

# ELETORRECUPERAÇÃO DE COBRE DE EFLUENTES CIANÍDRICOS DILUÍDOS <sup>1</sup>

*Felipe Ramalho Pombo<sup>2</sup>  
Achilles Junqueira Bourdot Dutra<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Vários processos industriais, particularmente aqueles existentes nas usinas de processamento de minérios auríferos e nas galvanoplastias, utilizam o cianeto como reagente, pois este, propicia uma série de benefícios a tais procedimentos industriais apesar de sua elevada toxicidade. Como resultado, são geradas enormes quantidades de efluente industrial contendo cianeto e metais pesados em solução.

O objetivo desse trabalho foi desenvolver uma célula eletrolítica, com o intuito de recuperar o cobre e oxidar o cianeto livre, existentes em soluções diluídas, simulando aquelas geradas pela lavagem das moedas na Casa da Moeda do Brasil. A meta almejada foi atingir os padrões estabelecidos pelo CONAMA (1,0 mg/L de cobre e 0,2 mg/L de cianeto total). Os melhores resultados foram alcançados quando a temperatura foi de 50°C e a vazão igual a 0,37 mL/s, quando os teores de cobre e cianeto livre, após três horas de eletrólise, foram, respectivamente, 0,7 mg/L e 0,08 mg/L, para uma corrente de 1,5A, e, respectivamente, menor que 0,5 mg/L e 0,08 mg/L, para uma corrente de 2A.

**Palavras-chave:** Efluente; Cobre; Cianeto; Eletrorrecuperação.

## **COPPER ELECTROWINNING FROM DILUTED CYANIDE EFFLUENTS**

### **Abstract**

Several industrial processes, especially those employed in gold mining and metal electroplating, use cyanide as a reagent, despite its high toxicity. As a result of these practices, large amounts of industrial wastewaters containing cyanide and heavy metals are generated. This work aims to develop an electrolytic cell in order to recover the copper and at the same time to oxidize the free cyanide in the diluted solutions, simulating the wastewaters from the rinsing of copper electroplated disks, for coins manufactured in the Brazilian Mint. The desired goal was to reach the CONAMA standards for effluents discarding (1.0 mg/L for copper and 0.2 mg/L for total cyanide). The best results were obtained at a temperature of 50°C and solution flow rate of 0.37 mL/s and after three-hour electrolysis, when the copper and free cyanide concentrations were, respectively, 0.7 mg/L and 0.08 mg/L, for an electric current of 1.5 A, and, respectively, less than 0.5 mg/L and 0.08 mg/L, for an electric current of 2.0 A.

**Key words:** Effluent; Copper; Cyanide; Electrowinning.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *M. Sc., COPPE/UFRJ-PEMM, e-mail: pombo@metalmat.ufrj.br.*

<sup>3</sup> *D. Sc., COPPE/UFRJ-PEMM, e-mail: adutra@metalmat.ufrj.br.*

## 1 INTRODUÇÃO

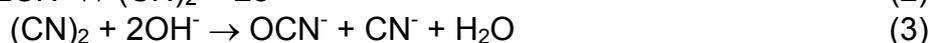
Diversos procedimentos industriais, tais como aqueles existentes nas indústrias minero-metalúrgicas, geram significativas quantidades de efluentes tóxicos contendo teores elevados de metais pesados em solução. Este fato implica na necessidade de um tratamento prévio antes de seu descarte no corpo receptor, que é justificado tanto por questões ambientais, no sentido de minimizar os impactos causados pelo efluente no meio ambiente, como por razões econômicas, quando for possível a reciclagem de reagentes e a recuperação de metais, resultando este último numa diminuição dos custos operacionais da indústria.

