

BIOLIXIVIAÇÃO DE UM CONCENTRADO SULFETADO COMPLEXO DE NÍQUEL E FERRO

L. R. G. Santos¹; A. F. Barbosa¹; A. D. Souza²; V. A. Leão¹

1 – Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Núcleo de Valorização de Materiais Minerais, Praça Tiradentes, 20, Centro, Ouro Preto, MG 35400-000 Brasil.

E-mail: versiane@demet.em.ufop.br, lucianor@iceb.ufop.br.

2 – Votorantim Metais, Rodovia BR 040 Km 284, Três Marias, MG Brasil.

E-mail: adelson@vmetais.com.br

RESUMO

Neste trabalho foi estudada a biolixiviação de um concentrado sulfetado complexo de níquel e ferro utilizando bactérias mesófilas do gênero *Acidithiobacillus sp.* O concentrado foi caracterizado utilizando MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) acoplado a um sistema de EDS (Energia Dispersiva de Raios-X). Utilizou-se como substrato um concentrado sulfetado de níquel (pentlandita) com alto teor de ferro (pirrotita). Foram realizados ensaios visando estudar a viabilidade de biolixiviação deste substrato considerado. Foram avaliados, os efeitos do pH, da concentração inicial de ferro e do percentual de sólidos sobre a extração do níquel, discutiu-se ainda o papel das interações galvânicas na dissolução do concentrado. Os resultados indicaram que a biolixiviação pode ser uma alternativa viável ao processamento de sulfetos complexo de ferro e níquel, uma vez que percentuais de extração acima de 70% foram obtidos nos ensaios realizados. A concentração inicial de ferro(II) adicionada ao meio não influi de forma significativa nos percentuais de extração obtidos, possivelmente devido à presença das interações galvânicas. O pH influi nos percentuais de extração obtidos, principalmente pelo controle da formação de precipitados de jarosita, sendo o pH ideal a ser adotado na faixa de 1,8 a 2,0. Percentuais de sólidos elevados (aproximadamente de 10%) podem ser praticados, sem apresentarem diferenças significativas de percentuais finais de extração, quando comparadas aos percentuais mais baixos.

PALAVRAS-CHAVE: Biolixiviação; *Acidithiobacillus sp.*; Pentlandita.

1. INTRODUÇÃO

O setor mineral é um dos principais itens de nossa pauta de exportações e tem dado grande contribuição para o equilíbrio da balança comercial brasileira. Segundo o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) (DNPM 2001): “O valor da produção mineral brasileira calculado para o ano de 2000, foi de ...US\$ 18,549 bilhões... e as cinco primeiras substâncias com maior valor de produção (petróleo, ferro, gás natural, pedras britadas e ouro) responderam por 82,1% da Produção Mineral Brasileira, em 2000. Quando se retiram do cálculo os energéticos, petróleo e gás natural, vemos que esse número sobe de cinco para onze substâncias, para responder pelos mesmos 82,1% da Produção Mineral Brasileira”.

Considerando a produção de metais não ferrosos, a metalurgia dos sulfetos metálicos é a principal responsável pela produção da maioria destes metais. Níquel, cobre, zinco, ouro, prata, cobalto podem ser produzidos a partir de seus respectivos sulfetos. Historicamente, a produção destes metais, presentes em minérios refratários, envolve uma ou mais operações pirometalúrgicas. A pirometalurgia têm o objetivo: (i) produzir o metal diretamente a partir de seus sulfetos: o processo “flash smelting” responsável pela produção de níquel e cobre; ou, (ii) converter o sulfeto metálico em óxido que é mais facilmente lixiviado: a ustulação, aplicada ao processamento de zinco e de minérios refratários de ouro/prata. Nos dois casos, há a produção de dióxido de enxofre (SO₂) que necessita ser posteriormente convertido a ácido sulfúrico. Em função disso, ambas as vias de produção de não ferrosos citadas exigem a presença de um mercado consumidor para o ácido produzido. Como o valor de mercado do ácido sulfúrico não é elevado, a necessidade de transporte deste insumo em grandes distâncias torna estes processos inviáveis do ponto de vista econômico. Uma segunda razão, que se torna cada dia mais importante, é que, por gerar efluente gasoso, e possivelmente gerar chuvas ácidas, a pirometalurgia apresenta potenciais impactos ambientais muito mais relevantes e importantes que as operações hidrometalúrgicas produtoras do mesmo metal. Em função disso, há uma progressiva substituição de rotas pirometalúrgicas por suas equivalentes hidrometalúrgicas, onde os efluentes são gerados em solução aquosa ou são sólidos.

