



EMPREGO DE TELAS DE AÇO INOXIDÁVEL 304 E TITÂNIO COMO CATODOS PARA RECUPERAÇÃO DE METAIS DE EFLUENTES DE CIANÍDRICOS DE MINERAÇÃO DE OURO¹

Achilles Junqueira Bourdot Dutra²
Flávio de Almeida Lemos³

Resumo

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre telas de aço inoxidável e de titânio, como catodo, com vistas no desempenho energético e nas taxas de remoção de metais. Foram empregadas ferramentas estatísticas visando à identificação das variáveis significativas no processo de recuperação eletrolítica de ouro, prata e cobre e oxidação do cianeto de efluentes da mineração de ouro. Para uma solução sintética contendo respectivamente 0,5 mg/L de ouro, 7,5 mg/L de prata, 150mg/L de cobre e 150 mg/L de cianeto livre, empregando-se catodos de aço inoxidável após 180 minutos de eletrólise, foram obtidas remoções de cobre e prata em torno de 99,6% e 95,5%, respectivamente, além da completa remoção do ouro. Com catodos de titânio, nas mesmas condições, a recuperação de cobre foi de 99,3%, além da completa remoção do ouro e da prata. Em ambos os casos, a oxidação de cianeto ficou próxima a 99%. O consumo energético específico médio obtido com o catodo de titânio foi de 66,19 kWh/kg de metal, enquanto que com o de aço inoxidável foi de 88,29 kWh/kg.

Palavras-chave: Cianeto; Cobre; Efluentes; Processo eletrolítico.

USE OF 304 STAINLESS STEEL AND TITANIUM MESHES AS CATHODES FOR RECOVERY OF METALS FROM GOLD MINING CYANIDE EFFLUENTS

Abstract

This paper presents a comparative study between stainless steel and titanium meshes to be used as cathodes, aiming at high metal recovery rates and good energetic performance. Statistical tools were used in order to identify the significant variables in the electrolytic recovery of gold, silver and copper and cyanide oxidation from gold mining wastewaters. For a synthetic solution containing respectively 0.5 mg/L gold, 7.5 mg/L silver, 150 mg/L copper and 150 mg/L free cyanide, after 180 minutes of electrolysis, using stainless steel cathodes copper and silver removals of 99.6% and 95.5%, respectively, were obtained besides the complete removal of gold. With titanium cathodes under the same conditions, the copper recovery was 99.3%, and the complete removal of gold and silver were obtained. In both cases, the oxidation of cyanide was close to 99%. The average specific energy consumption obtained for the titanium cathode was 66.19 kWh/kg of metal, while for stainless steel as 88.29 kWh/kg.

Key words: Cyanide; Copper; Effluents; Electrochemical process.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, adutra@metalmat.ufrj.br.

³ D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, lemos@metalmat.ufrj.br.



1 INTRODUÇÃO

O cianeto é considerado um dos compostos mais tóxicos para a espécie humana e para a natureza.⁽¹⁾ Anualmente cerca de um milhão de toneladas de cianeto são produzidas globalmente, sendo utilizado em diversas atividades industriais, tais como o processamento de minerais, extração de ouro e prata (a partir de seus minérios), produção de aço, indústria têxtil e a indústria automobilística.⁽²⁾

A geração contínua de grandes volumes de efluentes cianídricos, provenientes de diversas indústrias, mostra ser pertinente o desenvolvimento de novas tecnologias para o abatimento do referido contaminante.⁽³⁾

O processo de cianetação vem sendo largamente empregado pela mineração de ouro por mais de um século. A escassez de minérios contendo elevados teores de ouro tem levado ao processamento de materiais contendo uma quantidade maior de contaminantes tais como cobre, zinco, mercúrio, ferro e níquel que tornam mais complexos os processos de tratamento de efluentes.⁽⁴⁾

O tratamento de efluentes gerados no processo de cianetação de minérios de ouro e prata é um dos maiores problemas da indústria de mineração de metais preciosos. Esses efluentes apresentam elevadas concentrações de cianeto livre e de ciano-complexos metálicos. Uma diversidade de métodos tem sido proposta para o tratamento dessas águas residuais, muitos deles envolvendo o consumo elevado de reagentes químicos, desta forma, tornando os custos operacionais proibitivos.

De uma forma simplificada, os efluentes gerados nas minerações de ouro apresentam três formas de compostos cianídricos: cianeto livre, cianeto ácido levemente dissociado (WAD) e cianeto ácido fortemente dissociado (SAD). Há, naturalmente, outros compostos derivados do cianeto que estão presentes nas águas residuais tais como cianato, tiocianato. O cianeto livre pode ser facilmente oxidado por degradação natural, mas o mesmo não se pode afirmar de alguns complexos cianídricos. Alguns pesquisadores atribuem que mortalidades de espécies silvestres, ocorridas próximas a bacias de rejeitos de minas de ouro se devem a presença de ciano-complexos metálicos.⁽⁵⁾

O processo ou combinação de processos de tratamento de efluentes, selecionados por uma empresa de mineração, deve ser confiável e flexível o suficiente para manter os padrões dos efluentes descartados nos corpos receptores dentro das faixas estabelecidas pelas agências reguladoras. Isso deve acontecer tanto ao longo do período de operação como após a desativação das atividades de mineração.⁽⁶⁾

