

ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA BIOFLOTAÇÃO DE MINERAIS

Antonio Gutiérrez Merma¹, José Jonathan Vallejos Morán², Jean da Silva Abbud³, Maurício Leonardo Torem⁴

^{1,2,3,4}Departamento de Engenharia de materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marques de São Vicente 125, Gávea, 224512240. email: anguz21@aluno.puc-rio.br

RESUMO

A bioflotação mineral não é nada mais do que a concentração de um mineral valioso a partir de um determinado minério, devidamente cominuído, usando o processo de flotação na presença de biorreagentes (biocoletores, biodepressores). A adesão do biorreagente à superfície do mineral é um pré-requisito para alterar a química superficial do mineral. A presença de grupos funcionais polares e não-polares na parede celular dos biorreagentes ou nos seus produtos metabólicos faz com que esses apresentem características similares às das moléculas surfactantes. As propriedades superficiais do mineral após a adesão do biorreagente dependem das propriedades superficiais do biorreagente, dos grupos funcionais presentes e da sua hidrofobicidade. Dessa forma, biorreagentes com caráter hidrofóbico podem tornar partículas hidrofílicas em hidrofóbicas se aderidas à superfície do mineral e, assim, serem uma nova fonte de reagentes podendo substituir alguns reagentes químicos tóxicos usados no processamento de minerais. Diversos tipos de bactérias têm sido estudados com sucesso como biorreagentes no bio-beneficiamento de diversos minerais como sulfetos, óxidos e carvão. O presente trabalho visa identificar os aspectos fundamentais da bioflotação de minerais através de uma breve revisão bibliográfica dos trabalhos encontrados até o momento.

PALAVRAS-CHAVE: Minerais, bioflotação, flotação, biotecnologia mineral

1. INTRODUÇÃO

A Biotecnologia Mineral é uma área do conhecimento de caráter multidisciplinar; representa o conjunto de métodos aplicáveis às atividades de beneficiamento mineral e hidrometalurgia associados à complexidade dos organismos de natureza vegetal, animal e seus derivados conciliados às constantes inovações tecnológicas. A Biotecnologia transforma a vida cotidiana e seu impacto atinge vários setores produtivos, notadamente os da indústria mineral e extrativa. Recentes desenvolvimentos na área além de oferecer uma atrativa alternativa para processar minérios, oferecem métodos alternativos para enfrentar os problemas ambientais resultantes do processamento de minerais. (Rao e Subramanian, 2007).

Nos anos recentes, a indústria mineral vem lidando com diversos desafios como a crescente demanda mundial por matéria prima mineral o que incentiva:

- ✓ Exploração de jazidas de baixo teor e/ou complexas associações mineralógicas.
- ✓ Tratamento de rejeitos oriundos das próprias atividades de mineração.
- ✓ Redução de custos de capital.

Sendo considerada, também, a preservação do meio ambiente, torna-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias complementares às técnicas convencionais empregadas na concentração mineral, além da continua busca de novos reagentes capazes de apresentar melhor desempenho no processo.

Nesse contexto, surge o biobeneficiamento o qual se refere à concentração seletiva de constituintes minerais desejados de um minério através da interação com micro-organismos. O biobeneficiamento inclui dois processos a bioflotação e a biofloculação; o primeiro, assim como a flotação, explora as diferenças nas características superficiais dos sólidos suspensos em meio aquoso controlando sua energia superficial e tensão interfacial (Leja, 1982 apud Pecina *et al.*, 2009) por meio de micro-organismos com propriedades hidrofóbicas, os quais cumprem as funções dos agentes convencionais da flotação mineral (Natarajan, 2006, Pecina *et al.*, 2009). A bioflotação torna-se bastante atrativa por apresentar grande potencial tecnológico e ambiental, flexibilidade na seleção de cepas e potencial seletividade (Rao e Subramanian, 2007). Tais fatos têm conduzido ao desenvolvimento de pesquisas fundamentais na área visando: a interação micro-organismos-mineral, flotabilidade do mineral após interação, avaliando o desempenho dos biorreagentes usados e, assim, determinar o uso total ou parcial desses biorreagentes na flotação de minérios (Natarajan, 2006, Pecina *et al.*, 2009).

