

## UM MODELO CINÉTICO PARA A LIXIVIAÇÃO DE UM MINÉRIO DE OURO DA REGIÃO DA FAIXA WEBER (BAHIA)

DE VASCONCELOS, C.S.A.<sup>1</sup>, DE ANDRADE LIMA, L.R.P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia. E-mail: carmel@ufba.br

<sup>2</sup>Universidade Federal da Bahia. E-mail: lelo@ufba.br

### RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo cinético com o minério aurífero da Mineração Fazenda Brasileiro (Bahia). A amostra foi coletada nas pilhas de estocagem do minério que alimenta a planta de beneficiamento. Após a caracterização foram realizados testes cinéticos de lixiviação para avaliar a dissolução do ouro e o consumo de cianeto livre usando um reator fechado com agitação. O pH foi ajustado para 12 e a concentração de cianeto foi mantida constante para os testes cinéticos de ouro. Ao longo das 24 horas de experimento foram coletadas amostras de polpa e imediatamente filtradas. A fase líquida foi analisada e as concentrações de ouro e cianeto livre determinadas. Os resultados obtidos foram ajustados a modelos cinéticos para a dissolução do ouro e para o consumo de cianeto. As equações resultantes são (em mg/kg h):

$$R_{Au} = 1,728 \times 10^{-3} \left( [Au]_s - [Au]_{s,\infty} \right)^{1,77} [CN^-]^{0,87}; \quad R_{CN} = 3,37 \times 10^{-2} + 3,1 \times 10^{-4} \left[ [CN^-] - (1,002 [CN^-]_0 - 11,7) \right]^{1,9}$$

**PALAVRAS-CHAVE:** ouro; lixiviação; cinética; cianeto.

### ABSTRACT

This work presents a kinetic study for the Mineração Fazenda Brasileiro (Bahia) gold ore. The sample was collected at the stock piles before feed the plant. After the characterization kinetic tests were performed to evaluate the gold leaching and the cyanide consumption using a batch agitated reactor. The pH was adjusted to 12 and the cyanide concentration was maintained constant during the gold leaching tests. For 24 hours slurry samples were collected and immediately filtered. The liquid phase was analyzed to the gold and cyanide content. The results were fit with a kinetic model for the gold leaching and the cyanide consumption. The following equations were found (in mg/kg h):

$$R_{Au} = 1,728 \times 10^{-3} \left( [Au]_s - [Au]_{s,\infty} \right)^{1,77} [CN^-]^{0,87}; \quad R_{CN} = 3,37 \times 10^{-2} + 3,1 \times 10^{-4} \left[ [CN^-] - (1,002 [CN^-]_0 - 11,7) \right]^{1,9}$$

**KEYWORDS:** gold; leaching; kinetics; cyanide.

## 1. INTRODUÇÃO

A lixiviação de ouro com cianeto em solução alcalina e saturada em oxigênio com ar é o método convencional de extração deste elemento de minérios (MARSDEN e HOUSE, 1992). A avaliação da cinética de lixiviação de ouro contido em minérios e do consumo de cianeto é fundamental para o projeto sistemático de unidades industriais, assim como para a otimização de usinas hidrometalúrgicas que estão em operação.

Alguns modelos empíricos foram propostos para descrever a lixiviação de minérios auríferos. Estes modelos assumem que as resistências para a transferência de massa são desprezíveis e que a taxa de dissolução é idêntica a equação cinética intrínseca do processo, o que é uma hipótese justificável uma vez que as partículas de minérios neste processo em geral são pequenas e o acesso as partículas de ouro relativamente fácil. Dentre os trabalhos relacionados com a cinética de cianetação de minérios de ouro destacam-se os seguintes: BRITTAN (1975) observou que uma equação de primeira ordem podia descrever a cianetação a temperatura ambiente de alguns minérios, mas não levou em conta a concentração dos reagentes nem o tamanho das partículas do minério. Posteriormente NICOL *et al.* (1984) propôs o seguinte modelo de segunda ordem:

$$R_{Au} = -\frac{d[Au]_s}{dt} = k([Au]_s - [Au]_{s,\infty})^2 \quad (1)$$

na qual  $[Au]_s$  é a concentração de ouro no minério,  $[Au]_{s,\infty}$  é a concentração residual de ouro no minério e  $k$  é a constante de reação. Esta equação não leva em consideração a concentração dos reagentes nem a granulométrica do minério, o que limita a sua aplicação para estudos em engenharia de processo, mas continua sendo utilizado especialmente para descrever a lixiviação de minérios auríferos da África do Sul. Posteriormente, HODOUIN *et al.* (1990) modificaram este modelo introduzindo o efeito das concentrações de cianeto e oxigênio da seguinte forma:

$$R_{Au} = -\frac{d[Au]_s}{dt} = k([Au]_s - [Au]_{s,\infty})^\alpha \quad (2)$$

$$k = k_1 + k_2 [CN^-] + k_3 [O_2] \quad (3)$$

$$[Au]_{s,\infty} = k_4 - k_5 [O_2] \quad (4)$$

onde  $[CN^-]$  e  $[O_2]$  são as concentrações de cianeto livre e oxigênio dissolvido na solução líquida,  $k$  é a constante cinética,  $k_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ) são constantes, e  $\alpha$  é a ordem de reação que neste caso, por ajuste aos dados experimentais, foi encontrado 1,89.

LING *et al.* (1996) propuseram um modelo similar que foi ajustado com resultados experimentais de um estudo cinético realizado com um minério canadense:

$$R_{Au} = -\frac{d[Au]_s}{dt} = (0,0016 \pm 0,0002) [CN^-]^{0,81 \pm 0,10} [O_2]^{0,73 \pm 0,09} ([Au]_s - [Au]_{s,\infty})^{1,5} \quad (\text{mg/kg.h}) \quad (5)$$

A ordem de reação para o ouro foi assumida como 1,5 e as outras foram calibradas com os dados experimentais. As equações 2 e 5 não levam em consideração o tamanho das partículas do minério.

DE ANDRADE LIMA e HODOUIN (2005) e DE ANDRADE LIMA (2005) descreveu os principais modelos cinéticos disponíveis para o processo de cianetação de ouro e apresentou uma

equação cinética para a dissolução do ouro de um minério canadense considerando o efeito das concentrações de cianeto e oxigênio e do tamanho médio de partícula utilizando o seguinte modelo:

$$R_{Au} = (1,13 \times 10^{-3} - 4,37 \times 10^{-11} d^{2,93}) ([Au]_s - [Au]_{s,\infty})^{2,13} [CN^-]^{0,961} [O_2]^{0,228} \quad (\text{mg/kg h}) \quad (6)$$

$$[Au]_{s,\infty} = 0,357 \left[ 1 - 1,49 \text{Exp}(-1,76 \times 10^{-2} d) \right] \quad (\text{g/t}) \quad (7)$$

Onde  $d$  é o tamanho médio das partículas do minério,  $[Au]_s$  é a concentração inicial de ouro para cada fração granulométrica do minério,  $[Au]_{s,\infty}$  é a concentração residual de ouro para cada fração granulométrica do minério,  $[CN^-]$  é a concentração de cianeto livre na solução, e  $[O_2]$  é a concentração de oxigênio dissolvido na solução. Neste trabalho também foi apresentado um modelo cinético para o consumo do cianeto livre:

$$R_{CN} = -\frac{d[CN^-]}{dt} = \left( \frac{1,69 \times 10^{-8}}{d^{0,547} - 6,40} \right) [CN^-]^{3,71} \quad (\text{mg/L h}) \quad (8)$$

Onde  $d$  é o tamanho médio das partículas do minério e  $[CN^-]$  é a concentração de cianeto livre na solução.

O objetivo deste artigo é apresentar modelos cinéticos para descrever a lixiviação de ouro e o consumo de cianeto por um minério aurífero encontrados no estado da Bahia especificamente o minério da Mineração Fazenda Brasileiro.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes cinéticos de lixiviação de ouro foram realizados com o minério retirado da cava subterrânea. As amostras inicialmente foram preparadas fisicamente, caracterizadas por métodos físicos, químicos e mineralógicos, em seguida foram realizados testes cinéticos de lixiviação de ouro e consumo de cianeto, por fim os dados experimentais foram ajustados a modelos pseudo-homogêneos.