Dentre as diversas tecnologias citadas na literatura para o tratamento de efluentes cianídricos, a degradação natural é o processo mais empregado pelas minerações de ouro. Nesta rota, cerca de 90% dos íons de cianeto são removidos da solução por meio da volatilização do HCN.⁽⁶⁾ Apesar da degradação natural apresentar um baixo custo, requer grandes áreas e um rigoroso gerenciamento das barragens de efluentes, além de ser efetiva somente para cianeto livre e cianetos que estão fracamente ligados a metais.⁽⁷⁾

Atualmente são empregados diversos procedimentos para o tratamento de efluentes cianídricos. Nos processos oxidativos os reagentes mais comumente empregados para a destruição do cianeto são o cloro, hipoclorito, peróxido de hidrogênio, ozônio, dióxido de enxofre e bissulfito de amônio. A cloração alcalina apesar de adequada apresenta desvantagens tais como: custos elevados dos reagentes químicos, formação de cianogênio, possibilidade de formação de compostos organoclorados e a decomposição incompleta de alguns complexos metálicos de cianeto. O peróxido de hidrogênio apesar de eficiente tem sua ação reduzida na presença de íons de



tiocianato (SCN⁻). O emprego do ozônio para oxidação de cianeto não é tão efetivo em valores de pH acima de 11 devido à sua decomposição pelos íons de hidroxila. Os processos envolvendo o emprego de dióxido de enxofre e bissulfito requerem a adição de óxido de cálcio para o controle do pH o que resulta na geração de quantidades significativas de resíduos sólidos.⁽⁸⁾

Apesar do baixo custo operacional do processo de degradação biológica do cianeto, os parâmetros mais críticos associados a esta rota incluem o pH, temperatura, níveis de oxigênio e disponibilidade de nutrientes.⁽⁹⁾

A Tabela 1 classifica os processos mais usuais utilizados no tratamento de efluentes cianídricos de acordo com os seus princípios de atuação.

Tabela 1. Processos mais empregados no tratamento de efluentes cianídricos⁽¹⁰⁾

Princípios	Métodos de Tratamento
Físicos	Diluição, membranas (eletrodialise, osmose reversa) e hidrólise/destilação
Complexação	Acidificação/Volatilização/Reneutralização (AVR), adição de Metal, Flotação e Extração por Solvente
Adsorção	Resinas, Carvão Ativado e Minerais (ilmenita, hematita, pirita, carvão e zeólitas)
Oxidação	Química (cloro, hipoclorito, ozônio, peróxido de hidrogênio, dióxido de enxofre, bissulfito de amônio e ácido de Caro (H ₂ SO ₅), Eletrolise (direta e geração de Cl ₂ "in situ"), Bio-oxidação, Fotólise.

Existe uma forte resistência para a implantação da tecnologia eletroquímica no tratamento de efluentes industriais, mesmo em empresas que utilizam esta técnica em suas linhas de produção. Usualmente são preferidas técnicas convencionais que geram quantidades significativas de resíduos sólidos contendo metais pesados.

A rota eletroquímica é potencialmente atrativa para o tratamento de efluentes cianídricos, uma vez que evita a estocagem e manuseio de grandes quantidades de agentes oxidantes, tais como cloretos e peróxido de hidrogênio. Além de apresentar um tempo de reação relativamente curto e poder ser realizada em unidades compactas e modular, além de não gerar resíduos sólidos.⁽¹¹⁾

O emprego do processo de oxidação eletrolítico do cianeto, aplicado como uma alternativa em lugar do processo tradicional de oxidação química vem sendo estudado desde meados de 1970.⁽¹²⁾

A literatura cita dois métodos para o tratamento eletrolítico de efluentes contendo cianeto. O método denominado de indireto se baseia na adição de cloreto de sódio à solução e, conseqüente, liberação *in situ* de hipoclorito. Esta técnica é recomendada para tratamento de efluentes com concentrações de cianeto inferiores a 500 mg/L. O segundo método, designado de oxidação direta dos íons cianeto é adequado para soluções com concentrações elevadas de cianeto, acima de 1.000 mg/L⁽¹³⁾

Uma análise comparativa de custos de operação e de capital, entre o método tradicional de oxidação química de cianeto empregando cloro e o processo eletroquímico, foi realizada por Zhou e Chin.⁽¹⁴⁾ Esses pesquisadores concluíram que o custo operacional do processo eletrolítico de oxidação de cianeto foi 82,56% menor que o processo de oxidação química, devido ao fato desta última rota apresentar um elevado consumo de reagentes químicos e complexidade no manuseio e disposição dos resíduos sólidos gerados.



A utilização do aço inoxidável como eletrodo em processos eletrolíticos tem sido largamente descrita na literatura.⁽¹⁵⁾ Contudo, o titânio revestido com óxidos, geralmente de rutênio, irídio ou tântalo, vem sendo mais empregado como anodo dimensionalmente estável (DSA). Em virtude da menor densidade de corrente de troca do titânio, em comparação com a do ferro, para a reação de geração de hidrogênio⁽¹⁶⁾, espera-se obter melhores eficiências de corrente para deposição dos metais empregando catodos de titânio, uma vez que a geração de hidrogênio é a principal reação paralela associada à obtenção de metais a partir de soluções diluídas.