As usinas de processamento de minérios auríferos e as indústrias de galvanoplastia utilizam o cianeto como reagente em seus processos, no primeiro caso como agente lixiviante e no segundo como constituinte do eletrólito, devido a uma série de benefícios a tais procedimentos industriais, apesar da elevada toxicidade do cianeto. A Casa da Moeda do Brasil gera, em sua unidade de eletrodeposição de cobre sobre aço carbono para a fabricação das moedas de um e cinco centavos, dois tipos de efluente cianídrico: um concentrado, gerado após a sangria de eletrólitos contaminados, que contém cerca de 26 g/L de cobre e cerca de 13 g/L de KCN; e outro diluído, gerado pela lavagem das peças (moedas), que contém centenas de miligramas por litro de cianeto e Cu(I).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente, em sua Resolução N<sup>o</sup> 357 de 17 de março de 2005,<sup>(1)</sup> fixou os padrões para descarte de efluentes nos corpos receptores, estabelecendo, para os teores finais de cobre e cianeto total, 1,0 mg/L e 0,2 mg/L, respectivamente. Entretanto, o método comumente empregado pelas indústrias de acabamento metálico para tratar seus efluentes (precipitação química com hidróxidos e sulfetos) não é satisfatório do ponto de vista ambiental,<sup>(2)</sup> resultando numa geração de grande quantidade de lamas tóxicas (hidróxidos e sulfetos metálicos), que são resíduos sólidos perigosos e classificados como classe I, segundo a ABNT.<sup>(3)</sup>

Existe, na literatura, a descrição de uma série de métodos para tratar efluentes contendo cianeto, com o objetivo de sua degradação ou de sua reciclagem.<sup>(4)</sup> Os que têm por finalidade a degradação de cianeto utilizam, em geral, oxidantes tais como peróxido de hidrogênio e hipoclorito de sódio, gerando, ao final do processo, lamas tóxicas; já aqueles que têm por finalidade a reciclagem de cianeto geram, em geral, soluções concentradas, que se não puderem ser aproveitadas se tornarão um outro passivo ambiental.

Neste contexto, os processos eletrolíticos se tornam bastante atrativos, recuperando os metais numa forma pura e sem a geração de resíduos, propiciando ainda a oxidação de cianeto livre no anodo ao mesmo tempo, conforme mostrado nas reações abaixo. A Reação (1) representa a redução de cobre a partir de seu complexo, a Reação (2) mostra a oxidação de cianeto livre formando um composto gasoso intermediário conhecido como cianogênio, o qual sofre hidrólise formando cianato (Reação (3)).



Em soluções cianídricas contendo cobre, três espécies complexas podem estar presentes:  $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ ,  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$  e  $\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$ . A Tabela 1 apresenta as energias livres e os potenciais de eletrodo padrão para as reações de redução dos três complexos mencionados acima.<sup>(5)</sup>

**Tabela 1.** Energias livres e potenciais de eletrodo padrão para as reações possíveis envolvendo a redução de cobre em meio cianídrico.<sup>(5)</sup>

Reação	$\Delta G^0$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	E <sup>0</sup> (V)
$\text{Cu}(\text{CN})_2^- + e^- \rightarrow \text{Cu} + 2\text{CN}^-$	42,80	-0,444
$\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-} + e^- \rightarrow \text{Cu} + 3\text{CN}^-$	116,2	-1,205
$\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-} + e^- \rightarrow \text{Cu} + 4\text{CN}^-$	124,6	-1,292

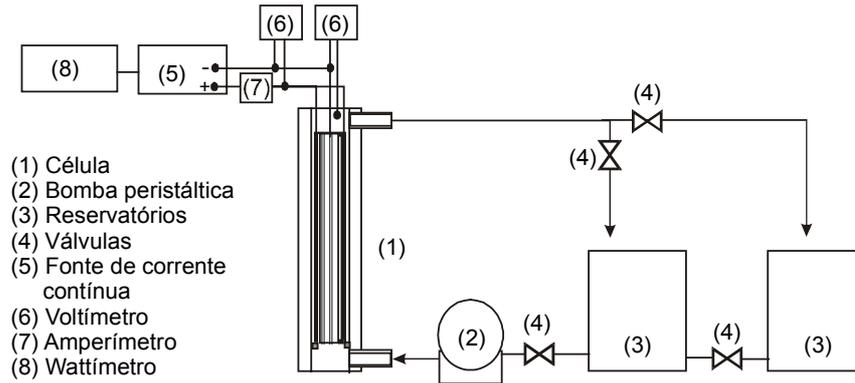
Foi reportado na literatura<sup>(6,7)</sup> que a presença de cobre catalisa a reação de oxidação de cianeto livre através da formação de um filme anódico de óxidos de Cu(I) e Cu(II). Segundo Szpyrkowick *et al.*<sup>(8)</sup> um aumento de temperatura também resulta numa maior taxa da reação de oxidação de cianeto, além de sugerir um aumento do potencial de redução dos ciano-complexos de cobre através da diminuição de suas constantes termodinâmicas de formação global.<sup>(9)</sup>