A dissolução de sulfetos é sensivelmente mais lenta e mais difícil que a dos óxidos metálicos. No caso dos sulfetos metálicos, há necessidade de oxidar o íon sulfeto, presente no mineral, a enxofre elementar ou íon sulfato. A forma final depende do tipo de sulfeto processado. Os dois oxidantes mais utilizados, são o oxigênio gasoso e o ferro(III).

O crescente empobrecimento das reservas minerais, tornou necessária a busca de processos alternativos para o tratamento de minérios com baixo teor em metal, de mineralogia mais complexa ou de resíduos industriais gerados durante os processos de concentração e extração. Dentre estes, destacam-se os sulfetos complexos que são caracterizados pelo fino intercrescimento dos grãos de duas ou mais espécies minerais, o que torna as etapas de tratamento destes minérios dispendiosa e de baixa eficiência, devido à dificuldade de se conseguir a liberação adequada dos grãos das partículas. Neste contexto, da dificuldade de tratamento destes sulfetos complexos, a biolixiviação surge como uma alternativa promissora.

A biolixiviação (lixiviação em presença de microorganismos) é uma alternativa para o tratamento hidrometalúrgico dos sulfetos metálicos. A mesma é baseada, principalmente, na habilidade de bactérias acidofílicas de oxidar ferro(II) e/ou compostos sulfetados (Lacey e Lawson, 1970). Apesar de apresentar cinética ainda mais lenta que a dos processos químicos de lixiviação de sulfetos à pressão ambiente, a biolixiviação é considerada uma opção de baixo custo, ideal para o processamento de minérios marginais e rejeitos.

A literatura científica discute a possibilidade de dois mecanismos atuarem durante a biolixiviação de sulfetos metálicos. O primeiro é denominado mecanismo direto, no qual o microorganismo, aderido à superfície do mineral, realiza a dissolução do mesmo, por meio de reações envolvendo enzimas, sendo muito discutidos os mecanismos de adesão da bactéria sobre o mineral (Fowler e Crundwell, 1999; Tributsch, 2001; Hansford, 2001). A bactéria produz um polissacarídeo extracelular (EPS, sigla em inglês) que permite a aderência entre o mineral e a bactéria. Nesta interface ocorrem as reações de oxidação dos minerais. A interação do EPS com o mineral se dá através de interações eletrostáticas (Karavaiko et al., 1985). No caso do enxofre elementar, a adesão é explicada pelo fato da bactéria e o elemento terem natureza hidrofóbica e a adsorção ocorre devido a forças de Van der Waals (Karavaiko et al., 1985). Neste mecanismo, uma alta taxa de dissolução está associada à uma elevada concentração de microorganismos na superfície do mineral.

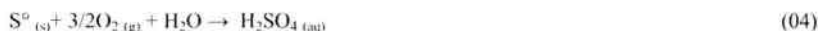
O segundo mecanismo é denominado mecanismo indireto. Neste, o mineral é atacado quimicamente pelo íon Fe(III) e/ou por prótons (H⁺) presentes na solução, dependendo da configuração eletrônica do sulfeto. Durante a oxidação química do mineral, o ferro(III) é transformado em ferro(II). A função do microorganismo, neste caso, é reoxidar ferro(II) a ferro(III), regenerando o agente oxidante. Quando ocorre a formação de enxofre elementar, o microorganismo também deve oxidar este último, impedindo que se forme uma barreira para a difusão do agente oxidante até a superfície do mineral, onde ocorre a reação de oxidação (Fowler e Crundwell, 1999).

Para a pentlandita, as reações propostas para sua biolixiviação, segundo Karavaiko et al., (1985), são:

mecanismo direto:



mecanismo indireto:



2. METODOLOGIA

O material utilizado, foi um concentrado complexo de sulfeto de níquel (pentlandita), contendo alto teor de ferro, gentilmente cedido pela Votorantim Metais. Este concentrado é utilizado na alimentação do forno Flash Smelter da usina de Fortaleza de Minas, do mesmo grupo.