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre telas de aço inoxidável e de titânio, para serem empregadas como catodos, com vistas ao desempenho energético e taxas de remoção de metais contidos em efluentes cianídricos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Todas as soluções utilizadas nos ensaios eletrolíticos foram preparadas com reagentes químicos de elevada pureza e água bi-distilada.

As soluções de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ e $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ foram obtidas a partir da solubilização dos metais puros em água régia, seguida de etapas de purificação, com o intuito de obter pós-metálicos que, posteriormente, foram submetidos ao processo de cianetização com NaCN. A solução de ciano-complexo de cobre foi preparada pela dissolução de CuCN em NaCN. Foram realizadas misturas das soluções de forma que fosse obtido um efluente sintético contendo 150 mg/L de cobre, 7,5 mg/L de prata, 0,5 mg/L de ouro e 150 mg/L de cianeto livre, respectivamente.

As determinações das concentrações dos metais foram realizadas em espectrofotômetro de absorção atômica de marca Shimadzu, modelo AA-6800. As amostras para determinação de cianeto total foram previamente destiladas e as leituras das concentrações efetuadas em um cromatógrafo de íons modular de marca Metrohm.

O reator eletrolítico empregado neste trabalho foi confeccionado em acrílico, tendo sido projetado para utilizar telas metálicas superpostas como eletrodo. O reator pode ser classificado como uma célula de placas paralelas, monopolar, com convecção forçada e fluxo pistonado turbulento, operando em regime de batelada com recirculação.

A tela de titânio foi confeccionada a partir de chapa com espessura de 0,15 mm, com composição química compatível com a classificação de grau 2. O material foi submetido aos processos de expansão e laminação visando obter malhas com dimensões de 1,50 x 2,00 mm. Por ser um material de uso mais corriqueiro, a tela de aço inoxidável de 65 mesh foi adquirida diretamente de loja especializada no comércio de aços especiais.

Os ensaios eletrolíticos foram conduzidos em regime de batelada, com recirculação do volume da célula, empregando 1,9 litros de eletrólito. O sistema continha um reservatório de vidro, o qual se encontrava posicionado sobre um agitador magnético provido de aquecimento da marca Ika, modelo RH basic KT/C, que promovia a homogeneização e ajuste da temperatura do eletrólito.

A corrente foi fornecida por uma fonte de alimentação da marca Icel – Manaus, modelo PS 6100. Os potenciais catódicos e anódicos foram monitorados continuamente usando um eletrodo de referência de calomelano saturado da marca Sensoglass, modelo SR 07, o qual foi inserido em um capilar de Luggin, localizado na parte superior do reator.

A liga de Au-Ag-Cu depositada tanto no catodo de aço inoxidável como no de titânio foi removida pela imersão das telas em solução 0,3 M de ácido nítrico. Após esta operação, as peças foram inicialmente lavadas exaustivamente em água corrente, seguida da lavagem com água destilada. Por não ter sido detectado depósito de óxido de cobre nos anodos, estes foram lavados somente com água corrente e destilada.

No presente estudo foi realizado um planejamento fracionado 2^{6-1} somado a quatro réplicas no ponto central, totalizando 36 ensaios para cada tipo de material. Neste planejamento houve apenas uma relação geradora, sendo que os efeitos principais só se misturaram com os efeitos de 4^o ordem. Desta forma, a informação dos efeitos principais das variáveis em relação à resposta obtida foi praticamente igual à atingida com um delineamento completo.⁽¹⁷⁾ As variáveis dependentes e os níveis superior e inferior pode ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis independentes e níveis empregados no planejamento experimental

Variáveis Independentes	Nível Inferior	Nível Superior
Área catódica (m ²)	0,0911	0,2278
Área anódica (m ²)	0,0786	0,1572
Potencial catódico (mV vs ECS)	-1600	-1800
Vazão do eletrólito (m ³ /h)	0,001	0,01
Temperatura do eletrólito (°C)	40	60
Concentração de CN ⁻ inicial (mg/L)	50	150

3 RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a imagem do depósito catódico obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a respectiva análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A ausência de ouro no espectro se deve ao fato do limite de detecção ser de 1,0%.