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar em escala de bancada uma célula eletrolítica com catodo de aço inoxidável AISI 304 e anodos de titânio revestido com óxido de rutênio, para a recuperação do cobre de efluentes aquosos diluídos contendo cianeto, possibilitando ainda a oxidação do cianeto livre, evitando assim o descarte de efluentes altamente tóxicos no meio ambiente. O efluente foi preparado em laboratório, simulando aqueles gerados pela lavagem das moedas na Casa da Moeda do Brasil. A meta almejada foi adequar os padrões de cobre e cianeto total àqueles estipulados pelo CONAMA.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados testes voltamétricos, empregando-se um potenciostato/galvanostato EG&G Princeton Applied Research modelo 273-A, tendo como interface o cartão controlador GPIB STD-8410 e aquisição de dados pelo programa Research Electrochemistry Software 4.00, modelo 270/250 da EG&G Instruments. A célula de vidro empregada nas voltametrias era composta de duas partes, sendo que uma continha o capilar de Luggin e nela se encontrava o eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS). Na outra parte se encontravam as entradas para o eletrodo de trabalho, borbulhador de nitrogênio e contra-eletrodo. Os eletrodos de trabalho foram um disco rotatório de aço inoxidável com 1,0 cm<sup>2</sup> de área, nos ensaios catódicos, e um disco de titânio revestido com óxido de rutênio com 0,55 cm<sup>2</sup> de área, nos ensaios anódicos. Como contra-eletrodo foi utilizado um fio de platina. Antes de cada teste voltamétrico purgou-se a solução com nitrogênio durante cerca de 40 minutos, com o objetivo de remover o oxigênio dissolvido.

Nos ensaios para a recuperação de cobre e oxidação de cianeto livre utilizou-se uma célula de acrílico com apenas um compartimento, que consistiu em uma célula de fluxo sem membrana separando o anodo do catodo, onde o eletrólito passava paralelamente aos eletrodos porosos, ou seja, a vazão do eletrólito possuía direção perpendicular à corrente aplicada. Na célula eletrolítica utilizaram-se dois anodos e um catodo. Os anodos consistiram em telas de titânio revestidas com óxido de rutênio (RuO<sub>2</sub>), com dimensões de 25 cm por 5 cm, e como catodo foi utilizado uma tela de aço inoxidável, dobrada em 10 vezes de modo a aumentar a área catódica, resultando em uma área igual a 599,8 cm<sup>2</sup>. A célula eletrolítica, de volume igual a aproximadamente 120 mL, foi alimentada por dois reservatórios, e em cada ensaio foi tratado um litro de solução. A Figura 1 apresenta o esquema da montagem experimental para o tratamento do efluente cianídrico diluído.



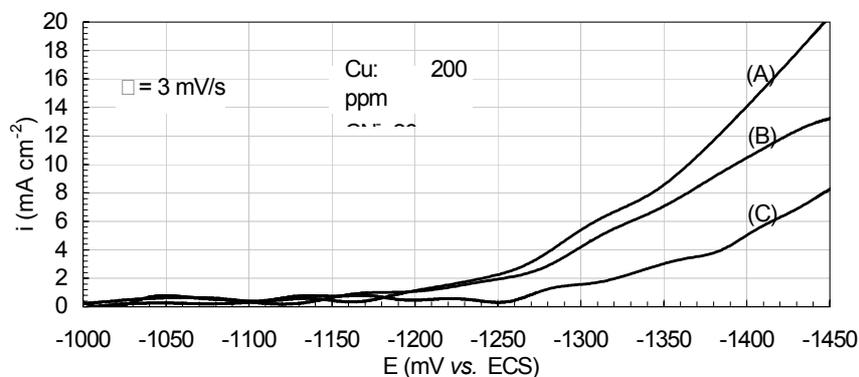
**Figura 1.** Esquema da montagem experimental.

