



Estimados colegas:

Con las expectativas del nuevo siglo que comienza, cuya realización dependerá del empeño que pongamos en viabilizarla y los retos y mayores demandas; adelantos científicos y tecnológicos a la par con el surgimiento de materiales y métodos innovadores que requieren estar a la vanguardia en nuestras profesiones, deseamos proveerle como alternativa estos eventos que pretenden desarrollar un programa atractivo, que permita actualizarle en las demandas de su profesión utilizando variadas modalidades, como son mesas redondas, conferencias, cursos cortos, visitas especializadas.

Cordialmente,
Secretaría de Eventos y Concursos
Junta Directiva Nacional

AÑO 1998

Taller sobre Gestión Ambiental en la Construcción
Fecha: 3 y 4 de septiembre
Sede: UNAICC de la Provincia de Villa Clara

Simposio Iberoamericano Calidad y Competitividad
en la Construcción

Fecha: del 13 al 15 de octubre
Sede: UNAICC, La Habana

Tercer Encuentro de Jóvenes Arquitectos e Ingenieros
de la Construcción

Fecha: del 15 al 17 de septiembre
Sede: UNAICC de la Provincia de La Habana

Encuentro por el Cincuenta Aniversario del Primer
Congreso de Arquitectura Cubana

Fecha: del 10 al 12 de noviembre
Sede: UNAICC, La Habana

AÑO 1999

IV Congreso de la UNAICC
Fecha: Mayo

Congreso Iberoamericano sobre Enseñanza de la
Ingeniería y la Agricultura

Fecha: del 12 al 16 de julio
Sede: ISPJAE, La Habana

Congreso Internacional sobre Ciudades Históricas
Fecha: del 21 al 23 de septiembre
Sede: Sancti Spiritus y Trinidad

AÑO 2000

Simposio Internacional sobre Agricultura Sostenible
Fecha: del 10 al 12 de mayo
Sede: UNAICC, La Habana

IV Congreso Internacional sobre el Cemento y el
Hormigón

Fecha: del 18 al 20 de octubre
Sede: UNAICC, La Habana

AÑO 2001

Simposio Internacional sobre Geodesia y Geomecánica
Fecha: del 16 al 18 de mayo
Sede: UNAICC, La Habana

XVI Congreso Latinoamericano de Ingeniería Hidráulica

Fecha: del 15 al 17 de octubre
Sede: Centro de Convenciones Plaza
América, Varadero

AÑO 2002

Para cualquier consulta y comunicación favor de dirigirse a: **UNIÓN NACIONAL DE ARQUITECTOS E INGENIEROS DE LA CONSTRUCCIÓN DE CUBA (UNAICC)**
Humboldt No. 104 esquina a Infanta, El Vedado Zona Postal 4, Ciudad de La Habana, Cuba, Aptdo. Postal 4039
Teléfonos: (537) 79 8357/79 7531 al 33/70 3896 / Fax: (537) 33 3523

Cinética de la lixiviación carbonato-amoniaca del mineral laterítico reducido industrialmente bajo aeración diferenciada

Antonio R. Chang Cardona*
José Israel Rodríguez Domínguez**
Iliá Nikitich Beloglazov***

*Doctor C.T., Profesor Titular del Dpto. de Metalurgia del ISMM de Moa.

** Doctor C.T., Profesor Auxiliar del Dpto. de Metalurgia del ISMM de Moa.

*** Doctor C.T., Profesor Titular del Dpto. de Metalurgia del Instituto de Minas de San Petersburgo, Universidad Técnica, Rusia.

RESUMEN: Se fundamenta un procedimiento para regular las pérdidas de Co por coprecipitación con los OHH en condiciones de elevadas concentraciones de Fe, NH₃ y CO₂ en el licor lixiviante. Este procedimiento involucra al aire, a los potenciales electroquímicos de formación de los OHH y a la composición iónica del licor lixiviante.