No processo de bioflotação, uma das etapas mais importantes é a adesão da célula bacteriana à superfície do mineral; o ideal seria uma adesão seletiva dessa bactéria sobre o mineral desejado, alterando suas propriedades superficiais e promovendo, assim, a separação do mineral (Chun-Yun *et al.*, 2008). Microorganismos e/ou seus produtos metabólicos podem modificar a superfície mineral, tanto direta como indiretamente. O mecanismo direto envolve a adesão direta das células microbianas às partículas minerais, enquanto o mecanismo indireto refere-se aos produtos do metabolismo ou frações solúveis da célula que agem como reagentes ativos na superfície. Ambas as interações levam a alterações na superfície mineral, tornando-a hidrofílica ou hidrofóbica devido à presença de grupos apolares e polares na parede celular ou nos produtos metabólicos e, assim, serem aplicados na flotação e floculação de minerais. (Rao e Subramanian, 2007, Vilinska e Rao, 2008). Segundo Vilinska e Rao (2008) são três os mecanismos fundamentais através dos quais a modificação do caráter hidrofóbico da superfície pode ocorrer: adesão das células microbianas ao substrato sólido, reações de oxidação de espécies químicas contidas na parede celular nos sítios ativos da interface mineral e adsorção e/ou reações químicas com os produtos metabólicos na superfície mineral

O presente trabalho visa identificar os aspectos fundamentais da bioflotação de minerais através de uma breve revisão bibliográfica dos trabalhos encontrados até o momento.

2. BIOFLOTAÇÃO MINERAL: ASPECTOS RELEVANTES

A bioflotação é uma técnica de separação que vem sendo estudada no processamento mineral e no tratamento de efluentes; é baseada nos mesmos princípios e fundamentos da flotação convencional. A recente literatura apresenta vários estudos fundamentais de biobeneficiamento mineral com bactérias como reagentes químicos. A Tabela 1 apresenta alguns dos sistemas mineral-biorreagente pesquisados. Verifica-se que as pesquisas envolvem minerais que apresentam relevância no cenário mineral brasileiro.

Tabela I. Bactérias usadas em biobeneficiamento mineral.

Biorreagente	Sistema	Função	Autor
<i>M. phlei</i>	Hematita	Coletor	Dubel <i>et al.</i> , 1992
	Apatita - Dolomita	Coletor	Zheng <i>et al.</i> , 1997,1998, 2001
	Finos de Carvão	Coletor & Flocculante	Raichur <i>et al.</i> , 1996
	Finos de hematita	Coletor & Flocculante	Yang <i>et al.</i> , 2007
<i>B. lichenformis</i> ,	Apatita - Dolomita	Depressor de Apatita	Smith and Miettinen, 2006
<i>B. subtilis</i>	Finos de carvão	Flocculante	Vijayalakshmi & Raichur, 2003
<i>B. Carnosus</i>	Apatita-calcita-Q	Coletor de apatita	Smith and Miettinen, 2006
<i>B. Firmus</i>	Apatita-calcita-Q	Coletor de apatita	Smith and Miettinen, 2006
<i>T. Ferrooxidans</i>	Pirita- Calcopirita	Depressor de pirita	Hosseini <i>et al.</i> , 2005
<i>T. Thiooxidans</i>	Galena-Esfalerita	Coletor de esfalerita	Santhiya <i>et al.</i> , 2001
<i>L. Ferrooxidans</i>	Pirita-chalcopirita	Depressor de calcopirita	Vilinska & Rao, 2008
<i>E. coli</i>	Quartzo	Coletor	Faharat <i>et al.</i> , 2008
<i>R. opacus</i>	Calcita-Magnesita	Coletor	Botero <i>et al.</i> , 2007, 2008
	Hematita-Quartzo	Coletor	Mesquita <i>et al.</i> , 2003
<i>P. polymyxa</i>	Hematita, corundum, calcita, quartzo.	Ativador de quartzo	Namita e Natarajan, 1997, 2001
	Pirita-esfalerita	Depressor de pirita	Patra e Natarajan, 2004
Proteínas & Polissacarídeos – <i>P. polymyxa</i>	Quartzo, esfalerita, pirita, chalcopirita, galena.	Depressor de P & C Coletor de G, Q, E,	Patra e Natarajan, 2008
	Calcopirita, galena	Ativador de galena	Patra e Natarajan, 2008
	Galena-esfalerita	Depressor de galena	Sumbramanian <i>et al.</i> , 2003