As soluções utilizadas nos testes eletrolíticos possuíam 200 mg/L de cobre e 130 mg/L de cianeto livre, e foram preparadas com reagentes de grau analítico ( $K_2SO_4$ , NaOH, NaCN e CuCN). A concentração de cobre foi monitorada pela técnica de absorção atômica, utilizando-se um espectrofotômetro modelo AA 6800 da Shimadzu, e a massa final de cobre recuperada também foi verificada pela pesagem dos catodos antes e depois da eletrodeposição. A concentração de cianeto livre foi monitorada pela técnica de titulação com nitrato de prata, com a utilização de hidróxido de amônio para ajuste de pH e de iodeto de potássio como indicador.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

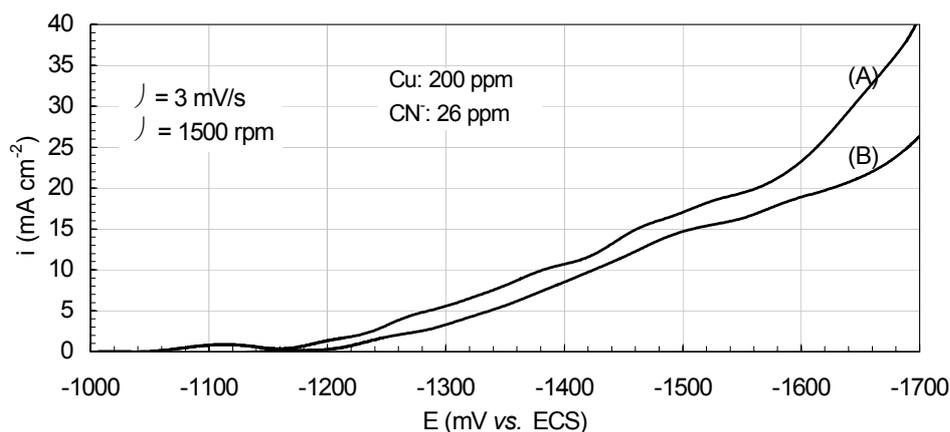
#### 3.1 Testes Voltamétricos

As voltametrias tiveram como objetivo definir os parâmetros ideais para os ensaios de remoção eletrolítica de cobre do efluente em estudo. A Figura 2 apresenta a influência da velocidade de rotação do eletrodo nas curvas de polarização catódica. Nota-se que o aumento da velocidade de rotação conduz a um aumento da altura do *plateau* de densidade de corrente limite, pois implica numa diminuição da espessura da camada limite. Isso sugere que um aumento de vazão nos ensaios na célula eletrolítica de bancada resultaria em um aumento da eficiência de corrente catódica, ocorrendo uma melhoria do processo de eletrorrecuperação de cobre.



**Figura 2.** Influência da velocidade de rotação do eletrodo nas curvas de polarização catódica, para soluções contendo 0,2 mol/L de  $K_2SO_4$ ,  $10^{-3}$  mol/L de NaOH,  $10^{-3}$  mol/L de  $CN^-$  como NaCN e  $3,15 \times 10^{-3}$  mol/L de Cu como CuCN, efetuadas com um eletrodo de disco rotatório de aço inoxidável com  $1,0 \text{ cm}^2$  de área. (A) 1700 rpm; (B) 1500 rpm; (C) 1300 rpm.

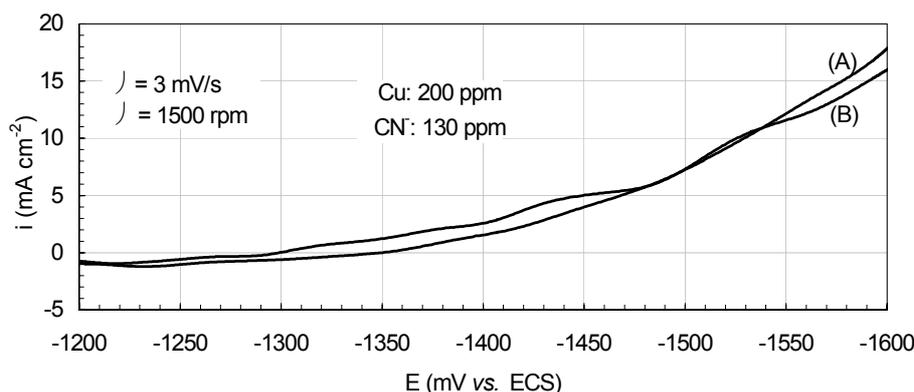
A Figura 3 apresenta duas curvas de polarização catódica, realizadas a 25 e a 50°C, mostrando que o aumento de temperatura facilita a deposição de cobre a partir de seus complexos. Isso ocorre devido a um deslocamento na predominância dos complexos em direção àqueles de menor número de coordenação, causando um aumento do potencial de equilíbrio da reação de redução (par Cu(I)/Cu). Isso faz com que a deposição de cobre se inicie em potenciais menos catódicos para a temperatura mais elevada. Além disso, na medida em que aumentamos a temperatura, aumentamos também a altura do *plateau* de densidade de corrente limite, ocorrendo portanto um aproveitamento maior da corrente catódica, implicando numa elevação da eficiência de corrente.