Se ofrece una metodología experimental para localizar en tiempo y espacio las pérdidas de cobalto y níquel durante la lixiviación del mineral reducido en un sistema real modelado a escala de banco, además de reportar nuevos datos sobre las constantes de velocidad de oxidación e hidrólisis de los iones de hierro y sus reacciones químicas.

ABSTRACT: A procedure for regulating the cobalt losses due to the coprecipitation of it together with the OHH, in condition of high concentrations of NH₃, CO₂ and Fe in the liquor is developed in this part of the present paper. The air, the electrochemical potentials of the OHH formation as well as the ionic composition of the leaching liquor are included in the procedure.

An experimental methodology is presented to locate both in time and space the Co and Ni losses during the leaching process of reduced ore in a real system, modelling at bench scale. It gives new information about apparent rate constants of oxidation and hydrolysis of the iron ions and their chemistry reactions.

INTRODUCCIÓN

En trabajos anteriores (Chang y otros, 1988; Chang, Rodríguez y Dobrojtov, 1989; Chang, 1989) se aborda la influencia de la velocidad de aeración sobre las extracciones de Co y Ni, y se demuestra la nocividad de fuertes aereaciones para extraer ambos metales, particularmente el Co.

Chang y Bobkovski (1993), y posteriormente Chang, Rodríguez, Bobkovski y Beloglazov (1995) demostraron la posibilidad de convertir la aeración en un importante instrumento para regular las pérdidas de Co por coprecipitación con los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH) que se hidrolizan durante la lixiviación, utilizando los potenciales redox de su formación. Este artículo pretende fundamentar una metodología para localizar en tiempo y espacio las pérdidas de Co y Ni durante la lixiviación del mineral reducido en un sistema real, modelado a escala de banco, además de reportar nuevos datos sobre las constantes de velocidad aparente de oxidación e hidrólisis de los iones de hierro y sus reacciones químicas, así como las constantes de velocidad y las reacciones químicas para la oxidación del Ni y el Co.

Procedimiento experimental

Se modeló el turboaerador de la primera etapa de lixiviación de la empresa de Nicaro, el cual a escala de laboratorio posee una capacidad de 31,4 dm³ y 263 rpm, para lograr la semejanza hidrodinámica. El volumen de pulpa empleado fue de 27 dm³, precalentada a 40 °C aproximadamente. Su relación másica L:S = 6:1. La temperatura de lixiviación osciló alrededor de los 47 °C durante la aeración. Los componentes del licor lixiviante fueron: licor industrial, obtenido después de la precipitación de Co; hidróxido de amonio (25 %); licor carbonato-amoniaca fuerte, obtenido en la planta de recuperación de amoniaco. Se fijó la concentración de NH₃ total entre 85-87 g/dm³ y la relación de concentraciones NH₃/CO₂ = 1,54-1,6. El completamiento del contenido de Ni en el licor alimentado se efectuó disolviendo la cantidad correspondiente por balance material de sulfato de níquel hidratado en parte del volumen de licor. Cuando fue necesario el incremento del contenido de Co, se sustituyó parte del volumen correspondiente al agua destilada por el de una solución concentrada de Co(III) de contenido conocido.

El flujo de aire se midió con un rotámetro de tubo con flotador y se suministró de un compresor industrial, siendo el tiempo de muestreo de 2 y 3 minutos para garantizar la confiabilidad de los resultados al tratarse los valores obtenidos mediante funciones lineales. Las muestras se tomaron

directamente del turboaerador con una pipeta de 100 cm³ y se introdujo en un volumétrico de igual capacidad, el cual se taponó con el objetivo de evitar la oxidación del hierro en la fase líquida. Paralelamente se midió la fuerza electromotriz (E_x) de la pulpa en el sistema electrodico Calomel saturado/Pt con una precisión de ±5 mV. Después de sedimentada la muestra sólida se pipeteó la fase líquida y se procedió según las normas establecidas para el análisis de Fe y Co por el método de absorción atómica. El Ni y el Co(II) se determinaron en un espectrofotómetro ultravioleta visible de marca Pye Unicam. Las muestras de sólido obtenidas después de tratadas según normas de la empresa, se analizaron por Fe_T, Ni_T y Co_T en el espectrofotómetro de llama SP9 Pye Unicam.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de los análisis de Ni_T, Fe_T y Co_T, correspondientes a la fase sólida, se procesaron por la ley de la raíz cúbica que modela la disolución de los metales con elevada resistencia difusiva (Dobrojtov, 1978):

$$1 - [1 - \eta(\tau)]^{1/3} = K' \cdot \tau^2 \quad (1)$$

donde:

$\eta(\tau)$: función de transformación del Ni y el Co, en fracciones de unidades.

$$\eta(\tau) = 1 - [Me_T(\tau) / Me_T(ma) \cdot Fe_T(ma)] / Fe_T(\tau)$$

donde:

Me_T(ma) y Me_T(τ): contenido total de Ni y Co, en por ciento, en el mineral alimentado al horno de reducción y en las muestras de mineral lixiviado, respectivamente. De forma análoga se procedió con el Fe_T.

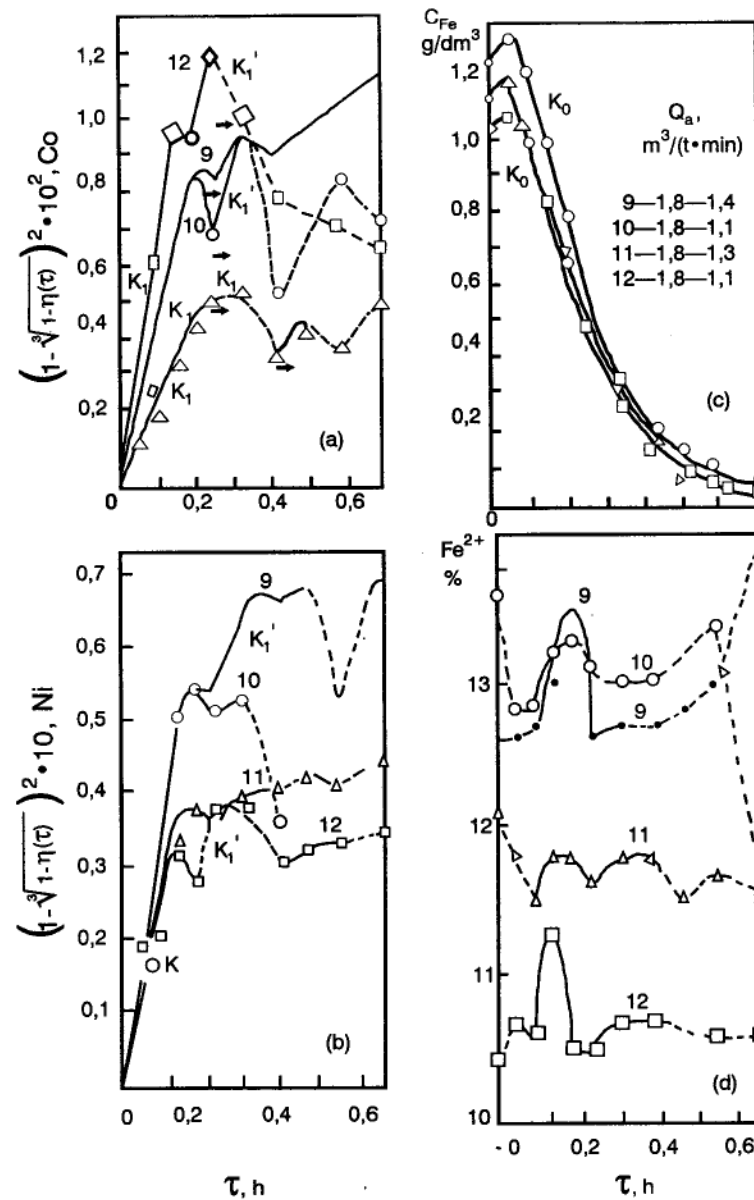


FIGURA 1. Cinética de la oxidación conjunta del Ni, Fe y Co en medio carbonato-amoniaco.