Anteriormente aos ensaios de biolixiviação, o material foi previamente aquecido a 70°C, durante 12 horas, para degradação de reagentes de flotação que possivelmente poderiam estar presentes no concentrado. A caracterização mineralógica foi realizada por difração de raios-X em um equipamento Shimadzu-XRD6000, seguida de caracterização ao microscópio óptico Leica DMLP, e ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) de modelo JEOL JSM 501 combinado a um sistema de análise elementar semi-quantitativo de energia dispersiva de raios-X (EDS). A análise de área superficial foi realizada em um equipamento "High Speed Gaz Sorption Analyzer", modelo Nova1000, marca Quantachrome.

Os ensaios foram conduzidos em erlenmeyers de 250mL, dispostos em agitadores orbitais a 200 min⁻¹ e à temperatura de 34°C. Utilizou-se 5% sólidos nos experimentos (a exceção do ensaio de variação do percentual de sólidos).

Para a cultura de *Acidithiobacillus sp.* foi utilizado o meio Norris: 0,2 g/L de (NH₄)SO₄, 0,4 g/L de MgSO₄.7H₂O e 0,1 g/L de K₂HPO₄. O pH da polpa foi medido (Equipamento Hanna HI931400) e ajustado diariamente com adição de ácido sulfúrico concentrado (98%) ou de NaOH 2,5mol/L. O potencial de oxidação, medido em relação ao eletrodo Ag/AgCl, também foi medido diariamente (Equipamento Digimed DM20). Análises de níquel e ferro foram efetuadas regularmente pelo método de espectrofotometria de absorção atômica, em um Equipamento Perkim Elmer Modelo AAnalist100.

Os primeiros ensaios foram realizados para verificar: (i) a suscetibilidade do concentrado de flotação de pentlandita à biolixiviação;(ii) verificar a extensão da variação dos parâmetros pH, Eh, concentração de ferro(II) e ferro(III) durante a biolixiviação. As condições utilizadas foram: 5g de concentrado; 95mL de solução de meio Norris + 5mL de inóculo (bactérias previamente adaptadas ao concentrado de flotação).

Para o estudo das variáveis que afetam o percentual de extração de níquel, utilizou-se bactérias previamente adaptadas, por 8 semanas (inóculo mãe), em um reator de 10L contendo meio de cultivo em pH igual a 1,8 com 5% de sólidos e em condições ótimas de aeração. Os inóculos utilizados em todos os ensaios de biolixiviação do concentrado de pentlandita foram retirados do inóculo mãe.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização do material

Os resultados da caracterização do material estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Análise mineralógica e química do material utilizado

Mineralogia	% Ni	% Fe	% Co	% Cu	% S	Área Superficial (m ² /g)
Pentlandita associada a pirrotita, calcopirita, magnetita e silicatos	5,9	28,1	0,4	3,53	21,2	2,126

É importante ressaltar que o material apresentou baixo grau de liberação dos sulfetos, mesmo estando em granulometria muito fina. A caracterização ao microscópio ótico revelou diversos intercrescimentos entre os sulfetos presentes, sobretudo entre pentlandita e pirrotita.

3.2. Ensaios de biolixiviação do concentrado de flotação

Ensaio de suscetibilidade à biolixiviação: A figura 1 mostra a evolução do pH e do Eh: Nestes ensaios, o pH foi apenas monitorado. O pH varia fortemente durante os ensaios de lixiviação bacteriana pois ocorrem várias reações com papéis contraditórios no reator.

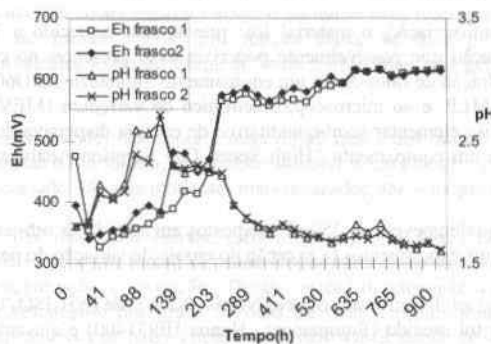
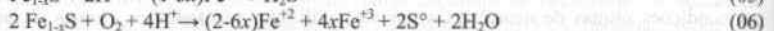


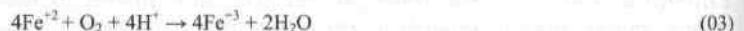
Figura 1: Evolução do pH e do Eh, no ensaio de suscetibilidade a biolixiviação do concentrado de flotação de pentlandita. Ensaios realizados em duplicata; pH inicial 1,8; 34°C; 5% sólidos.