**Figura 3.** Influência da temperatura nas curvas de polarização catódica, para soluções contendo 0,2 mol/L de  $K_2SO_4$ ,  $10^{-3}$  mol/L de NaOH,  $10^{-3}$  mol/L de  $CN^-$  como NaCN e  $3,15 \times 10^{-3}$  mol/L de Cu como CuCN, efetuadas com um eletrodo de disco rotatório de aço inoxidável com  $1,0 \text{ cm}^2$  de área. (A) 50°C e (B) 25°C.

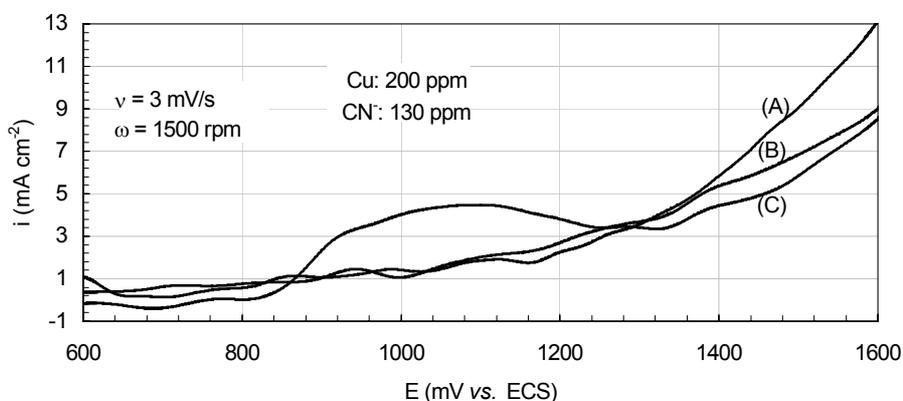
Uma voltametria de varredura linear catódica foi realizada com o objetivo de estudar os potenciais de deposição do cobre a partir de seus complexos, para as concentrações utilizadas na célula eletrolítica. A partir do voltamograma mencionado (Figura 4B), nota-se que, nessas condições, a deposição do cobre, a partir do complexo  $Cu(CN)_3^{2-}$ , inicia-se em um potencial ligeiramente inferior a  $-1350 \text{ mV}$ , alcançando um *plateau* de densidade de corrente limite em torno de  $-1380 \text{ mV}$ . E a deposição do cobre, a partir do complexo  $Cu(CN)_4^{3-}$ , começa em um potencial igual a aproximadamente  $-1400 \text{ mV}$ , alcançando um *plateau* de densidade de corrente limite em torno de  $-1450 \text{ mV}$ .

Após um potencial de cerca de  $-1490 \text{ mV}$ , o acréscimo de corrente está associado a uma intensa geração de hidrogênio, fato confirmado com a superposição da voltametria da Figura 4B com outra realizada com a mesma concentração de cianeto livre, porém sem o cobre (Figura 4A).



**Figura 4.** Voltametrias de varredura linear catódica, para soluções contendo 0,2 mol/L de  $K_2SO_4$ ,  $10^{-3}$  mol/L de NaOH e  $5 \times 10^{-3}$  mol/L de  $CN^-$  como NaCN, efetuadas com um eletrodo de disco rotatório de aço inoxidável com  $1,0 \text{ cm}^2$  de área. (A) sem cobre e (B) com  $3,15 \times 10^{-3}$  mol/L de Cu como CuCN.

