossurfactante (6000 g/t)

Ensaio 8	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,63	12,60	33,94	7,33	46,67	53,33	37,30
Rejeito	4,11	82,20	49,05	90,38	88,18	11,82	8,27
Total	4,74						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 8 – Duplicata

Ensaio 8	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,75	15,00	39,68	8,91	47,63	52,37	36,63
Rejeito	4,01	80,20	32,34	92,02	92,02	7,98	5,58
Total	4,76						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 9 - Concentração de biossurfactante (8000 g/t)

Ensaio 9	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,54	10,80	29,26	6,24	46,35	53,65	37,53
Rejeito	4,25	85,00	47,98	94,14	88,82	11,18	7,82
Total	4,79						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 9 – duplicata

Ensaio 9	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,55	11,00	31,94	5,83	42,52	57,48	40,21
Rejeito	4,21	84,20	47,53	93,25	88,82	11,18	7,82
Total	4,76						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste de flotação realizado na célula Partridge-Smith, variando concentração de silicato de sódio, com concentração fixa de 4000 g/t de biocoletor em pH 3.

Depressor (g/t)	Massa Flotada (g)		R, Mássica (%)		Fe(%)		R, metalúrgica Fe(%)	
	Testes	Duplic,	Média	Erro (%)	Média	Erro(%)	Média	Erro (%)
100	0,51	0,38	8,90	1,30	37,42	0,56	24,00	3,16
300	0,22	0,32	5,40	1,00	39,21	4,36	14,97	1,13
600	0,18	0,33	5,10	1,50	40,53	0,54	14,87	4,20
900	0,23	0,19	4,20	0,40	44,29	0,23	13,44	1,35
1200	0,08	0,09	1,70	0,10	42,09	5,39	5,21	0,97

Teste 10 - concentração de silicato de sódio (100 g/t)

Ensaio 10	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,51	10,20	27,15	6,02	47,31	52,69	36,86
Rejeito	4,31	86,20	55,61	93,75	87,23	12,77	8,94
Total	4,82						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 10 – Duplicata

Ensaio 10	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,38	7,60	20,84	4,33	45,71	54,29	37,97
Rejeito	4,41	88,20	61,31	94,84	86,24	13,76	9,63
Total	4,79						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 11 - concentração de silicato de sódio (300 g/t)

Ensaio 11	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,22	4,40	13,84	2,07	37,73	62,27	43,56
Rejeito	4,6	92,00	40,06	104,82	91,38	8,62	6,03
Total	4,82						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 11 – Duplicata

Ensaio 11	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,32	6,40	16,10	4,00	50,18	49,82	34,85
Rejeito	4,51	90,20	68,38	95,59	84,99	15,01	10,50
Total	4,83						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 12 - concentração de silicato de sódio (600 g/t)

Ensaio 12	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,18	3,60	10,67	1,85	41,30	58,70	41,06
Rejeito	4,66	93,20	75,16	97,65	84,03	15,97	11,17
Total	4,84						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 12 - Duplicata

Ensaio 12	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,33	6,60	19,05	3,53	42,84	57,16	39,99
Rejeito	4,47	89,40	53,35	98,30	88,18	11,82	8,27
Total	4,8						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 13 - concentração de silicato de sódio (900 g/t)

Ensaio 13	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,23	4,60	14,79	2,08	36,35	63,65	44,52
Rejeito	4,58	91,60	47,28	102,54	89,78	10,22	7,15
Total	4,81						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 13 – Duplicata

Ensaio 13	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,19	3,80	12,09	1,75	37,02	62,98	44,06
Rejeito	4,71	94,20	66,85	100,95	85,95	14,05	9,83
Total	4,9						
Alimentação	5			100,00	80,20	19,80	13,85

Teste 14 - concentração de silicato de sódio (1200 g/t)

Ensaio 14	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,08	1,60	4,24	0,95	47,54	52,46	36,70
Rejeito	4,8	96,00	65,03	103,65	86,59	13,41	9,38
Total	4,88						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste 14 – Duplicata

Ensaio 14	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Concentrado	0,09	1,80	6,17	0,72	32,14	67,86	47,47
Rejeito	4,71	94,20	75,97	98,70	84,03	15,97	11,17
Total	4,8						
Alimentação	5				80,20	19,80	13,85

Teste de flotação realizado na célula mecânica - Denver, variando concentração de biossurfactante em pH 3.