As amostras foram retiradas nas pilhas de estocagem do minério que alimenta a planta de beneficiamento, com tamanho médio de 125 milímetros. Este material foi fragmentado em um britador de mandíbulas e pulverizado em um moinho de panela, originando uma fração de 80% menor do que 74 micra. Em seguida a amostra foi homogeneizada, quarteada e alíquotas acondicionadas para caracterização e testes cinéticos. A análise química elementar do minério silicoso foi realizada por fluorescência de raios-X e ativação neutrônica. A identificação da composição mineralógica foi realizada por difratometria de raios-X usando o equipamento Shimadzu XRD-6000. A análise da distribuição granulométrica do material utilizado foi realizado por difração a laser usando o equipamento Mastersizer 2000, tanto para na amostra de minério silicoso estudada em laboratório quanto para a alimentação da usina industrial. A densidade da amostra foi determinada através de um ultrapicnometro à hélio. Amostras do minério silicoso foram também observadas no microscópio eletrônico de varredura após montagem das partículas na superfície do suporte por compactação.

Os testes cinéticos de dissolução do ouro e consumo de cianeto livre foram realizados para o minério em um reator com capacidade para 1000 mililitros, agitado mecanicamente com velocidade de 60 rotações por minuto. Foram utilizadas 500 gramas de minério e igual quantidade de água destilada, formando uma concentração de polpa semelhante ao da usina hidrometalúrgica onde se

processa o minério, cerca de 50%. O pH e a concentração de cianeto livre foram aferidos durante todo o experimento e controlados manualmente. O pH foi medido utilizando um contador de pH digital acompanhado por uma sonda de temperatura registrando o valor médio de 26°C. Os testes de lixiviação foram preparados inicialmente misturando o minério com água destilada, em seguida o pH era ajustado em 12 usando hidróxido de sódio na forma de pastilha. Após 10 minutos de condicionamento foi adicionado cianeto de sódio em pó, registrando o tempo zero do experimento.

Os testes de lixiviação foram realizados por 24 horas, durante este tempo foram coletadas amostras de polpa em intervalos regulares de tempo e imediatamente filtradas a vácuo. A análise de ouro na fase líquida foi realizada por espectroscopia de absorção atômica. A concentração de cianeto livre foi mantida constante ao longo do experimento, a análise realizada por titulação volumétrica utilizou rodanina como indicador e nitrato de prata como agente titulante, a concentração de cianeto foi corrigida com adição de uma quantidade calculada de cianeto de sódio para manter a concentração de cianeto constante durante toda a reação. O efeito da aeração foi observado com a realização de teste com pré-aeração de 24 horas, mantendo a mesma vazão de ar até a finalização do experimento para obter a concentração de 8 mg/L de oxigênio dissolvido na polpa.

Os testes de consumo de cianeto livre foram realizado de forma semelhante aos das lixiviações de ouro. Inicialmente o minério foi misturado com a água destilada, o pH foi ajustado em 12 utilizando hidróxido de sódio na forma de pastilha. Após 10 minutos de condicionamento foi adicionado cianeto de sódio em pó, o reagente foi homogeneizado durante 5 minutos, registrado o tempo zero do experimento. As amostras foram coletadas em intervalos regulares de tempo por 24 horas. O efeito da aeração foi verificado com a realização de testes com pré-aeração de 24 horas, mantendo a mesma vazão de ar até o final do experimento. A concentração de cianeto livre foi determinada por titulação volumétrica.

Foi utilizado o modelo pseudo-homogêneo baseado na equação 6, mas sem levar em consideração o efeito do tamanho das partículas, para descrever o comportamento cinético de lixiviação do ouro e o consumo do cianeto. As equações cinéticas foram resolvidas usando o método de quarta ordem de Runge-Kutta e os seus parâmetros foram estimados usando o método de mínimos quadrados não-linear com um otimizador numérico.