Voltametrias de varredura linear anódica foram realizadas, com o objetivo de estudar o potencial no qual ocorre a oxidação de cianeto livre para as concentrações utilizadas na célula eletrolítica, e a influência da presença de cobre neste processo. Observa-se, na Figura 5, que a evolução anódica de oxigênio (curva (A)) se inicia em um potencial aproximado de 720 mV vs. ECS, ocorrendo porém de forma mais intensa em potenciais superiores a 1200 mV. Ainda é observado que a oxidação de cianeto livre acontece em um potencial anódico de 940 mV vs. ECS (curva (B)), onde temos cianeto livre na ausência de cobre. Nota-se, ainda, que na presença de cobre (curva (C)) a oxidação de cianeto é catalisada, sugerindo a formação de óxidos de cobre, os quais funcionam como catalisadores do processo.

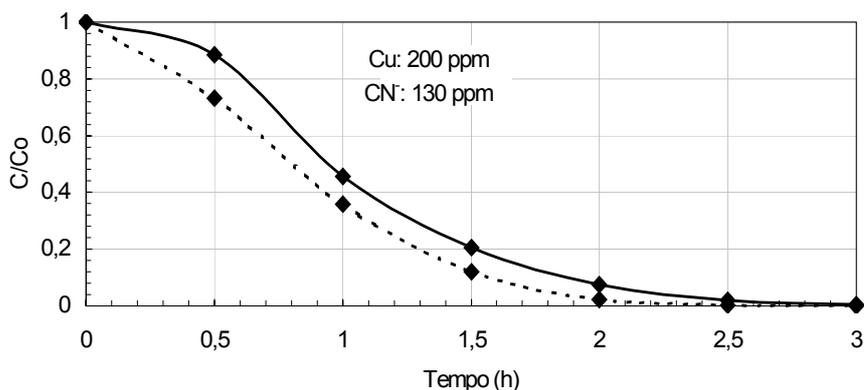


**Figura 5.** Voltametrias de varredura linear anódica, efetuadas com um eletrodo de disco rotatório de Ti revestido com  $RuO_2$  com  $0,55 \text{ cm}^2$  de área, para soluções contendo: (A) 0,2 mol/L de  $K_2SO_4$  e  $10^{-3}$  mol/L de NaOH; (B) o mesmo de (A) adicionando-se  $10^{-3}$  mol/L de  $CN^-$  como NaCN; (C) o mesmo de (B) adicionando-se  $3,15 \times 10^{-3}$  mol/L de Cu como CuCN.

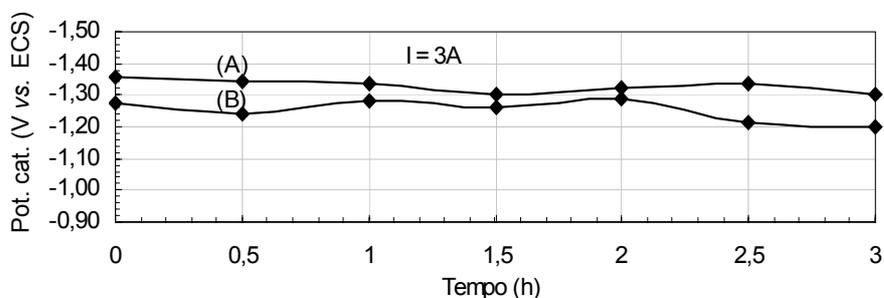
### 3.2 Ensaios na Célula Eletrolítica

A influência da vazão nos ensaios na célula eletrolítica foi verificada. Observa-se, na Figura 6, que um aumento de vazão implica numa maior taxa de recuperação de cobre, fato já sugerido pela Figura 2. Entretanto, conduz a um aumento do consumo de energia do processo, devido a uma maior polarização do catodo, como é observado na Figura 7, que mostra as variações de potencial catódico com o tempo de eletrólise para os ensaios mostrados na Figura 6. Este fato foi atribuído a uma maior turbulência entre os eletrodos, causada pela maior geração de gases

(hidrogênio no catodo e oxigênio no anodo) e pelo aumento da taxa de geração de  $CN^-$  na superfície do catodo, ocasionado pela maior taxa de remoção de cobre.



**Figura 6.** Influência da vazão da solução nas eficiências de remoção de cobre, para soluções contendo  $0,2 \text{ mol/L}$  de  $K_2SO_4$ ,  $10^{-2} \text{ mol/L}$  de  $NaOH$ ,  $5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$  de  $CN^-$  como  $NaCN$  e  $3,15 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$  de  $Cu$  como  $CuCN$  nas seguintes condições:  $3A$  e  $50^\circ C$ . Linha tracejada:  $0,50 \text{ mL/s}$ ; linha contínua:  $0,37 \text{ mL/s}$ . No gráfico,  $C$  significa a concentração no tempo  $t$ , e  $Co$  no tempo  $t = 0$ .