Biocoletor (g/t)	Massa Flotada (g)		R, Mássica (%)		Fe(%)		R, metalúrgica Fe(%)	
	Testes	Duplic,	Média	Erro (%)	Média	Erro(%)	Média	Erro (%)
1000	8,81	8,07	6,36	0,28	45,12	0,00	20,73	0,91
2000	11,81	11,92	8,95	0,05	44,12	0,56	28,50	0,50
4000	11,19	9,90	7,95	0,49	44,68	2,24	25,57	0,29
6000	11,84	11,40	8,76	0,17	33,51	1,12	21,18	0,31
8000	11,50	12,83	9,17	0,50	32,17	0,23	21,31	1,32

Teste 15 - concentração de biossurfactante (1000 g/t)

Ensaio 15	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	8,81	6,64	21,64	2,94	35,49	64,51	45,12
Rej.Rougher	123,15	92,83	59,89	100,96	87,23	12,77	8,94
Total	131,96						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 15 – Duplicata

Ensaio 15	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	8,07	6,08	19,82	2,69	35,49	64,51	45,12
Rej.Rougher	123,78	93,31	63,21	100,74	86,59	13,41	9,38
Total	131,85						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 16 – Concentração de biossurfactante (2000 g/t)

Ensaio 16	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	11,81	8,90	28,00	4,19	37,73	62,27	43,56
Rej.Rougher	120,22	90,62	36,54	103,97	92,02	7,98	5,58
Total	132,03						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 16 – Duplicata

Ensaio 16	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	11,92	8,99	28,99	4,05	36,13	63,87	44,68
Rej.Rougher	119,95	90,42	29,17	105,54	93,61	6,39	4,47
Total	131,87						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 17 – Concentração de biossurfactante (4000 g/t)

Ensaio 17	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	11,19	8,44	25,85	4,14	39,32	60,68	42,44
Rej.Rougher	120,65	90,95	39,61	103,62	91,38	8,62	6,03
Total	131,84						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 17 - Duplicata

Ensaio 17	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	9,9	7,46	25,28	3,06	32,94	67,06	46,91
Rej.Rougher	122,09	92,03	34,14	106,32	92,65	7,35	5,14
Total	131,99						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 18 – Concentração de biossurfactante (6000 g/t)

Ensaio 18	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	11,84	8,93	20,87	5,98	53,69	46,31	32,39
Rej.Rougher	117,31	88,43	67,03	93,71	84,99	15,01	10,50
Total	129,15						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 18 – Duplicata

Ensaio 18	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	11,4	8,59	21,48	5,41	50,50	49,50	34,62
Rej.Rougher	121	91,21	67,67	97,02	85,31	14,69	10,28
Total	132,4						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 19 -- Concentração de biossurfactante (8000 g/t)

Ensaio 19	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	11,5	8,67	19,99	5,87	54,33	45,67	31,94
Rej.Rougher	119,5	90,08	65,38	96,18	85,63	14,37	10,05
Total	131						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 19 – Duplicata

Ensaio 19	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	12,83	9,67	22,62	6,47	53,69	46,31	32,39
Rej.Rougher	118,17	89,08	61,78	95,82	86,27	13,73	9,61
Total	131						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste de flotação realizado na célula mecânica - Denver, variando concentração de silicato de sódio, com concentração fixa de 4000 g/t de biocoletor em pH 3,

Depressor (g/t)	Massa Flotada (g)		R, Mássica (%)		Fe(%)		R, metalúrgica Fe(%)	
	Testes	Duplic,	Média	Erro (%)	Média	Erro(%)	Média	Erro (%)
100	29,69	28,88	22,08	0,31	34,51	1,23	55,03	2,72
300	31,33	39,83	26,82	3,20	30,38	1,34	58,52	4,43
600	20,36	21,67	15,84	0,49	50,49	0,90	57,72	0,78
900	34,02	30,54	24,33	1,31	37,98	3,36	66,40	2,30
1200	29,27	28,63	21,82	0,24	41,66	2,57	65,69	4,78

Teste 20 – concentração de silicato de sódio (100 g/t)

Ensaio 20	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	29,69	22,38	57,76	13,65	48,90	51,10	35,74
Rej.Rougher	102,31	77,12	18,66	91,56	95,21	4,79	3,35
Total	132						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 20 – Duplicata

Ensaio 20	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	28,88	21,77	52,32	14,23	52,42	47,58	33,28
Rej.Rougher	102,75	77,45	18,74	91,95	95,21	4,79	3,35
Total	131,63						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 21 – Concentração de silicato de sódio (300 g/t)

Ensaio 21	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	31,33	23,62	54,09	16,09	54,65	45,35	31,72
Rej.Rougher	100,91	76,07	18,40	90,30	95,21	4,79	3,35
Total	132,24						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 21 - Duplicata

Ensaio 21	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	39,83	30,02	62,95	21,89	58,48	41,52	29,04
Rej.Rougher	91,94	69,30	17,89	82,00	94,89	5,11	3,57
Total	131,77						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 22 – Concentração de silicato de sódio (600 g/t)

Ensaio 22	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	20,36	15,35	56,93	5,08	26,55	73,45	51,38
Rej.Rougher	111,7	84,20	16,30	100,96	96,17	3,83	2,68
Total	132,06						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 22 - Duplicata