Visando avaliar o efeito de material carbonoso presente em amostras deste depósito, neste estudo foram realizados testes preliminares para avaliar o impacto deste material sobre a cinética de dissolução do ouro e de consumo do cianeto.

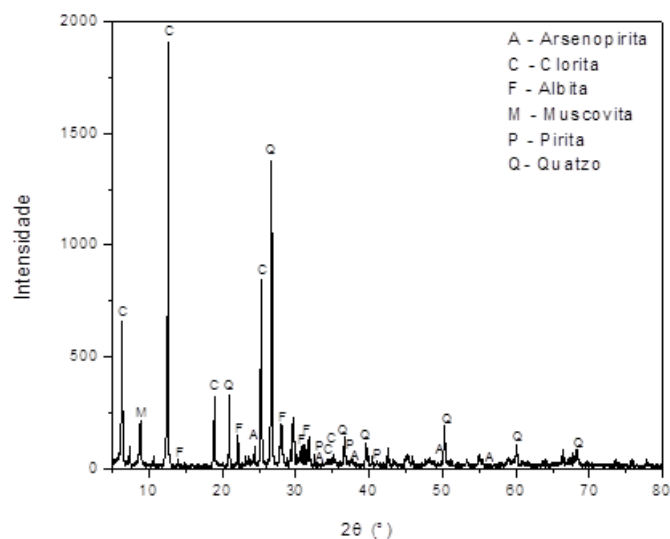
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela I sumariza os resultados das análises químicas dos maiores constituintes do minério. Silício é o elemento majoritário correspondendo a mais de 50% da amostra, enquanto o teor de ferro é de cerca de 14% o que indica a composição total de arsenopirita (FeAsS), pirita (FeS<sub>2</sub>) e pirrotita (FeS). Os constituintes que se apresentam em quantidade menor são Al, K, Mg e Ca. A perda por calcinação foi de 6,77% o que indica o teor de enxofre oriundo dos minerais sulfetados. O teor inicial de ouro no minério foi de 1,2 mg/kg.

A composição mineralógica do minério (Figura 1) mostra a predominância de clorita ((Mg,Al,Fe)<sub>12</sub>(Si, Al)<sub>8</sub>O<sub>20</sub>(OH)<sub>16</sub>) e quartzo (SiO<sub>2</sub>), seguidos por albita (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), muscovita (KAl<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH,F)<sub>2</sub>), arsenopirita (FeAsS) e pirita (FeS<sub>2</sub>).

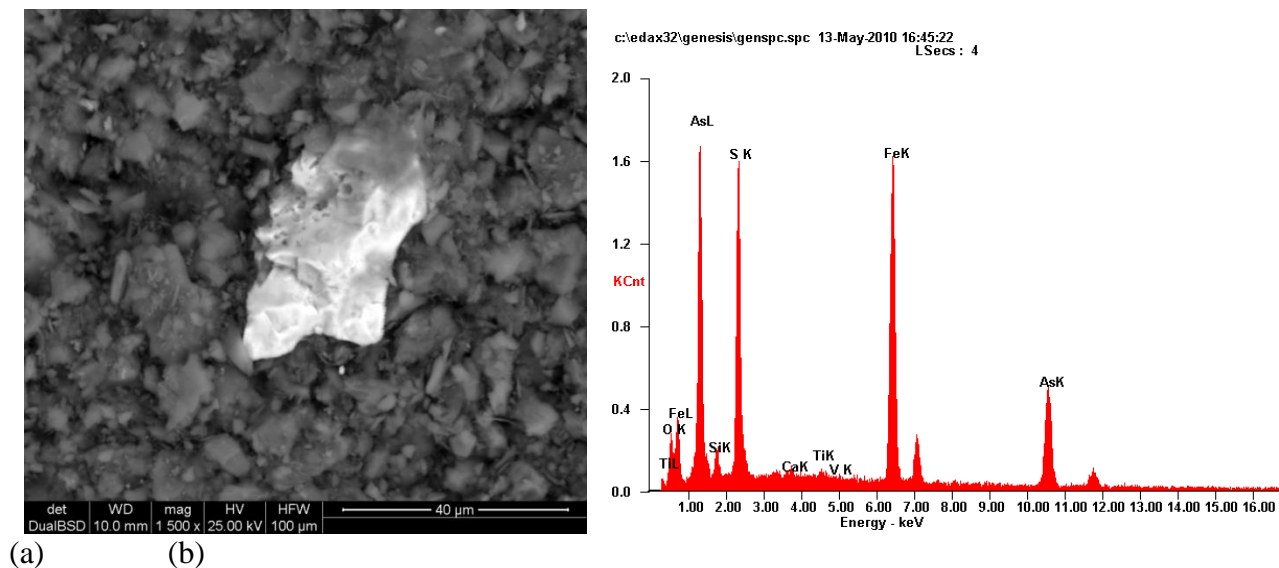
**Tabela I. Concentração majoritária dos constituintes no minério (%).**