**Figura 7.** Variações do potencial catódico com o tempo de eletrólise em diferentes vazões, nos testes apresentados na Figura 6. (A)  $0,50 \text{ mL/s}$  e (B)  $0,37 \text{ mL/s}$ .

Como foi analisado, o aumento de temperatura facilita a deposição de cobre a partir de seus complexos, devido a um aumento do potencial do par  $Cu(I)/Cu$ . Por outro lado, o aumento de vazão eleva a taxa de recuperação de cobre, contribuindo, no entanto, para o aumento do consumo energético do processo. A Tabela 2 apresenta resultados significativos obtidos para os teores finais de cobre e cianeto livre, após um ajuste cuidadoso das diversas variáveis do processo (tempo, corrente, vazão e temperatura).

**Tabela 2.** Influência da corrente no processo de eletrorrecuperação de cobre, para soluções contendo 0,2 mol/L de  $K_2SO_4$ ,  $10^{-2}$  mol/L de NaOH,  $5 \times 10^{-3}$  mol/L de  $CN^-$  como NaCN e  $3,15 \times 10^{-3}$  mol/L de Cu como CuCN. Condições: 0,50 mL/s e 50°C.

	Tempo (h)	Tensão cél. (V)	Eficiência de corrente após 3h (%)	Consumo energético esp. após 3h (kWh/kg)	Concentração de cobre (mg/L)
1A	0,0	2,03	1,00	66,68	203
	0,5	2,41			174
	1,0	1,27			104
	1,5	1,38			80
	2,0	1,33			51
	2,5	1,31			28
	3,0	1,32			15
	Tempo (h)	Tensão cél. (V)	Eficiência de corrente (%)	Consumo energético esp. (kWh/kg)	Concentração de cobre (mg/L)
1,5A	0,0	2,15	0,00	0,00	201
	0,5	2,47	2,19	44,42	162
	1,0	2,50	3,65	27,38	71
	1,5	2,48	3,34	30,34	23
	2,0	2,48	2,70	37,75	9
	2,5	2,45	2,24	45,63	2
	3,0	2,48	1,88	54,59	0,7
	Tempo (h)	Tensão cél. (V)	Eficiência de corrente (%)	Consumo energético esp. (kWh/kg)	Concentração de cobre (mg/L)
2A	0,0	2,32	0,00	0,00	201
	0,5	2,54	1,98	51,70	154
	1,0	2,57	3,14	33,24	52
	1,5	2,58	2,60	40,58	16
	2,0	2,53	2,09	50,67	3
	2,5	2,49	1,69	62,53	0,7
	3,0	2,53	1,41	74,92	< 0,5

Uma estimativa do consumo energético que tornasse o processo economicamente vantajoso foi realizada, considerando-se a cotação do preço do cobre na bolsa de metais de Londres,<sup>(10)</sup> \$7060,00/t, o valor do dólar comercial em 31 de outubro de 2006, como \$1,00 = R\$2,14,<sup>(11)</sup> e o preço do kWh industrial cobrado pela Light,<sup>(12)</sup> R\$ 0,2013, chegando-se ao resultado de 75,12 kWh/kg de cobre recuperado.

Portanto, nas condições dos ensaios apresentados na Tabela 2 alcançou-se o padrão de descarte estabelecido pelo CONAMA para o cobre, com as correntes de 1,5 e 2A, obtendo-se um consumo energético específico vantajoso, tomando como base a cotação do preço do cobre. Já os teores de cianeto livre ao final dos processos foram iguais a 0,08 mg/L, em todos os casos (1, 1,5 e 2A). Cabe aqui mencionar que o processo também propicia uma economia substancial de reagentes usados na degradação do cianeto, além de eliminar a geração de lamas metálicas tóxicas.

No caso do ensaio com 1A, ocorreu uma grande geração de óxidos de cobre no anodo (estimados em 115 mg, após pesagem do catodo antes e depois do processo de eletrorrecuperação), na forma de um revestimento preto, que como foi mencionado funciona com um catalisador da reação de oxidação de cianeto. Como a maior parte do cobre foi depositada no anodo no ensaio com 1A, a eficiência de corrente catódica e o consumo energético específico deste ensaio só puderam ser calculados após as 3 horas de eletrólise, considerando-se a massa depositada no

catodo ao final do processo (71 mg). Nos ensaios com 1,5 e 2A também observou-se a geração de óxidos de cobre no anodo, porém em pequena quantidade (estimados em 25 mg, em ambos os casos).