Ensaio 22	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	21,67	16,33	58,49	5,93	29,10	70,90	49,59
Rej.Rougher	110,25	83,11	20,11	98,66	95,21	4,79	3,35
Total	131,92	99,94	78,60	104,59			
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 23 – Concentração de silicato de sódio (900 g/t)

Ensaio 23	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	34,02	25,64	64,11	16,15	50,50	49,50	34,62
Rej.Rougher	98,47	74,23	16,76	88,41	95,53	4,47	3,13
Total	132,49						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 23 – Duplicata

Ensaio 23	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc,Rougher	30,54	23,02	68,69	11,75	40,92	59,08	41,33
Rej.Rougher	101,82	76,75	19,81	90,81	94,89	5,11	3,57
Total	132,36						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 24 – Concentração de silicato de sódio (1200 g/t)

Ensaio 24	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	29,27	22,06	70,46	10,12	36,77	63,23	44,23
Rej.Rougher	102,64	77,37	18,72	91,85	95,21	4,79	3,35
Total	131,91						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 24 – Duplicata

Ensaio 24	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalúrgica		Volumetria		
			(%) Fe	(%)SiO2	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	Fe (%)
Conc.Rougher	28,63	21,58	60,92	11,87	44,11	55,89	39,09
Rej.Rougher	103,24	77,82	12,55	93,94	96,81	3,19	2,23
Total	131,87						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Circuito de flotação

As tabelas abaixo mostram os resultados obtidos só com o uso de biosurfactante no circuito de flotação,

Teste 1

Rougher – Concentração de biosurfactante (4000 g/t)

Scavenger - Concentração de biosurfactante (2000 g/t)

Cleaner - Concentração de biosurfactante (4000 g/t)

Ensaio 1	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalurgica (%) Fe	Rec, Metalúrgica (%) SiO ₂	Volumetria		
					SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)
Con. Scav.	7,64	5,76	18,11	2,71	37,73	62,27	43,56
Rej. Scav.	104,86	79,04	26,77	91,95	93,29	6,71	4,69
Con. Cleaner	12,51	9,43	44,11	0,87	7,39	92,61	64,78
Rej. Cleaner	6,29	4,74	7,80	3,99	67,43	32,57	22,78
Total	131,3						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 2

Rougher - Concentração de biossurfactante (2000 g/t)

Scavenger - Concentração de biossurfactante (1000 g/t)

Cleaner - Concentração de biossurfactante (3000 g/t)

Ensaio 1	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalurgica (%) Fe	Rec, Metalúrgica (%) SiO ₂	Volumetria		
					SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)
Conc. Scav.	6,68	5,04	18,27	1,77	28,15	71,85	50,26
Rej. Scav.	112,6	84,88	43,81	95,02	89,78	10,22	7,15
Conc. Cleaner	6,78	5,11	25,06	0,19	2,92	97,08	67,91
Rej. cleaner	5,23	3,94	8,58	2,80	56,89	43,11	30,16
Total	131,29						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

As tabelas abaixo mostram os resultados obtidos com o uso de biossurfactante e silicato de sódio no circuito de flotação,

Teste 3

Rougher - Concentração de biossurfactante (4000 g/t) e concentração de silicato de sódio (600 g/t)

Scavenger - Concentração de biossurfactante (2000 g/t) e concentração de silicato de sódio (900 g/t)

Cleaner - Concentração de biossurfactante (4000 g/t) e concentração de silicato de sódio (300 g/t)

Circuito de flotação	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalurgica (%) Fe	Rec, Metalúrgica (%) SiO ₂	Volumetria		
					SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)
Con. Scav.	7,18	5,41	15,01	3,04	45,07	54,93	38,42
Rej. Scav.	111,72	84,22	31,24	97,29	92,65	7,35	5,14
Con. Cleaner	6,59	4,97	20,59	1,11	17,93	82,07	57,41
Rej. Cleaner	5,12	3,86	5,73	3,40	70,62	29,38	20,55
Total	130,61						
Alimentação	132,66				80,20	19,80	13,85

Teste 4

Rougher - Concentração de biossurfactante (2000 g/t) e concentração de silicato de sódio (600 g/t)

Scavenger - Concentração de biossurfactante (1000 g/t) e concentração de silicato de sódio (900 g/t)

Cleaner - Concentração de biossurfactante (3000 g/t) e concentração de silicato de sódio (300 g/t)

Circuito de flotação	Massa (g)	Rec, Mássica (%)	Rec, Metalurgica (%) Fe	Rec, Metalúrgica (%) SiO ₂	Volumetria		
					SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)
Conc. Scav.	4,13	3,11	8,13	1,87	48,27	51,73	36,19
Rej. Scav.	121,3	91,44	47,19	102,36	89,78	10,22	7,15
Conc. Cleaner	1,96	1,48	6,22	0,31	16,65	83,35	58,30
Rej. cleaner	3,99	3,01	4,85	2,55	68,06	31,94	22,34
Total	131,38						
Alimentação	132,66		-	-	80,20	19,80	13,85