Pode-se observar que o pH aumenta e o potencial (Eh) decresce, durante as primeiras 50 horas. Este resultado é consistente com o obtido por Mason (2003), que propõe que esta queda inicial do potencial (Eh), associada a elevação do pH, é na verdade a combinação de reações de oxidativas e não oxidativas, devido a dissolução dos sulfetos presentes. Mason (2003) propôs as equações 05 e 06 para pirrotita, que é o segundo sulfeto presente em maior proporção no concentrado do presente estudo. As reações 05, dissolução ácida e 06, oxidação ácida da pirrotita em presença de oxigênio, são consumidoras de ácido:



Um aspecto importante das equações 05 e 06, é o fato destas mostrarem a pirrotita se dissolvendo em ácido, o que explicaria a elevação inicial do pH. A queda do Eh estaria associada ao consumo de íons ferro(III) proveniente do inóculo, através da oxidação dos sulfetos presentes.

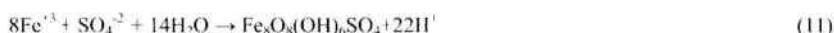
Além das equações citadas acima como consumidoras de ácido, pode-se observar que a presença de carbonatos virtualmente presentes também contribui para esta elevação inicial do pH. Outro fenômeno é a oxidação do ferro(II) via ação bacteriana (equação 3).



Na verdade, o pH exibido no sistema, em um determinado momento, é a combinação das reações 3, 5, 6, entre outras, sendo algumas produtoras de ácido e outras consumidoras. Mesmo que o sistema apresente uma elevação inicial de pH, reações produtoras de ácido estão coexistindo. Como exemplo destas reações produtoras de ácido, pode-se citar a hidrólise do ferro(III) produzido pela oxidação do ferro(II) (eq 07). Num primeiro momento, esta reação não possui papel importante pois todo ferro(III) produzido é prontamente consumido na oxidação dos sulfetos presentes. Isto se reflete no potencial do sistema (Eh) que leva cerca de 150 horas para começar a se elevar. É importante ressaltar que este tempo inicial necessário para a elevação do potencial do sistema está associado também à fase lag de crescimento bacteriano.

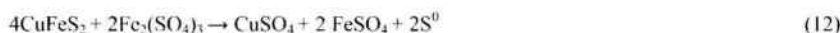
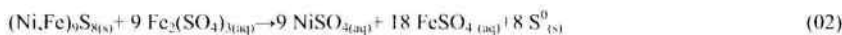


Após 150 horas (fig 01), inicia-se uma fase de produção de ácido agregando agora as reações de oxidação do ferro(II) (equação 03), de hidrólise de ferro(III) (equação 07), oxidação do enxofre (equação 08), precipitação de compostos básicos de ferro (equações 9 a 11) às consumidoras de ácido via oxidação do sulfetos (equações 05 e 06). Mason (2003) propõe as reações 9 a 11 presentes na formação de precipitados de ferro:



As reações 9 a 11 são apenas indicativas, pois nem todos estes compostos foram identificados pelo autor e também ainda não foram observados no presente trabalho.

Pode-se observar pela equação 6, que Fe^{13} é também produzido, apesar do potencial (Eh) decrescer (fig 1) nas primeiras 50 horas, para as quais Mason(2003) cita as equações como relevantes. Esta aparente contradição, entre as equações propostas pelo autor e as observadas no presente trabalho e no do próprio autor, pode ser explicada levando-se em consideração que o Eh exibido pelo sistema é a combinação das contribuições individuais de cada reação que coexiste no mesmo. Desta forma os íons ferro(III) produzidos pela equação 06, são contrabalançados pela produção de íons ferro(II) gerados na dissolução da pentlandita (eq 02), calcopirita (eq 12) e pirrotita (eq 13) via mecanismo indireto.