En las Figuras 1(a) y 1(b) se muestra la cinética de lixiviación del Ni y el Co, en la que se ilustran dos rectas que corresponden a la determinación gráfica de la constante de velocidad de disolución del Ni y el Co, donde K₁ corresponde a la primera zona de disolución lineal y K₁' a la segunda zona de disolución. En la Figura 1(c) se representa la variación del contenido de Fe en solución durante la lixiviación; y en la Figura 1(d), la variación del contenido de Fe(II) en la fase sólida.

Las combinaciones de aire empleadas en cada experimento se indican en la Figura 1(c) y en la Tabla 1. El flujo de aire (Q_a) se varió a los potenciales que se indican en dicha tabla. El tiempo de cambio de aire se señala con flechas en las Figuras 1(a), 3(a) y 3(b).

TABLA 1. Variación del flujo de aire a diferentes potenciales E_x

No. experimento	9	10	11	12
E _x , ± 5 mV	-474	-457	-457	-440
Q _a , m ³ /(t·min)	1,8 → 1,4	1,8 → 1,1	1,8 → 1,3	1,8 → 1,1

Las concentraciones iniciales de Ni y Co en el licor fueron: 8-8,5 g/dm³ y 0,095- 0,24 g/dm³, respectivamente. En el último caso, la concentración de Co_T se incrementó en el mismo orden numérico de los experimentos.

I. Localización de las pérdidas de Ni y Co con los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH). Velocidades de oxidación e hidrólisis de los iones de hierro

En la Figura 2 se muestra la disminución lineal de la constante de velocidad de disolución del Co al aumentar su contenido en el licor alimentado. Esto ocurre hasta que se alcanza el valor de E_x = -482 ± 5 mV (ver Figuras 3(a) y 3(b)), correspondiente al primer máximo en las curvas cinéticas (Figuras 1(a) y 1(b)). En la Figura 4 se muestra una función generalizadora de la influencia de la concentración de Co total en el licor lixiviante de contacto sobre la eficiencia total de lixiviación de Co (E_{CoT}), que agrupa varios experimentos realizados a un flujo de aire específico (Q_a) de 1,8 en esta primera zona de lixiviación, en el rango de concentraciones de NH₃, CO₂ y temperatura de lixiviación, indicados en el procedimiento experimental. En el resto de los experimentos sólo se varió el mineral reducido y la composición iónica del licor lixiviante (sistema puramente carbonato-amoniaco).

Los resultados mostrados hasta el momento en relación con el Co en la primera zona de lixiviación, demuestran cuantitativamente la disminución lineal de su constante de velocidad (K') en aproximadamente cuatro veces, así como la altura de sus máximos de eficiencia de lixiviación entre 1 y 2 %, al incrementar la concentración inicial de Co en el licor de contacto. Estos síntomas demuestran la formación de soluciones sólidas del sistema magnetita-maghemita (Chang y Bobkovski, 1993; Chang, Rodríguez, Bobkovski y Beloglazov, 1995;

Vainzhtein, 1986) preferentemente con el Co, cuyas pérdidas son irreversibles. El significado económico de dichas pérdidas a escala industrial ha contribuido a fundamentar la decisión tecnológica de precipitar el máximo de Co de todo el licor que se recircula a los tanques de contacto, como se efectuó en Marinduque -NONOC- (Colvin y Gulyas, 1979).