Caracterização dos Micro-organismos

O emprego de micro-organismos e/ou seus derivados como reagentes na bioflotação depende da presença de diversos grupos funcionais como fosfatos, aminas, amidos, carboxilas os quais fornecem ao micro-organismo características similares aos reagentes usados na flotação convencional de minerais. (Dubel *et al.*, 1992, Zheng *et al.*, 2001, Hosseini *et al.*, 2005, Mesquita *et al.*, 2003, Deo e Natarajan, 1997). Sendo assim, é indispensável saber a composição desses micro-organismos e confirmar a presença desses grupos. Geralmente, a parede celular de uma bactéria é composta, principalmente, de polímeros como peptidoglicano, além de substâncias poliméricas extracelulares (EPS), fosfoglicerídeos, fosfolipídeos, proteínas e ácidos orgânicos como ácido micólico. Dentre esses compostos encontramos os diversos grupos funcionais já mencionados, entre outros. Assim, a composição da parede celular determina a capacidade de adesão das bactérias sobre diferentes tipos de superfícies, além de dar origem à carga na superfície microbiana. As bactérias tem uma carga negativa na superfície da sua parede celular num pH fisiológico, fato comprovado pelos valores ácidos de pH dos pontos isoelétricos (PIE) encontrados na literatura, o que é devido, principalmente, à presença de peptidoglicano, rico em grupos aminas e carboxilas. Outros componentes que contribuem para a carga negativa são os ácidos tectoicos ricos em fosfatos. Portanto, as células adquirem carga através da

ionização dos grupos na superfície tais como amino, carboxila e fosfato, os quais são dependentes do pH. (Rao e Subramanian, 2007, Natarajan, 2006).

A hidrofobicidade das bactérias pode ser considerada como o fator mais importante na aplicação desses micro-organismos no beneficiamento mineral. Dependendo do gênero e da espécie podem apresentar caráter hidrofóbico ou hidrofílico, ou seja, tem caráter anfipático. Além disso, diversos autores (Mesquita *et al.*, 2003, Botero *et al.*, 2007) atribuem o grau de hidrofobicidade à proporção dos grupos graxos em relação aos grupos funcionais hidrofílicos presentes na superfície celular, e ao caráter ácido/básico da superfície celular. Já Deo e Natarajan (1997) afirmam que a presença de polissacarídeos na superfície celular oferece um caráter hidrofílico às bactérias e aos minerais com que interagem, enquanto que os compostos protéicos fornecem um caráter hidrofóbico.

Uso De Bactérias e Produtos Metabólicos Como Reagentes de Flotação.

As condições que um micro-organismo precisa para ser usado como reagente de flotação mineral são: apresentar superfície hidrofóbica ou hidrofílica e ser capaz de aderir à superfície do mineral, podendo tornar a superfície mineral hidrofóbica ou hidrofílica e, assim, promover a flotação ou depressão daquele mineral. Ou seja, se o micro-organismo apresentar caráter hidrofóbico poderá atuar como depressor, no caso de apresentar caráter hidrofílico fará o papel de depressor do mineral (Mesquita *et al.*, 2003). Esse fato pode ser comprovado nas medidas de ângulo de contato do mineral antes e após interação com o biorreagente.

Na literatura, podemos encontrar vários trabalhos focados nesse comportamento coletor ou depressor e, segundo Zheng e Smith (2001), a depressão de um mineral após interação com a bactéria pode resultar da:

- ✓ Oxidação da superfície, causada pela bactéria ou por modificação complementar da superfície tornando o mineral menos fluatável.
- ✓ Adesão ao mineral impedindo, de forma parcial ou total, uma subsequente adesão do coletor.