O período compreendido entre 150 horas e 250 horas é marcado por uma elevação rápida do Eh, e uma queda também rápida do pH (figura 1). A elevação do Eh está associada à oxidação do íon ferro(II), uma vez que as curvas de Eh indicam como evolui o par de oxiredução ferro(III)/ferro(II). Num sistema simples, contendo somente ferro e bactéria, a evolução do Eh é de simples interpretação, pois segue uma curva padrão de crescimento bacteriano (fase de latência, crescimento exponencial e patamar em um valor alto de Eh), ou seja a elevação da população bacteriana provoca elevação da taxa de oxidação do ferro(II). Como consequência, a evolução do Eh pode ser usada para se acompanhar o crescimento bacteriano.

A figura 2 mostra a evolução do percentual de extração de níquel no ensaio de suscetibilidade à biolixiviação. Uma extração de cerca de 60% foi atingido, após 950 horas de biolixiviação (6 semanas). Este resultado é considerado bom, uma vez que, as bactérias tinham sido adaptadas inicialmente a uma condição fixa de pH igual a 1.8 e neste ensaio o pH não foi corrigido.

Mason (2003) observou extrações parecidas para concentrados de níquel que, como já citado anteriormente, apresentavam características químicas e mineralógicas parecidas com o concentrado estudado no presente trabalho. Segundo o autor, após 5 semanas de adaptação, o sistema alcançou cerca de 50% de extração. O concentrado estudado foi o Kambalda que apresentava composição química 13,75%Ni, 27,79%S e 35,97%Fe. A composição mineralógica da amostra era composta de pentlandita, pirrotita, pirita e violarita. As condições utilizadas pelo autor foram 5% de sólidos e pH inicial igual a 2, muito próximas às estudadas no presente trabalho. O autor observou ainda que percentuais de extração de cerca de 100% poderiam ser alcançados, após 18 semanas de adaptação.

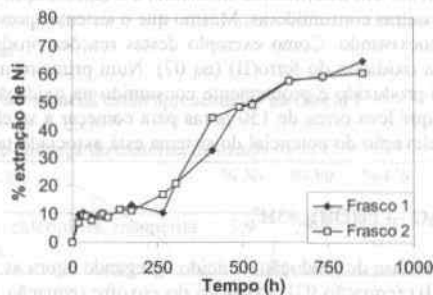


Figura 2 : Evolução do percentual de extração de níquel no ensaio de suscetibilidade à biolixiviação do concentrado de flotação de pentlandita. Ensaios realizados em duplicata; pH inicial 1,8; 34°C; 5% sólidos.

Influência da concentração inicial de ferro(II): Foram realizados ensaios para verificar o efeito da concentração inicial de ferro(II) sobre o percentual de extração de níquel. Nestes ensaios, as condições utilizadas foram: pH igual a 1,8 (ajustado diariamente), 34°C, 5% de sólidos, concentrações iniciais de íons ferro iguais a 0g/L, 2,5g/L, 5g/L, 10g/L. A figura 3 mostra a evolução da extração do níquel, para diferentes concentrações iniciais de ferro(II).

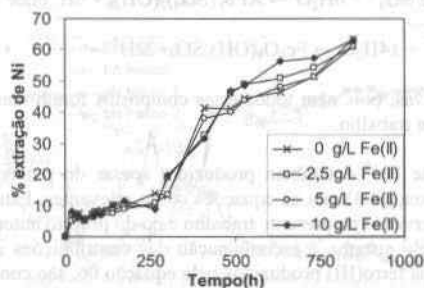


Figura 3: Evolução do percentual de extração de níquel nos ensaios da influência da concentração inicial de ferro(II) na biolixiviação do concentrado de flotação de pentlandita; pH 1,8; 34°C; 5% sólidos.

Como pode ser visto na figura 3, o percentual de extração de níquel comporta-se de maneira semelhante para diferentes concentrações iniciais de ferro(II). O Eh também evoluiu neste ensaio, de forma semelhante. Este comportamento sugere que o ferro(II) dissolvido a partir do concentrado é suficiente para sustentar o processo de dissolução de níquel, o que é consistente com as propriedades mineralógicas do concentrado. O concentrado apresenta alto teor de ferro, boa parte deste ferro está presente na forma de sulfetos. Como discutido anteriormente, os sulfetos presentes no concentrado são solúveis em ácido (eq 05). Isso implicaria que boa parte do ferro(II) poderia ser solubilizado em condições ácidas auto-sustentando o processo de biolixiviação.