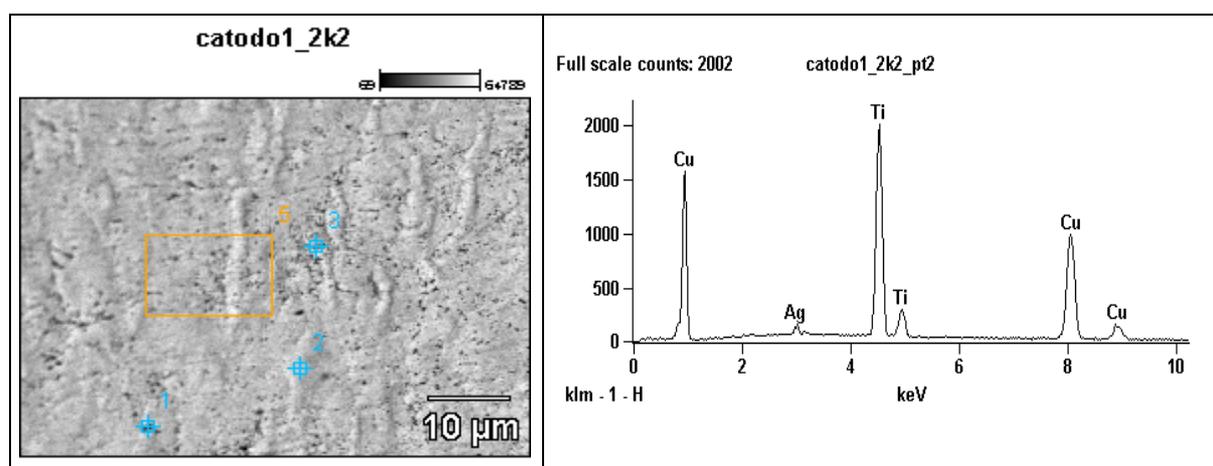


Figura 1: Imagem do depósito catódico e composição qualitativa da liga.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados obtidos nas recuperações de cobre, ouro e prata, além da remoção do cianeto, da solução cianídrica sintética após 180 minutos de eletrólise, utilizando telas de aço inoxidável e titânio, respectivamente. Os resultados alcançados indicaram ser possível atingir elevadas recuperações tanto dos metais como na oxidação do cianeto, comprovando a

viabilidade técnica do emprego da rota eletroquímica para o tratamento de efluentes cianídricos.

Tabela 3: Recuperações de metais e remoção de cianeto após 180 minutos de eletrólise empregando telas de aço inoxidável como catodo

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Recuperação de cobre (%)	99,6	97,5	100	0,7
Recuperação de ouro (%)	100	100	100	0,0
Recuperação de prata (%)	95,5	91,1	100	2,8
Remoção de cianeto (%)	99,1	90,5	99,9	2,6

Tabela 4: Recuperações de metais e remoção de cianeto após 180 minutos de eletrólise empregando telas de titânio como catodo

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio
Recuperação de cobre (%)	99,3	97,2	100	0,9
Recuperação de ouro (%)	100	100	100	2,5
Recuperação de prata (%)	100	100	100	0,0
Remoção de cianeto (%)	99,6	89,1	99,9	3,3

Os cálculos das eficiências de corrente foram baseados na deposição do cobre, visto ser o metal com a maior concentração da solução, além de formar os ciano-complexos com os menores potenciais de redução.

Os decaimentos das eficiências de corrente em função do tempo de eletrólise foram exponenciais tanto para o aço inoxidável como para o titânio. Entretanto, para o caso de titânio a eficiência de corrente foi sempre superior à obtida com o catodo de aço inoxidável, como na visto na Figura 2.

A Figura 3 apresenta os níveis do potencial catódico e área catódica que maximizam a eficiência de corrente para deposição de cobre após 180 minutos de eletrólise. Conforme esperado, menores potenciais catódicos, que diminuem a geração de hidrogênio, e áreas catódicas mais reduzidas permitiram a obtenção de valores mais elevados de eficiência de corrente para ambos os materiais empregados. Também pode ser visto o melhor desempenho das telas de titânio em relação às de aço inoxidável.

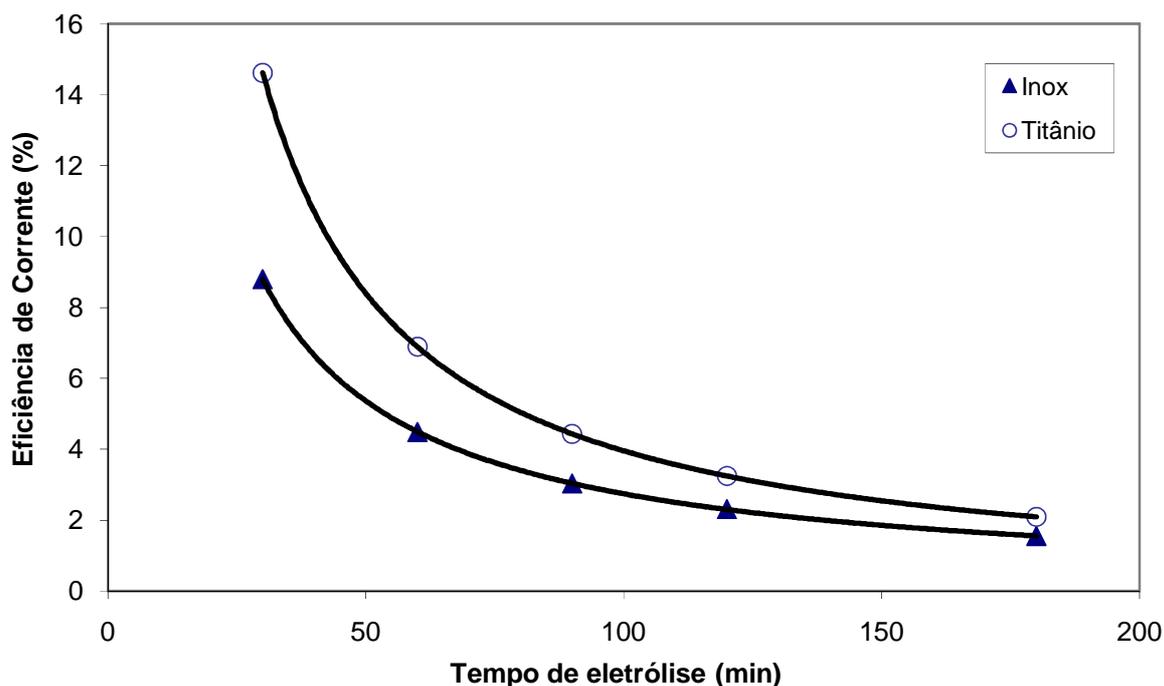


Figura 2. Eficiência de corrente para deposição de cobre em função do tempo de eletrólise.