As bactérias podem apresentar um comportamento seletivo, o quer dizer que elas podem aderir especificamente na superfície de um determinado mineral, modificando, assim, suas características superficiais e causando um maior efeito coletor ou depressor desse mineral em comparação com outro. Tal comportamento dependerá do sistema mineral em estudo sendo possível ter uma dupla função, promovendo a flotação sob certas condições enquanto incrementando a depressão sob outras condições (Natarajan, 2006).

Segundo Mesquita *et al.*, (2003) a bactéria *M. phlei* é um exemplo de atuação depressora e coletora, dependendo do sistema mineral em estudo. Esse micro-organismo, além de negativamente carregado, possui uma superfície altamente hidrofóbica, com ângulo de contato próximo de 70°. Essas propriedades surgem, em grande parte, devido à presença de ácidos graxos em sua superfície. Os principais componentes da parede celular de *M. phlei* são glicolipídeos, fosfolipídios e lipídeos livres (Misha *et al.*, 1993 *apud* Mesquita *et al.*, 2003). Espectros de infravermelho mostraram a presença de grupos funcionais na superfície, os quais contem R-COOH, R-NH₂, R-OH, R-(CH₂)_n-CH₃, R-CONH-R, (RO)₂HO-P=O e R-C-O-C-R, ou seja, principalmente grupos polares e apolares estão presentes. A presença dos grupos polares atribui um caráter negativo à superfície, enquanto os grupos apolares tornam hidrofóbica a superfície mineral (Misha *et al.*, 1993 *apud* Mesquita *et al.*, 2003). Outro trabalho usando essa bactéria é o do Yang *et al.*, (2007), que flotaram finos de hematita. O foco desse trabalho foi a adsorbabilidade da bactéria no mineral através de espectros de infravermelho, cujos resultados mostraram a presença de grupos -(CH₂)_n, -(CH₂-CH₃), carboxila, carbonila, hidrocarbonetos aromáticos e carboxila sob a superfície da hematita. Os autores afirmam que dentre esses grupos os cinco primeiros contribuíram para a adsorção física e somente o grupo carboxila permite adsorção química na superfície da hematita.

Por outro lado, os autores Zheng *et al.*, (2001), estudaram a adesão das bactérias *B. subtilis* e *M. phlei* na dolomita e apatita através de medidas de sorção e MEV. Eles encontraram que ambas as espécies adsorvem, preferencialmente, na dolomita em valores ácidos e neutros de pH. Os resultados de flotação mostraram que quando usado oleato de sódio junto com a bactéria, as células bacterianas agem como depressores. Assim, em presença de ambos minerais a depressão da dolomita seria causada devido à interação das células bacterianas. O fenômeno parece ser devido a presença de ácido téctico na superfície do micro-organismo o qual adsorve preferencialmente Mg(II). Do mesmo modo a bactéria *B. subtilis* resultou ser um melhor depressor que a *M. phlei*. (Zheng *et al.*, 1997, 1998, 2001).

Outra cepa bacteriana bastante usada no bioprocessamento mineral, tanto de oxi-minerais como sulfetos, é a bactéria *P. polymyxa*, bactéria associada com depósitos de minérios de bauxita e ferro. A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura usando essa bactéria é do grupo do N.K. Natarajan, um dos primeiros usos foi na biolixiviação de minérios de bauxita de baixo teor para remoção de cálcio, ferro e outras impurezas, minério usado como matéria-prima na manufatura de abrasivos, refratários e cerâmicos (Natarajan *et al.*, 1997 *apud* Natarajan, 2006). Num outro trabalho de Deo e Natarajan (1997), esses objetivaram a interação dessa bactéria com diversos minerais tais como hematita, corundum, calcita e quartzo. Os autores indicaram que a bactéria pode alterar, de forma significativa, a química superficial desses minerais. Nos resultados desse trabalho observou-se um incremento na flotabilidade do quartzo, enquanto as flotabilidades do corundum, calcita e hematita foram deterioradas devido às interações. Além disso, observou-se uma variação nos valores do ângulo de contato, que para o quartzo aumentou de 50° para 76°; enquanto que para hematita, corundum e calcita o ângulo diminuiu de um valor inicial de 40°. Dessa forma, ficou claro que interações das células da bactéria tornaram o quartzo mais hidrofóbico podendo ser flotado enquanto que a hematita, corundum e calcita tornaram-se mais hidrofílicos sendo deprimidos. Os autores também indicaram que a adição de pequenas quantidades de um coletor tal como uma amina catiônica pode incrementar, mais ainda, a separação por flotação.