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI	Total
53,05	13,71	10,93	6,85	3,39	2,4	1,365	0,55	0,2	0,18	6,77	99,4



**Figura 1. Difração de raio-X para o minério.**

A Figura 2a apresenta uma imagem de elétrons retro-difundidos do minério. A partícula mais clara é arsenopirita, como indica o espectro de EDS na Figura 2b.



**Figura 2. a) Imagem de microscopia eletrônica de varredura e b) espectro de EDS, minério silicoso.**

A distribuição granulométrica da amostra de minério usada nos testes cinéticos e a amostra coletada na alimentação dos tanques de cianetação da usina são mostradas na Figura 3. Nota-se que as distribuições granulométricas situam-se entre 0,3 a 1000 μm e o d<sub>90</sub> das amostras são respectivamente 156 e 193 μm. A massa específica da amostra apresentou um valor de 2,89 g/cm<sup>3</sup>, próximo ao massa específica da clorita (2,6 – 3,3 g/cm<sup>3</sup>) e do quartzo (2,65 g/cm<sup>3</sup>), que são os maiores constituintes do minério.

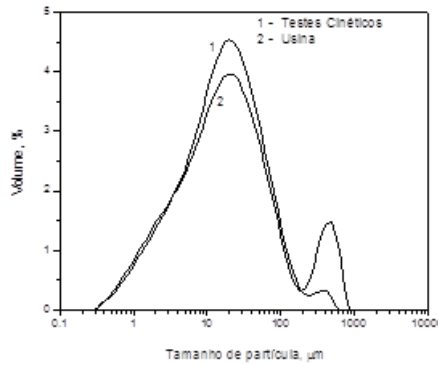


Figura 3. Distribuição granulométrica do minério.

A evolução temporal da lixiviação de ouro para as concentrações de cianeto livre iguais a 200 e 500 mg/L são mostradas na Figura 4. Nota-se que a dissolução ocorre mais lentamente quando a concentração de cianeto livre é de 200 mg/L. Para a concentração de cianeto de 200 mg/L a extração máxima do ouro foi de cerca de 72 % e para a concentração de 500 mg/L de cianeto livre a extração máxima foi de 97%. O modelo cinético ajustado aos dados experimentais, também mostrado na Figura 4, corresponde à equação:

$$R_{Au} = -\frac{d[Au]_s}{dt} = 1,728 \times 10^{-3} \left( [Au]_s - [Au]_{s,\infty} \right)^{1,77} [CN^-]^{0,87} \quad (\text{mg/kg h}) \quad (9)$$

$$[Au]_{s,\infty} = 0,15 \quad (\text{mg/kg}) \quad (10)$$

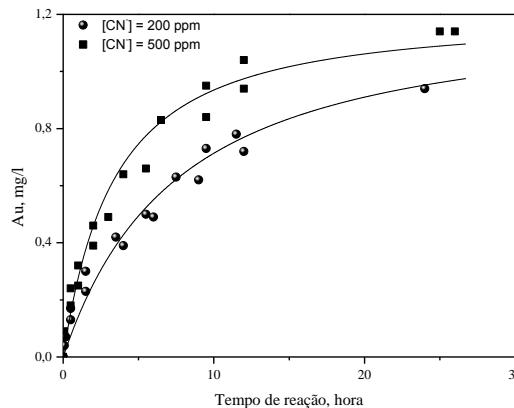


Figura 4. Cinética de lixiviação do ouro do minério silicoso.