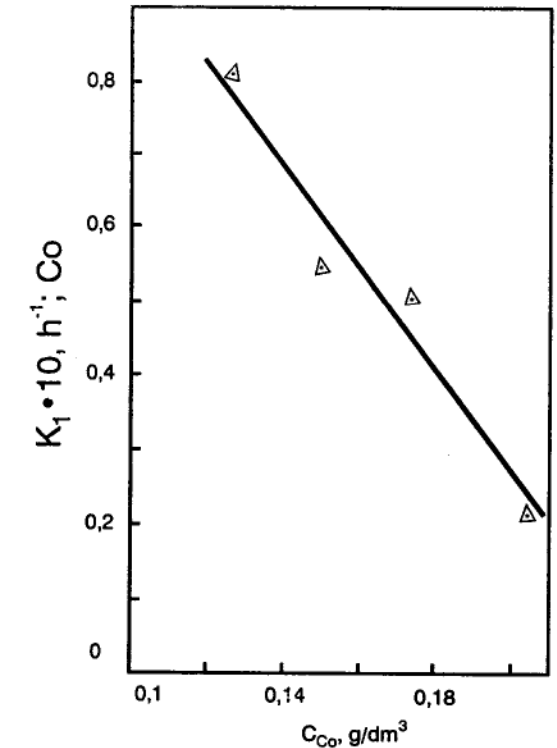


FIGURA 2. Correlación entre K₁ y la concentración de Co en el licor lixiviante.

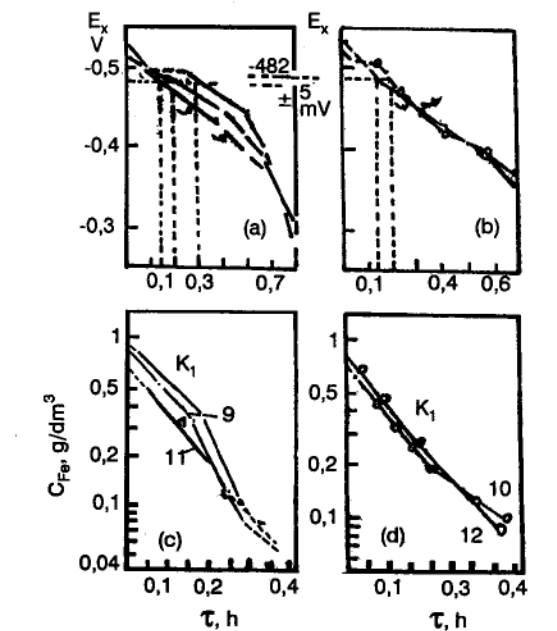


FIGURA 3. Variación de la capacidad oxidante del sistema de lixiviación carbonato-amoniaco.

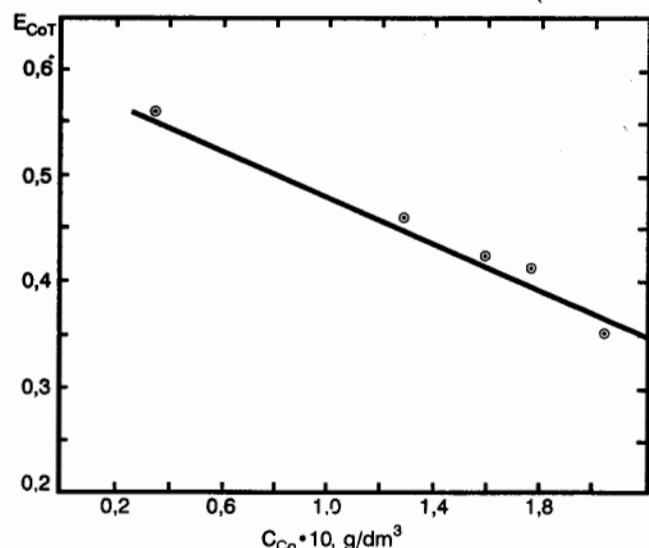
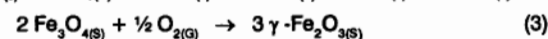
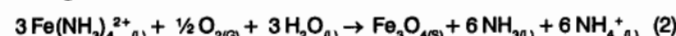


FIGURA 4. Eficiencia total de lixiviación del cobalto en el licor.