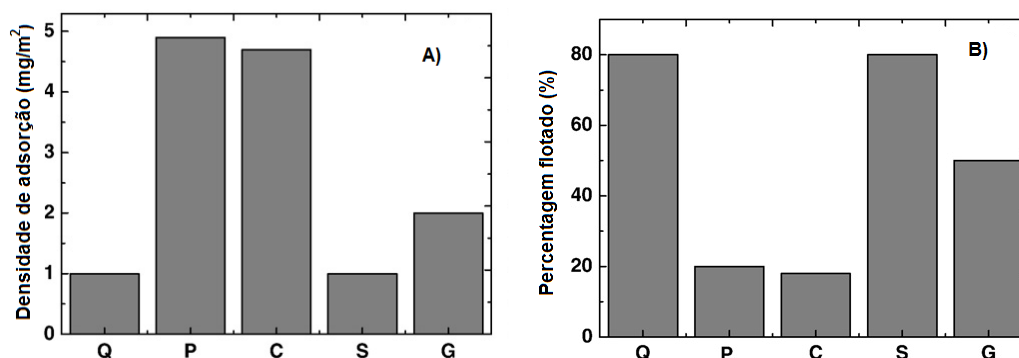
Num outro trabalho publicado por Natarajan, (2006), o qual é uma revisão de muitos outros trabalhos aplicados ao bioprocessamento de minerais, o autor afirma que a bactéria *P. polymyxa*, assim como seus produtos metabólicos, principalmente exopolissacarídeos e proteínas, interagem, efetivamente, com óxidos minerais e modificam, de forma significativa, a sua superfície química. Essa modificação da superfície pode ser demonstrada observando as mudanças nos valores dos pontos isoelétricos dos minerais antes e após interação com a bactéria (Tabela II). Tais significantes mudanças no PIE dos minerais são indicativos de interação química. A flotabilidade desses minerais também pode se vista nessa tabela, cujos resultados mostram que a flotabilidade do quartzo e da kaolinita é promovida pela interação bacteriana enquanto que a flotabilidade para calcita, corundum e hematita foi suprimida.

Tabela II. Mudanças do PIE para vários minerais após interação com a bactéria *P. polymyxa*.

Mineral	pH correspondente ao PIE		Porcentagem de Flotação	
	Antes da interação	Após interação	Antes da interação	Após interação
Quartzo	1,7 – 1,8	3,6 – 3,8	4	60 – 80
Caolinita	1,8 – 2,0	2,5 – 3,0	38	80 – 90
Corundum	7,0 – 7,2	2,0 – 4,0	5	2 – 10
Hematita	5,8 – 6,0	2,0 – 4,0	4	2 – 4
Calcita	--	--	8	7 – 8

Fonte: Natarajan, 2006

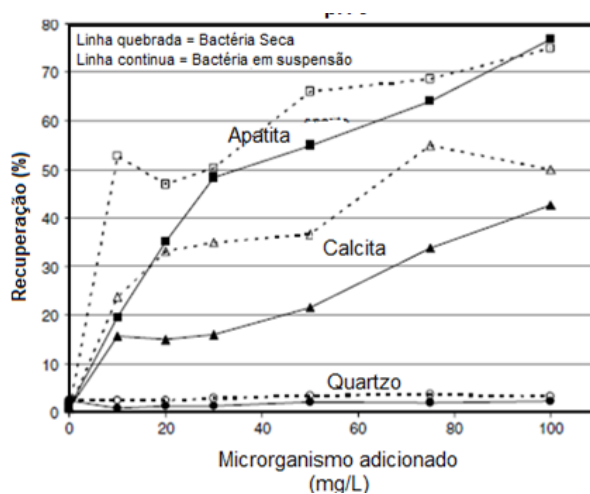
Como falado anteriormente, a bactéria *P. polymyxa* é capaz de produzir exopolissacarídeos e proteínas, além de ácidos orgânicos tais como ácido oxálico, fórmico e acético, os quais têm uso nos processos de beneficiamento mineral (Patra e Natarajan, 2008). Patra e Natarajan, (2008), avaliaram o uso das proteínas extraídas da bactéria *P. polymyxa* como reagentes de flotação de pirita, calcopirita, quartzo, galena e esfalerita. Os resultados mostraram uma preferência na adsorção das proteínas nas amostras minerais de pirita e calcopirita. Os resultados dos ensaios de microflotação podem ser vistos na Figura 1. Observaram-se baixas porcentagens de flotação para a pirita e calcopirita. Por outro lado, no caso do quartzo, esfalerita e galena observaram-se boas porcentagens de flotação. Sugere-se, então, que as proteínas extraídas funcionaríam como agentes depressores para pirita e calcopirita, e como agentes coletores para os outros minerais.