Os resultados da cinética de consumo de cianeto livre para o minério nas concentrações iniciais de 200, 400 e 600 mg/L são apresentadas na Figura 5. Nota-se que o consumo de cianeto é pequeno e praticamente independente do aumento da concentração do reagente. Isto é atribuído a presença reduzida de espécies consumidoras de cianeto, constituídos principalmente por minerais sulfetados de ferro. O modelo cinético ajustado aos dados experimentais é também mostrado na Figura 5 e corresponde a equação:

$$R_{CN} = -\frac{d[CN^-]}{dt} = 3,37 \times 10^{-2} + 3,1 \times 10^{-4} \left( [CN^-] - [CN^-]_{\infty} \right)^{1,9} \quad (\text{mg/L h}) \quad (10)$$

$$[CN^-]_{\infty} = 1,002 [CN^-]_0 - 11,7 \quad (\text{mg/L}) \quad (11)$$

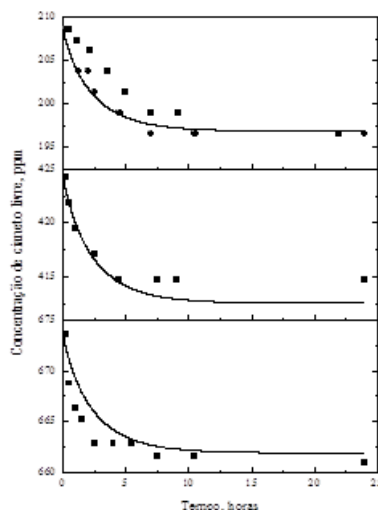


Figura 5. Cinética do consumo de cianeto livre para o minério.

Para o minério com a presença de material carbonoso e teor inicial de ouro no minério de 1,1 mg/kg a lixiviação do ouro em função do tempo para concentrações de cianeto livre iguais a 200, 400 e 500 mg/L é apresentada na Figura 6a. Nota-se que a cinética de lixiviação não sofrer influencia do aumento da concentração do cianeto, apresentando comportamento análogo nas três concentrações de cianeto livre estudadas. A extração de ouro total foi menor do que o minério silicoso com 57, 56 e 54% respectivamente para 200, 400 e 500 mg/L de cianeto livre, devido a adsorção deletéria do ouro solubilizado no minério.

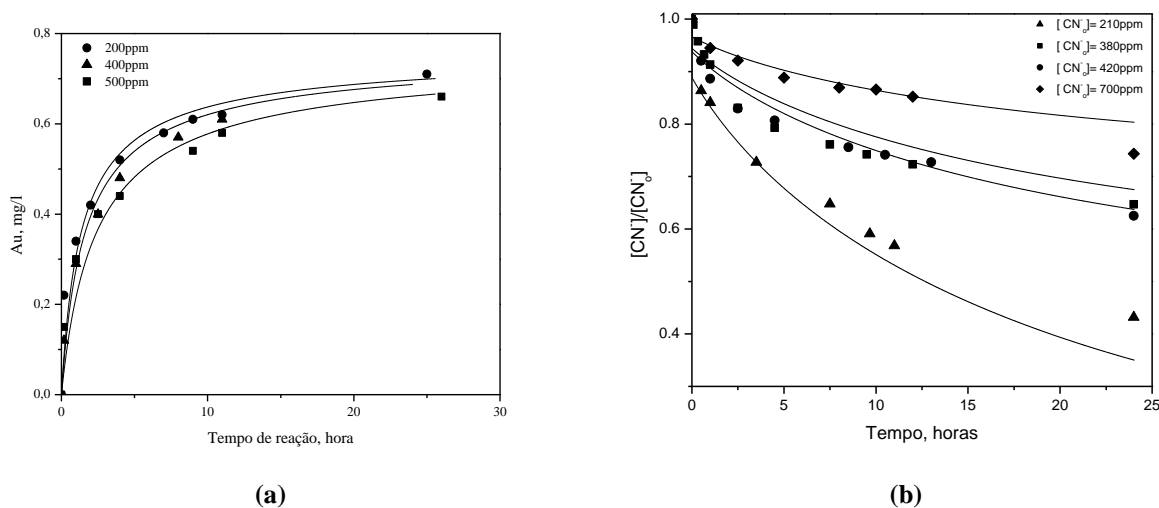


Figura 6. Cinética do minério com material carbonoso: a) Lixiviação do ouro, b) Consumo de cianeto.