Influência do pH: Foram realizados ensaios para verificar o efeito do pH sobre o percentual de extração de níquel. Nestes ensaios, as condições utilizadas foram: concentração inicial de ferro(II) igual a 2,5g/L, pHs iguais a 1,6, 1,8, 2,0, 2,2, 2,4. A figura 4 mostra a evolução do percentual de extração de níquel em diferentes valores de pH.

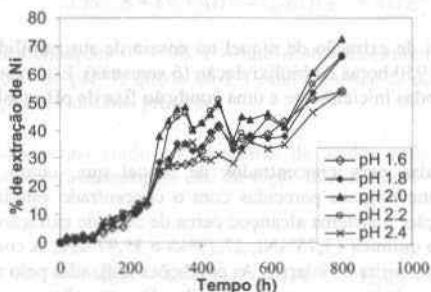


Figura 4: Evolução do percentual de extração nos ensaios de influência do pH na biolixiviação do concentrado de flotação de pentlandita. Concentração inicial de Fe(II) igual a 2,5 g/L, 34°C, 5% sólidos.

Observando-se a figura 4, percebe-se que o percentual de extração de níquel evolui, apresentando uma ligeira tendência de maiores percentuais de extração obtidos em valores maiores de pH. Esta tendência não foi observada para o pH 2,4. Em pH 2,4, a precipitação de jarosita é intensa podendo levar ao recobrimento das partículas de pentlandita, o que impediria assim o ataque do agente oxidante (ferro(III)) e diminuiria a velocidade de dissolução do níquel. A influência do pH na dissolução direta dos sulfetos solúveis em ácido apresentaria importância secundária. A variável pH apresenta desta forma um valor ótimo em torno de 2,0. Abaixo deste valor a atividade bacteriana é menor, o que diminui os percentuais de extração. Já acima do pH 2,0, a precipitação de ferro na forma de jarosita diminui significativamente a quantidade de agente oxidante disponível para dissolução dos sulfetos.

Influência da densidade de polpa: Foram realizados ensaios para verificar o efeito da densidade de polpa sobre o percentual de extração de níquel (fig 5(B)). Nestes ensaios, as condições utilizadas foram: concentração inicial de ferro(II) igual a 2,5g/L, pH igual a 1,8, e densidades de polpa iguais a 2,5%, 5%, 10%, 20%.

Observando a figura 5 (A), percebe-se que o Eh aumenta mais rapidamente em menores percentuais de sólidos. Isto pode estar associado ao fato de que, para maiores percentuais de polpa, as concentrações de íons (ferro(II), níquel(II) e ferro(III)) em solução são maiores, uma vez que maiores quantidades de sulfeto são solubilizadas. Conseqüentemente, o Eh evolui mais rapidamente em menores percentuais de polpa, pois a concentração de ferro(II) solubilizada a partir do sulfeto é menor, em outras palavras, a quantidade de ferro(II) a ser oxidada é menor.

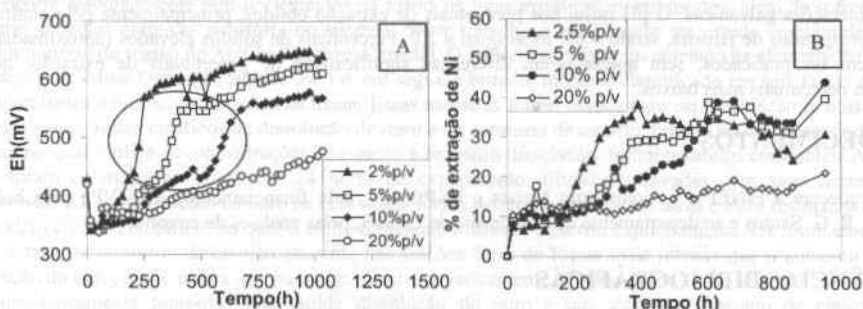


Figura 5: Evolução do Eh (A) e do percentual de extração de níquel (B) nos ensaios de influência da densidade de polpa na biolixiviação do concentrado de flotação de pentlandita. Concentração inicial de Fe(II) igual a 2,5 g/L; 34°C; 5% sólidos. O círculo vermelho indica a fase de crescimento exponencial