Fonte: Patra e Natarajan, (2008)

Figura 1. A) Densidade de adsorção da proteína extraída da bactéria *P. polymyxa*, B) Flotação mineral após interação com as proteínas (Q: quartzo, P: pirita, C: calcopirita, S: esfalerita, G: Galena)

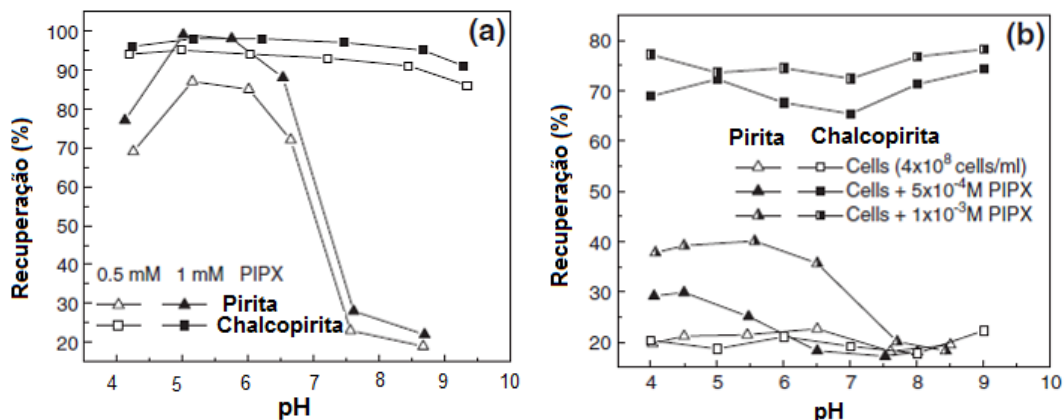
Um trabalho muito interessante é dos autores Smith e Miettinen, (2006), que trabalharam no biobeneficiamento de alguns minerais como apatita, calcita e quartzo, usando as bactérias, *S. carnosus*, *B. firmus*, *B. subtilis* e *B. licheniformis*. Segundo os autores, quando foi feita uma flotação aniônica a bactéria *S. carnosus* cumpriu uma função depressora da apatita e ativadora da calcita. Enquanto na flotação convencional a *S. Carnosus* pode agir como coletor de apatita e calcita como visto na Figura 2, a qual ilustra a microflotação da apatita, calcita e quartzo num valor de pH de 9 usando células da bactéria como coletor em duas formas, como células em suspensão e células secas congeladas.



Fonte: Smith e Miettinen, 2006

Figura 2. Microflotação de apatita usando *S. Carnosus* como coletor, pH 9.

As bactérias *Leptospirillum ferrooxidans* e *A. ferrooxidans* usadas na biolixiviação de sulfetos minerais devido à função oxidante, também foram utilizadas em alguns estudos de bioflotação e biofloculação de sulfetos minerais. Chandraprabha e Natarajan, (2006) usaram a bactéria *A. ferrooxidans* na flotação de pirita e calcopirita usando PIPX como coletor. Esses autores observaram uma maior afinidade da bactéria pela pirita sendo deprimida dando lugar a uma flotação seletiva da calcopirita. Esse comportamento pode ser observado na figura abaixo (Figura 3) comparando a flotação desses minerais usando coletor PIPX com a flotação dos mesmos em presença da bactéria.