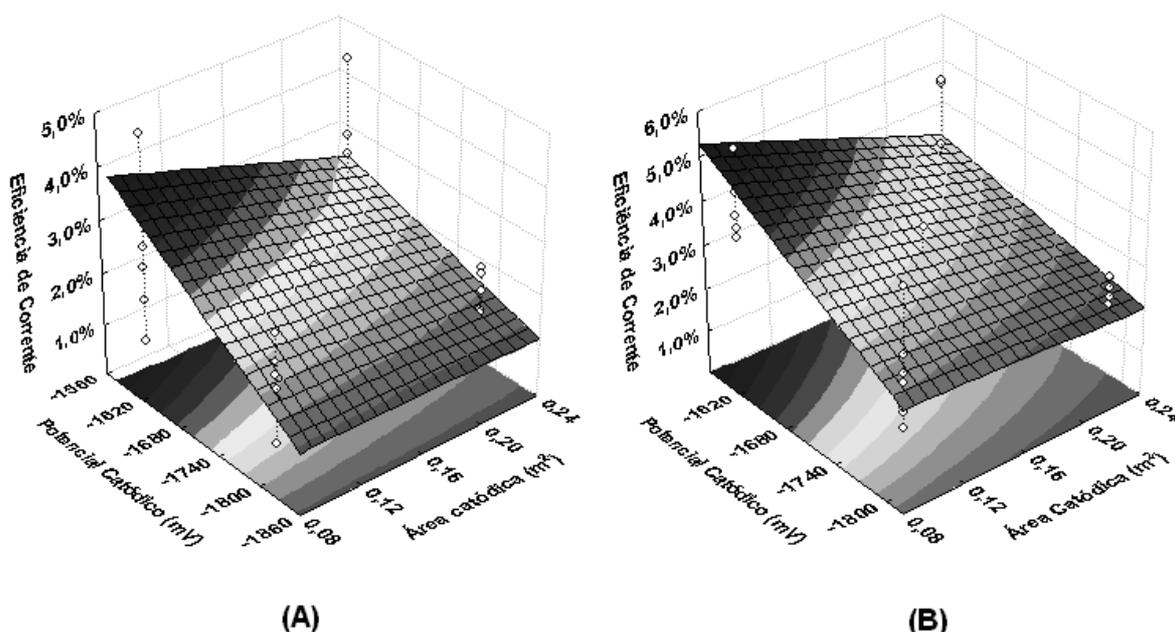


Figura 3. Superfícies de respostas para a eficiência de corrente em função do potencial catódico e área catódica empregando telas de aço inoxidável (A) e de titânio (B).

A Figura 4 apresenta a evolução do consumo energético específico para a deposição de Au-Ag-Cu ao longo do tempo de eletrólise. O crescimento deste parâmetro seguiu uma função linear para ambos os materiais empregados. Para um período de 180 minutos de deposição, as telas de titânio apresentaram um consumo energético 25% inferior ao obtido com as telas de aço inoxidável.

O diagrama de Pareto para a oxidação do cianeto pode ser visto na Figura 5. Os resultados obtidos indicaram que as variáveis significativas foram a área anódica e a vazão do eletrólito, e que a elevação desses dois parâmetros favoreceu a



degradação do cianeto. Dentro dos parâmetros escolhidos para o estudo, a concentração inicial de cianeto livre e a temperatura do eletrólito não afetaram de forma relevante a oxidação de cianeto.