De acordo com a figura 5 (B), observa-se que o percentual de extração entre 2,5% a 10% de sólidos apresenta um comportamento semelhante. Isto se deve ao baixo teor de material sulfetado presente no concentrado (21,2% de enxofre), que faz com que, mesmo em percentuais de polpa próximos a 10% de sólidos, a quantidade de substrato não seja excessiva. Possivelmente, mesmo acima de 10% de sólidos, a quantidade de substrato pode não ser excessiva. Em percentuais de polpa elevados, a transferência de oxigênio é comprometida e conseqüentemente, a atividade bacteriana diminui. Isto pode ser observado pela região de crescimento exponencial, que na prática indica a adaptação da bactéria ao meio em questão. Pela figura 5A, percebe-se a fase de crescimento exponencial para os ensaios conduzidos com 2,5%, 5,0% e 10,0% de sólidos (em destaque). Para 20% sólidos, não se observa a fase de crescimento exponencial o que indica que o microrganismo não se adaptou a esta condição nesta série de experimentos. Desta forma menores percentuais de extração são observados para 20% de sólidos, como ocorre na figura 5(B).

Influência das interações galvânicas: Outro ponto a ser considerado, na dissolução do concentrado estudado no presente trabalho, é o baixo grau de liberação dos sulfetos presentes, o que já foi observado na caracterização do concentrado. Este baixo grau de liberação faz com que existam diversos pares galvânicos no concentrado. Observando-se a tabela 2, que mostra a série eletroquímica dos sulfetos e seus potenciais de circuito aberto. A pentlandita é o sulfeto que apresenta o maior potencial dentre os sulfetos presentes no concentrado. Em outras palavras, trata-se do sulfeto mais nobre, o que em contatos galvânicos com a pirrotita ou calcopirita, acelera a dissolução destes últimos e provoca maior solubilização de ferro presente nestes minerais, auto sustentando o processo em ferro(II), como foi sugerido pelo ensaios realizados com diferentes concentrações iniciais de ferro(II).

Tabela 2: Série eletroquímica de alguns sulfetos selecionados (Karavaiko et al., 1985).

Minerais	Potenciais de circuito aberto (SHE , mV)
Galena (PbS)	300
Calcocita (Cu ₂ S)	350
Calcopirita (CuFeS ₂)	400
Pirrotita (Fe _{1-x} S)	450
Pentlandita ((Fe, Ni) ₉ S ₈)	550
Pirita (FeS ₂)	550-600

4. CONCLUSÕES

O biolixiviação pode ser uma alternativa viável ao processamento de sulfetos complexo de ferro e níquel, uma vez percentuais de extração acima de até 70% foram obtidos nos ensaios realizados. A concentração inicial de ferro(II) adicionada ao meio não influi de forma significativa nos percentuais de extração obtidos, possivelmente devido a presença das interações galvânicas. O pH influi nos percentuais de extração obtidos, principalmente pelo controle da formação de precipitados de jarosita, sendo o pH ideal igual a 2,0. Percentuais de sólidos elevados (aproximadamente de 10%) podem ser praticados, sem apresentarem diferenças significativas de percentuais de extração, quando comparadas aos percentuais mais baixos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP e à Votorantim Metais e FAPEMIG, pelo financiamento; Ao CNPq pelo bolsa de Mestrado de L. R. G. Santos e ao departamento de Metalurgia da UFMG, pelas análises de enxofre.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DNPM(2001)-Universo da Mineração Brasileira - 2000. 2001, Departamento Nacional da Produção Mineral: Brasília, 32p.
- Fowler, T.A. e Crundwell, F.K. (1999) Leaching of zinc sulphide by *Thiobacillus ferrooxidans*: Experiments with a controlled redox potential indicate no direct bacterial mechanism. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(10): p. 3570-3575
- Hansford, G.S. e Vargas, T. (2001) Chemical and eletrochemical basis of bioleaching processes. *Hydrometallurgy*, 59: p. 135-145
- Karavaiko, G. e Groudev, S.(1985) International seminar on modern aspects of microbiological hydrometallurgy and international training course on microbiological leaching of metals from ores. United Nations environment programme: Moscow. 415p.
- Lacey, D.T. e Lawson, F. (1970) Kinetics of the liquid-phase oxidation of acid ferrous sulfate by the bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*. *Biotechnology and Bioengineering*, 12: p. 29-50
- Mason, L.J. e Rice, N.M. (2003) The adaptation of *Thiobacillus ferrooxidans* for the treatment of nickel-iron sulphide concentrates. *Minerals Engineering*, 15: p. 795-808
- Tributsch, H. (2001) Direct versus indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*, 59: p. 177-185