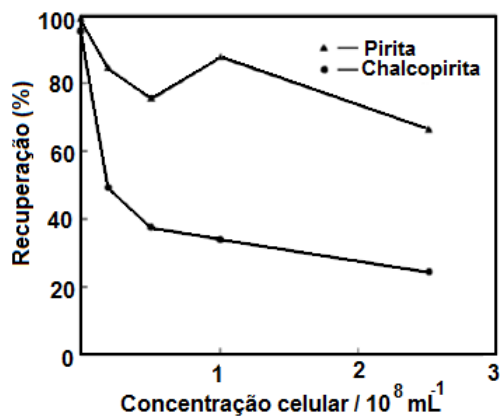
Fonte: Chandraprabha e Natarajan, 2006.

Figura 3. (a) Comportamento da flotação da pirita e calcopirita em função ao pH e diferentes concentrações de coletor (PIPX). (b) Efeito das células na flotação de pirita e calcopirita.

Já no trabalho de Vilinska e Rao, (2008) usou-se a bactéria *L. Ferrooxidans* na flotação dos mesmos minerais (Pirita e calcopirita) usando xantato como coletor. Neste caso, os resultados mostraram o contrario que no estudo anterior, uma maior afinidade da bactéria pela calcopirita, a qual foi deprimida, sendo o efeito na pirita menor, dando, assim, lugar a uma zona potencial para flotação seletiva entre ambos os minerais como pode ser visto na Figura 4.

Fonte: Vilinska e Rao, (2008)

Figura 4. Flotação de pirita e calcopirita em presença de células de *L. Ferrooxidans*, usando xantato como coletor.



3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão do estado da arte evidencia que os estudos de bioflotação mineral estão em sua fase inicial no que tange a interação de micro-organismos e sua adesão à superfície mineral; concomitantemente, os estudos de flotabilidade mostram o relevante potencial do uso de biomassas como biocoletores na flotação de minerais.

Os estudos de seletividade demonstram claramente a possibilidade de gerar biorreagentes com especificidade mineral que podem ser usados efetivamente no bioprocessamento mineral e, assim, obter uma eficiente separação do mineral desejado de um complexo sistema mineralógico.

Finalmente, ressaltamos o uso potencial de bactérias e seus produtos metabólicos como reagentes na flotação mineral; é claro que os resultados irão depender da afinidade da cepa bacteriana a ser usada sobre um dos minerais do sistema a ser estudado, ou seja, o assunto é um pouco complexo, pois como foi visto bactérias da mesma família podem reagir de forma diferente no mesmo mineral; portanto, muitos estudos de seletividade ainda têm que ser feitos.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPERJ, CNPq e CAPES.

5. REFERÊNCIAS

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*, 20, 10, 1026 – 1032, 2007.

Botero, A.E.C., Torem, M.L., Mesquita, L.M.S., Surface chemistry fundamentals of biosorption of *Rhodococcus opacus* and its effect in calcite and magnesite flotation, *Minerals Engineering*, 21, 1, 83 – 92, 2008.

Chandraprabha, M.N., Natarajan, K.A., Surface chemical and flotation behavior of chalcopyrite and pyrite in the presence of *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Hidrometallurgy*, 83, 146 – 152, 2006.

Chun-Yun, J., De-Zhou, W., Wen-Gang, L., Cong, H., Shu-Ling, G., Yu-Juan, W., Selective adsorption of bacteria on sulfide minerals surface, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 18, 1247 – 1252, 2008.

Dubel, J., Smith, R.W., Misra, M., Chen, S., Microorganisms as chemical reagents: The hematite system. *Minerals Engineering*, 5 (3-5), 547 – 556, 1992.

Faharat, M., Hirajima, T., Sasaki, K., Aiba, Y., Doi, K., Adsorption of SIP *E. coli* onto quartz and its applications in froth flotation, *Minerals Engineering*, 21, 389 – 395, 2008.

Hosseini, T.R., Kolehdozan, 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*. 18, 371 – 374, 2005.