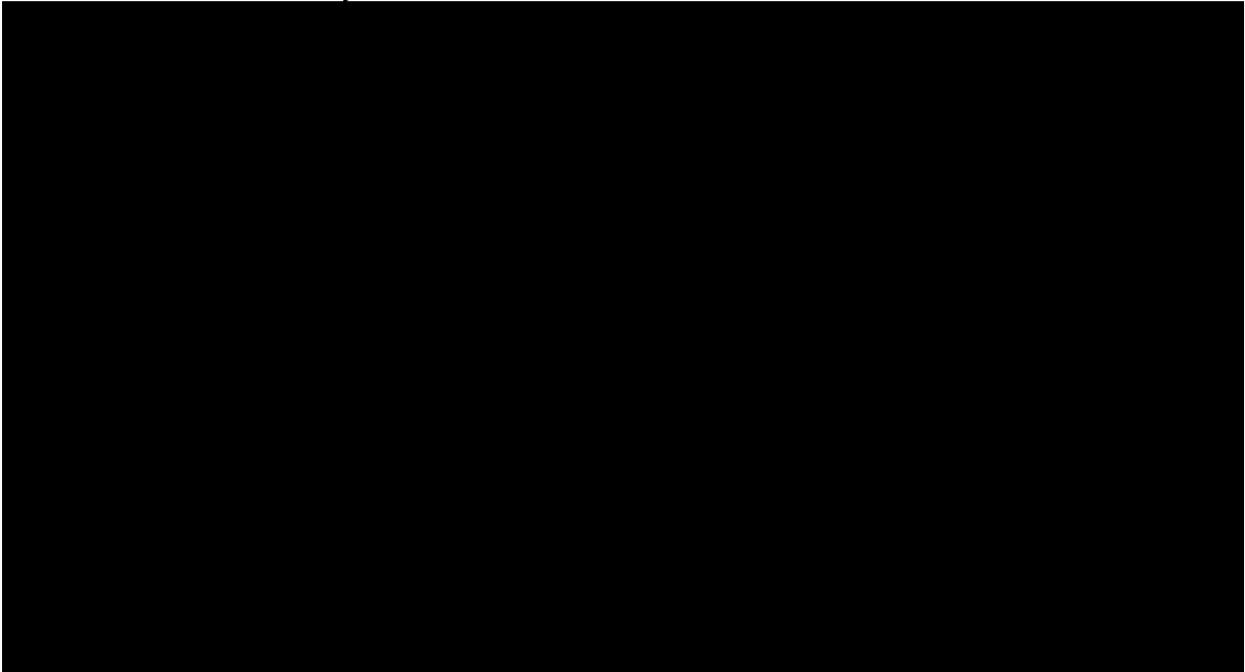


Figura 4. Variação do consumo energético específico para deposição de liga de Au-Ag-Cu em função do tempo de eletrólise

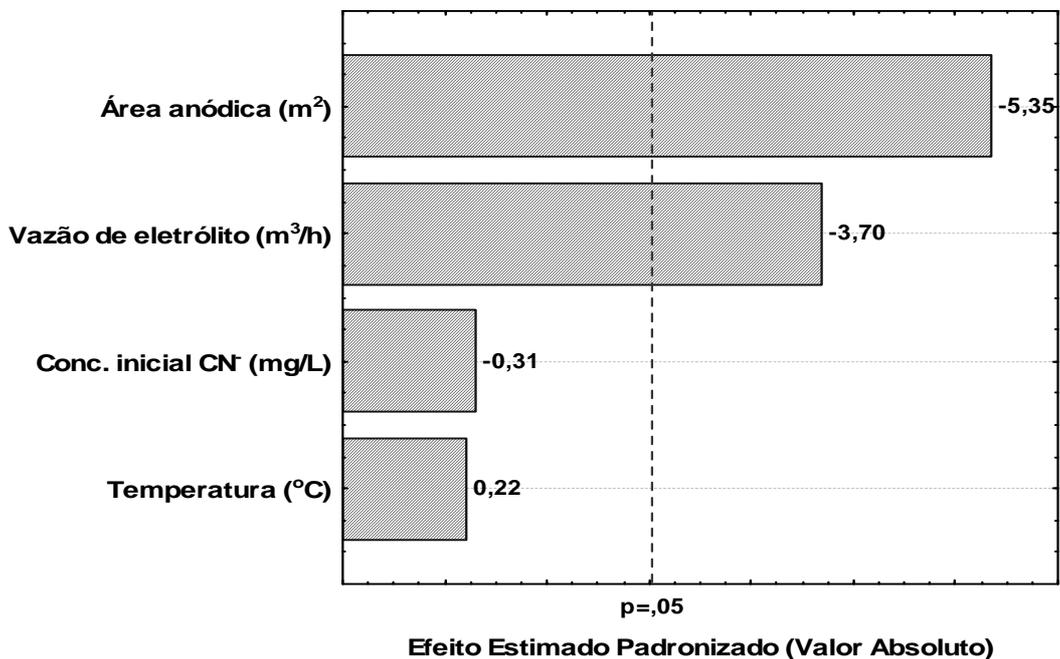


Figura 5. Diagrama de Pareto para degradação de cianeto empregando anodos de titânio revestidos com RuO₂, após 180 minutos de eletrólise.

4 DISCUSSÃO

Um diferencial do presente estudo foi o emprego de soluções cianídricas sintéticas com composições similares aos efluentes gerados na metalurgia extrativa do ouro.



Este fato acarretou a obtenção de elevados consumos energético específicos, por se tratarem de efluentes diluídos.

Baseado no valor de R\$ 237,92/MW, tarifa média da energia elétrica do mês de fevereiro de 2010, estabelecida para o setor industrial brasileiro⁽¹⁸⁾ e nos resultados obtidos neste estudo, o gasto com a energia para o tratamento do efluente cianídrico seria de R\$ 2,49/m³ empregando telas de titânio e R\$ 3,31/m³ para as telas de aço inoxidável. Cabe salientar, que nestes valores não estão incluídas as receitas obtidas com a recuperação dos metais, o que tornaria a rota eletroquímica superavitária.

Um estudo de caso para a estimativa dos custos de diversos processos de regeneração e degradação de cianeto foi realizado por Adams e Lloyd⁽¹⁹⁾ para um efluente contendo uma concentração de 605 mg/L de CN_{TOTAL}. Os processos que empregaram sulfato ferroso, SO₂/ar (Processo Inco) e peróxido de hidrogênio apresentaram os menores custos específicos do efluente tratado, R\$ 0,50, R\$ 1,14 e R\$ 2,11, respectivamente. Enquanto, que os tratamentos que utilizaram sulfito de sódio/ar (R\$ 4,41/m³), ácido de Caro (R\$ 5,59/m³) e metabissulfito de sódio (R\$ 6,30/m³) apresentaram custos significativamente mais elevados.