Os resultados dos testes cinéticos de consumo de cianeto para o minério com material carbonoso nas concentrações iniciais de 210, 380, 420 e 700 mg/L são mostrados na Figura 6b. Nota-se que o consumo de cianeto é maior neste caso que para minério silicoso e aumenta com a concentração inicial de cianeto na polpa. O consumo observado foi de 120, 130, 155 e 180 mg/L nos testes realizados. A taxa de consumo de cianeto aumentou inversamente com a concentração inicial de cianeto livre.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentado um estudo cinético com o minério aurífero de Fazenda Brasileiro. A amostra do minério foi coletada nas pilhas de estocagem do minério que alimenta a planta de beneficiamento, após fragmentação, classificação por tamanho, caracterização química e mineralógica foram realizados testes cinéticos de lixiviação para descrever o comportamento da dissolução do ouro e consumo de cianeto livre. Os experimentos foram realizados em um reator fechado, agitado com velocidade de 60 RPM, a 26°C e pH ajustado em 12, a concentração de cianeto foi mantida constante para os testes cinéticos de ouro. Ao longo das 24 horas de experimento foram coletadas amostras de polpa em intervalos regulares e imediatamente filtradas, na fase líquida foram analisadas as concentrações de ouro e cianeto livre. Os resultados obtidos foram ajustados por modelos empíricos que levam em consideração a concentração do agente lixiviante. A equação cinética de dissolução do ouro demonstra que a ordem da reação para o ouro é aproximadamente 2. O consumo de cianeto livre é reduzido devido a presença de poucas espécies consumidoras de cianeto, e independe do aumento da concentração do agente lixiviante, a ordem da reação cinética para o cianeto é em cerca de 2.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPESB pela concessão de bolsas de Iniciação Científica para o desenvolvimento deste trabalho, a Mineração Fazenda Brasileiro pelo fornecimento de amostras e realização de análises químicas, ao Departamento de Polícia Técnica da Bahia pela disponibilização da microscopia eletrônica, a Millennium Chemicals pela realização das análises granulométricas e ao PROTEC UFBA pela realização da difração de raios X.

#### 6. REFERÊNCIAS

- BRITTAN, M.I., Variable activation energy model for leaching kinetics, *International Journal of Mineral Processing*, v. 2, p.321-331, 1975.
- DE ANDRADE LIMA, L.R.P., HODOUIN, D., A lumped kinetic model for gold ore cyanidation. *Hydrometallurgy*, v. 79, p.121-137, 2005.
- DE ANDRADE LIMA, L.R.P., Um modelo cinético para a lixiviação de minérios auríferos, *Anais do XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, Natal (RN), v.2, p.123-130, 2005.
- HODOUIN, D., BISSONNETTE, B., KANE, M. An instrumented laboratory cell for gold cyanidation modelling. In *Proceedings of the 22th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ed. CIM, pp. 562-574, 1990.
- LING, P., PAPANGELAKIS, V.G., ARGYROPOULOS, S.A. E KONDOS, P.D. An improved rate equation for cyanidation of a gold ore, *Canadian Metallurgical Quarterly*, v.35, n.3, p.225-234, 1996.
- MARSDEN, J., HOUSE, I., *The chemistry of gold extractive*. Ellis Horwood, New York, 1992.
- NICOL, M.J, FLEMING, C.A., CROMBERGE, G. The adsorption of gold cyanide onto activated carbon. II: Applications of the kinetic model to multistage absorption circuits, *J. S. Afr.Inst.Min. Metall.*, v. 84, n.2, p.50-54, 1984.