Mesquita, L.M.S., Lins, F.A.F., Torem, M.L., Interaction of a hydrofobic bacterium strain in a hematite-quartz flotation system, *International Journal of Mineral Processing*, 71, 31 – 44, 2003.

Namita Deo, Natarajan, K.A., Interaction of *Bacillus Polymyxa* with some oxide minerals with reference to mineral beneficiation and environmental control. *Minerals Engineering*, 10 (12), 1339 – 1354, 1997.

- Namita Deo, Natarajan, K.A. and Somasundaran, P., Mechanisms of adhesion of *Paenibacillus polymyxa* onto hematite, corundum and quartz, *International Journal of Mineral Processing*, 62, 27-39, 2001.
- Natarajan, K.A., Microbially-induced mineral flotation and flocculation: prospects and challenges, *Proceedings of XXIII International Mineral Processing Congress*, 487 – 498, 2006.
- Patra, P., Natarajan, K.A., Microbially induced flotation and flocculation of pyrite and sphalerite. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces* 36, 91 – 99, 2004.
- Patra, P., Natarajan, K.A., Role of mineral specific bacterial proteins in selective flocculation and flotation. *International Journal Minerals Processing*. 88, 53 – 58, 2008.
- Patra, P., Natarajan, K.A., Microbially-induced separation of chalcopyrite and galena. *Minerals Engineering*, 21, 691 – 698, 2008.
- Pecina, E.T., Rodriguez, M., Castillo, P., Diaz, V. Orrantia, E., Effect of *Leptospirillum ferrooxidans* on the flotation kinetics of sulphide ores, *Minerals Engineering* 22, 462 – 468, 2009.
- Raichur, A.M., Misra, M. Bukka, K., and Smith, R.W., Flocculation and flotation of coal by adhesion of hydrophobic *Mycobacterium phlei*, *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 8, 13 – 24, 1996.
- Rao, K.H., Subramanian, S., Bioflotation and Bioflocculation of relevance to minerals bioprocessing, in: *Microbial processing of metal sulfides (Edgardo R. Donati e Wolfgang Sand)*, 267 – 286, 2007.
- Santhiya, D., Subramanian, S., Natarajan, K.A., Hanumantha Rao, K. and FORSSBERG, K.S.E., Biomodulation of galena and sphalerite surfaces using *Thiobacillus thiooxidans*, *International Journal of Mineral Processing*, 62, 121 – 141, 2001.
- Smith, R.W., Miettinen, M., Microorganisms in flotation and flocculation: Future technology or laboratory curiosity?. *Minerals Engineering*, 19, 548 – 553, 2006.
- Subramanian, S., Santhiya, D. and Natarajan, K.A., Surface modification studies on sulphide minerals using bioreagents, *International Journal of Mineral Processing*, 72, 175-188 (2003).
- Vijayakakshmi, S.P., Raichur, A.M., The utility of *Bacillus subtilis* as a bioflocculant for fine coal, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 29, 265 – 275, 2003.
- Vilinska, A., Rao, K.H., *Leptospirillum ferrooxidans*-sulfide mineral interactions with reference to bioflotation and bioflocculation, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 18, 1403 – 1409, 2008.
- Yang, H., Zhang, Q. and Jiang, Z., Adsorbability of *Mycobacterium phlei* on hematite surface, *Journal of University of Science and Technology Beijing* 14 (2), 103 – 106, 2007.
- Zheng, X., Smith, R.W., Dolomite depressants in the location of apatite and cellophane from dolomite. *Minerals Engineering* 10, 537 – 545, 1997.
- Zheng, X.P., Smith, R.W., Metha, R.K., Misra, M. and Raichur, A.M., Anionic flotation of apatite from dolomite modified by the presence of a bacterium, *Minerals and Metallurgical Processing*, 15 (2), 52 – 56, 1998.
- Zheng, X., Arps, P.J., Smith, R.W., Adhesion of two bacteria onto dolomite and apatite: their effect on dolomite depression in anionic flotation. *International Journal Minerals Processing*, 62, 159 – 172, 2001.
- eventus@eventussystem.com.br