Para a completa degradação do cianeto de um efluente contendo 580 mg/L de CN_{TOTAL}, Zhou e Chin⁽¹⁴⁾ obtiveram consumos energéticos específicos entre 80 a 340 kWh/kg de cianeto, o que representaria um custo por efluente tratado entre R\$ 11,09 a R\$ 47,17/m³, valor bem acima ao obtido no presente estudo.

Comparando os resultados obtidos para degradação eletroquímica do cianeto com outras técnicas usualmente empregadas, pôde-se verificar que eles foram compatíveis com os alcançados por Kepa *et al.*⁽²⁰⁾, que utilizaram o sistema peróxido de hidrogênio/ozônio no tratamento de soluções cianídricas.

Na literatura podem ser encontrados trabalhos que apresentaram melhores resultados para o consumo energético específico para deposição de cobre ou ligas de Au-Ag-Cu, como por exemplo: Dutra *et al.*⁽²¹⁾ obteve 11 kWh/kg Cu para tratar um efluente contendo 26 g/L de cobre e 27 g/L de cianeto e Szpyrkowicz *et al.*⁽²²⁾ que conseguiram consumos de 34,5 kWh/kg Cu e 30,4 kWh/kg Cu, para a recuperação de cerca de 95% sendo utilizado anodos de aço inoxidável e Ti/Pt do cobre e uma solução com concentração de Cu⁺ de 650 mg/L. Porém cabe salientar que nesses dois casos, as concentrações de ciano-complexo de cobre foram significativamente maiores que as empregadas no presente estudo.

A recuperação eletroquímica de ouro prata e cobre em meio cianídrico também foi estudada por Spitzer e Bertazzoli.⁽²³⁾ O efluente empregado foi gerado na indústria de joalheria e as concentrações de CN_{TOTAL}, Au, Ag e Cu foram de 721 mg/L, 140 mg/L, 4 mg/L, 6 mg/L e 617 mg/L, respectivamente. Como este estudo visava à recuperação seletiva de ouro e prata, o potencial catódico foi mantido em torno de -140 mV (ECS). O consumo energético específico foi de apenas 2,9 kWh/kg de liga. Contudo, as recuperações de Au, Ag e Cu foram de apenas 38%, 10% e 58%, respectivamente.

Ao contrário do trabalho de Reyes-Cruz *et al.*⁽²⁴⁾ que utilizou um baixo potencial catódico, -1400 mV (ECS) e cerca de 10 minutos de eletrólise, visando à recuperação seletiva de ouro e prata na presença de ciano-complexos de cobre, no presente trabalho foram empregados potenciais catódicos acima de -1600 mV (ECS) visando maximizar a recuperação dos metais e a oxidação completa do cianeto. Cabe salientar que os pesquisadores citados acima obtiveram recuperações de ouro entre 18% a 26% e de prata entre 32% a 48%. Os referidos pesquisadores⁽²⁵⁾



concluíram que as recuperações de ouro e prata ocorreram nos primeiros 15 minutos de eletrólise, fato também verificado neste estudo.

5 CONCLUSÃO

- 1) Os resultados obtidos mostraram que, o consumo energético específico para a deposição de uma liga de Au-Ag-Cu empregando telas de titânio foi 25% menor quando comparado ao consumo alcançado com tela de aço inoxidável após 180 minutos de eletrólise, nas mesmas condições operacionais.
- 2) O processo eletroquímico apresentou elevadas eficiências tanto para as recuperações dos metais, como para a oxidação do cianeto após 180 minutos de eletrólise.
- 3) Os custos operacionais estimados para o processo eletrolítico no tratamento de efluentes cianídricos foram compatíveis com outras técnicas largamente empregadas na indústria, com a vantagem de não empregar grandes quantidades de reagentes químicos e de não gerar resíduos sólidos tóxicos.

Agradecimentos

Ao CNPq, Casa da Moeda do Brasil e Denora do Brasil.