#### 4 CONCLUSÕES

O processo proposto mostrou-se interessante para o tratamento de efluentes cianídricos diluídos, obtendo-se bons resultados para os teores finais de cobre e cianeto livre, sendo o processo ainda vantajoso economicamente.

O cobre se deposita, nas condições utilizadas nos ensaios na célula eletrolítica (200 ppm de Cu e 130 ppm de  $\text{CN}^-$ ), num potencial ligeiramente inferior a  $-1350$  mV vs. ECS, a partir do complexo  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ , e num potencial aproximadamente igual a  $-1400$  mV vs. ECS, a partir do complexo  $\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$ .

O aumento de temperatura facilita a deposição de cobre, pois aumenta o potencial do par  $\text{Cu(I)}/\text{Cu}$ . Já um aumento de vazão eleva a taxa de remoção de cobre, contribuindo, porém, para um aumento do consumo energético do processo.

A oxidação de cianeto livre, nas condições utilizadas neste trabalho, acontece em um potencial de  $0,94$  V vs. ECS, e a formação de óxidos de cobre no anodo acontece em um potencial de aproximadamente  $0,85$  V vs. ECS.

Para uma temperatura de  $50^\circ\text{C}$  e vazão igual a  $0,37$  mL/s, após três horas de eletrólise, obtiveram-se, para os teores finais de cobre e cianeto livre,  $0,7$  mg/L e  $0,08$  mg/L, respectivamente, para uma corrente de  $1,5\text{A}$ , e menor que  $0,5$  mg/L e  $0,08$  mg/L, respectivamente, para uma corrente de  $2\text{A}$ .

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- 1 CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução de N<sup>o</sup> 357, de 17 de março de 2005, Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Visitado em 12/11/2005.
- 2 NATIONAL METAL FINISHING CENTER. Disponível em: <<http://www.nmfr.org.br>>. Visitado em 12/7/2006.
- 3 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT NBR: 10004. ABNT, Rio de Janeiro, 2004.
- 4 DUTRA, A. J. B., SOBRAL, L. G. S., LEMOS, F. L., SANTOS, F. H. S. O processo eletroquímico como alternativa para o tratamento de efluentes cianídricos. Revista Escola Minas, v. 55, p. 272-282, 2004.
- 5 LEMOS, F. A., SOBRAL, L. G., DUTRA, A. J. B. Copper electrowinning from gold plant waste streams. Minerals Engineering, v. 19, p. 388-398, 2006.
- 6 SZPYRKOWICK, L., KELSALL, G. H., SOUTO, R. M., RICCI, F., KAUL, S. N. Hydrodynamic effects on the performance of an electrochemical reactor for destruction of copper cyanide – Part 1: in situ formation of the electrocatalytic film. Chemical Engineering Science, v. 60, p. 523-533, 2005a.
- 7 CHENG, S. C., GATTREL, M., GUENA, T., MACDOUGALL, B. The electrochemical oxidation of alkaline copper cyanide solutions. Electrochimica Acta, v. 47, p. 3245-3256, 2002.

- 8 SZPYRKOWICK, L., KELSALL, G. H., SOUTO, R. M., RICCI, F., KAUL, S. N. Hydrodynamic effects on the performance of an electrochemical reactor for destruction of copper cyanide – Part 2: reactor kinetics and current efficiencies. *Chemical Engineering Science*, v. 60, p. 535-543, 2005b.
- 9 LU, J., DREISINGER, D. B., COOPER, W. C. Thermodynamics of the aqueous copper-cyanide system. *Hydrometallurgy*, v. 66, p. 23-36, 2002.
- 10 LONDON METAL EXCHANGE. Disponível em <<http://www.lme.co.uk>>. Visitado em 12/11/2006.
- 11 O GLOBO ONLINE. Disponível em <<http://www.oglobo.globo.com>>. Visitado em 18/11/2006.
- 12 LIGHT. Disponível em <<http://lightempresas.com.br>>. Visitado em 18/11/2006.