REFERÊNCIAS

- 1 YEDDOU, A. R., NADJEMI, B., HALET F., OULD-DRIS A., CAPART, R., "Removal of cyanide in aqueous solution by oxidation with hydrogen peroxide in presence of activated carbon prepared from olive stones", *Minerals Engineering*, v.23 pp. 32–39, 2010.
- 2 MUDLIAR, R., UMARE S.S., RAMTEKEA D.S., WATE S.R., "Energy efficient—Advanced oxidation process for treatment of cyanide containing automobile industry wastewater", *Journal of Hazardous Materials* v. 164, pp. 1474–1479, 2009.
- 3 DASH R. R., GAUR, A., BALOMAJUMDERB, C., "Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A review on biotreatment", *Journal of Hazardous Materials*, v.163, pp. 1–11, 2009.
- 4 GÖNEN, N., KABASAKAL O.S., ÖZDIL, G., "Recovery of cyanide in gold leach waste solution by volatilization and absorption", *Journal of Hazardous Materials*, v.113, pp. 231–236, 2004.
- 5 DONATO, D.B, NICHOLS, O., POSSINGHAM, H., MOORE. M., RICCI, P. F., NOLLER, B. N., "A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife", *Environment International*, v.33, pp.974–984, 2007.
- 6 GOODE, J. R., MC MULLEN, J., WELLS, J. A., THOMAS, K. G., "Cyanide and the environment: Barrick Gold Corporation's perspective", In: *Proceedings of the International Symposium Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects*, pp 257- 270, Louisiana, Feb. 2001.
- 7 ALONSO-GONZÁLEZ, O., NAVA-ALONSO, F., URIBE-SALAS A., "Copper removal from cyanide solutions by acidification", *Minerals Engineering*, v. 22, pp. 324–329, 2009.
- 8 SHARMA, V. K., YNGARD,R. A., CABELLI, D. E., BAUM, J. C., "Ferrate(VI) and ferrate(V) oxidation of cyanide, thiocyanate, and copper(I) cyanide" *Radiation Physics and Chemistry*, v. 77, pp. 761–767, 2008.
- 9 AKCIL, A., "Destruction of cyanide in gold mill effluents: biological versus chemical treatments", *Biotechnology Advances*, v.21, pp. 501– 51, 2003.
- 10 YOUNG, C. A., "Remediation technologies for the management of aqueous cyanide species" In: *Proceedings of the International Symposium Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects*, pp 97-117, Louisiana, Feb. 2001.



- 11 STAVART, A., LEROY, VAN LIERDE, A., "Potential Use of Carbon Felt in Gold Hydrometallurgy", *Mineral Engineering*, v.12 n. 5, pp. 545-558, 1999.
- 12 NAVARRO-FELIX, R. M., LIN, S. W., CASTRO-CECEÑA, A. B., CASCO-CARRETE, J. A., "Cyanide Destruction and Simultaneous Recovery of Copper with an Electrochemical Reactor", *Journal of The Electrochemical Society*, v. 150, pp. 49-154, 2003.
- 13 BAKIR, Ü, ÖGÜTVEREN, Ü, KOPARAL, S., "Removal of Cyanide by Anodic Oxidation for Wastewater Treatment", *Water Research*, v.33, n.8, pp.1851-1856, 1999.
- 14 ZHOU, C. D., CHIN, D. T., "Copper Recovery and Cyanide Destruction with a Plating Barrel Cathode and Packed-bed Anode", *Plating and Surface Finishing*, v.80, n.6, pp.69-78, 1993.
- 15 SZPYRKOWICZ, L., KELSALL, G. H., SOUTO, R. M., RICCI, F., KAULD, S. N., "Hydrodynamic Effects on the Performance of an Electrochemical Reactor for Destruction of Copper Cyanide—Part 1: In situ Formation of the Electrocatalytic", *Chemical Engineering Science*, v. 60, pp. 523 – 533, 2005.
- 16 PLETCHER D. e WALSH, F C., "Industrial Electrochemical" 2^o ed. *Glasgow, Blackie Academic & Professional*, 1993.
- 17 RODRIGUES, M. I., IEMMA, A. F., "Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos. Uma estratégia seqüencial de planejamentos.", *Casa do Pão Editora*, Campinas, 2005.
- 18 ANEEL "Relatório de Consumidores, consumo, receita e tarifa média por região". Disponível em: <http://rad.aneel.gov.br/reportserverSAD>. Acesso em 15 de fevereiro de 2010.
- 19 ADAMS M., LLOYD, V., "Cyanide recovery by tailings washing and pond stripping", *Minerals Engineering*, v. 21, pp. 501–508, 2008.
- 20 KEPA, U., STANCZYK-MAZANEK, E., STEPNIAK, L."The use of the advanced oxidation process in the ozone + hydrogen peroxide system for the removal of cyanide from water", *Desalination*, v.223, pp. 187–193, 2008.
- 21 DUTRA, A.J.B. ROCHA, G.P., POMBO F.R. "Copper recovery and cyanide oxidation by electrowinning from a spent copper-cyanide electroplating electrolyte" *Journal of Hazardous Materials*, v. 152, pp.48–655, 2008.
- 22 SZPYRKOWICZ L., KAUL S.N., MOLGA, E., DEFAVERI, M. "Comparison of the performance of a reactor equipped with a Ti:Pt and an SS anode for simultaneous cyanide removal and copper recovery", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 39, pp. 2132-2139.
- 23 SPITZER M., BERTAZZOLI, R., "Selective electrochemical recovery of gold and silver from cyanide aqueous effluents using titanium and vitreous carbon cathodes" *Hydrometallurgy*, v.74, pp. 233–242, 2004.
- 24 REYES-CRUZ,V., PONCE-DE-LEÓN, C., GONZÁLEZ I., OROPEZA, M.T. "Electrochemical deposition of silver and gold from cyanide leaching solutions", *Hydrometallurgy*, v.65, pp. 187–203, 2002.
- 25 REYES-CRUZ,V., GONZÁLEZ I., OROPEZA, M.T. "Electro-recovery of gold and silver from a cyanide leaching solution using a three-dimensional reactor" *Electrochimica Acta*, v.49, pp. 4417–4423, 2004.