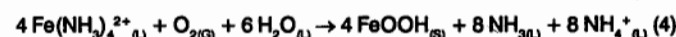
En esta misma zona, el Ni ordena sus primeros máximos en correspondencia con el contenido de Fe(II) en el mineral lixiviado, sin existir una correspondencia regular entre la concentración de Ni en el licor y el contenido de Fe(II) y $F_{e,}$ en el mineral lixiviado. Esto último hace poco probable la formación de soluciones sólidas del sistema magnetita-maghemita con el Ni, lo que indica una mayor dependencia de la extracción de Ni de la cantidad de hierro y sus compuestos en el mineral reducido, capaces de oxidarse y solubilizarse durante la lixiviación, lo cual prácticamente se define en la operación de reducción. Al respecto, Chang (1989) en su tesis de doctorado ofrece demostraciones más completas.

Los primeros máximos de Ni y Co (Figuras 1(a) y 1(b)) se obtuvieron al término de la reacción de orden cero por Fe (Figura 1(c)); esto está en correspondencia con los resultados de Chang, Mariño y Rodríguez (1988) para sistemas más simples. Indica, además, que las posibilidades prácticas de regular las pérdidas de Ni y Co por segregación pueden ser: disminuyendo la constante de velocidad de oxidación del hierro K_0 mediante la aeración y la introducción de iones reductores $S_xO_y^{z-}$ (Chang, 1989; Chang y Bobkovski, 1993).

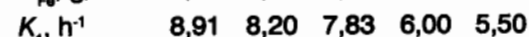
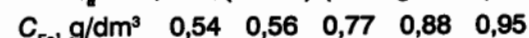
Las reacciones de oxidación e hidrólisis de los iones de hierro en esta zona pueden ser expresadas de la siguiente forma:



Durante el período que termina de formarse la magnetita y comienza la precipitación masiva de la gohetita, la reacción de oxidación e hidrólisis de los iones hierro es de primer orden por Fe (Figuras 3(c) y 3(d)) - $\ln \text{Co}/C_i = K_1 \cdot \tau$. La constante de velocidad K_1 se incrementará bruscamente, mientras menor sea la concentración de Fe al comienzo de la reacción general:



y depende de la concentración de Fe. A continuación se ilustra dicha dependencia para un flujo específico de aire constante $Q_a = 1,4 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ (Chang, 1989).



Por tanto, el incremento de Q_a no siempre incrementará la K_1 por la fuerte dependencia de la concentración de hierro (C_{Fe}).

De acuerdo con los resultados antes expuestos y los reportados por Chang y Bobkovski, 1993; y Chang, Rodríguez, Bobkovski y Beloglazov, 1995, un incremento significativo del tamaño de las partículas de gohetita que contribuya a cambiar el comportamiento cinético del cobalto se alcanzará si se disminuye la velocidad de oxidación e hidrólisis de los iones antes de comenzar la precipitación masiva de esta: $-467 \pm 5 \text{ mV}$ (ver Tabla 1), y no después de la misma, por muy pequeño que sea el flujo de aire dado. Tal hipótesis se fundamenta en la teoría de cristalización con el objetivo de mejorar la calidad de las partículas de gohetita que se forman y disminuir su capacidad de segregación.

Como se observa en las Figuras 1(a) y 1(b), el experimento 9 es el único que logra un comportamiento cinético ascendente significativo. Esto fundamenta que en el resto de los experimentos, la velocidad de coprecipitación de la gohetita fue mayor o prácticamente igual a la velocidad de disolución del Ni y el Co, transcurriendo esta última con una elevada resistencia difusiva. Sin embargo, al observar la cinética del Ni, sobre la que no influye la concentración del Co en el licor, observamos que después de variar el aire, los resultados fueron mejores mientras más electronegativo fue el cambio de aire. La misma tendencia general se muestra menos para el Co, el cual sufre una profunda afectación en sus extracciones.

Trabajos precedentes (Chang, Mariño, Rodríguez y otros, 1988; Chang, Rodríguez y Dobrojtov, 1989; Chang, 1989) han abordado las pérdidas de Ni y Co por coprecipitación segregante con el sistema magnetita-maghemita al aumentar el flujo específico de aire. A diferencia de las pérdidas por coprecipitación con la formación de soluciones sólidas, las pérdidas por segregación con cualquier OHH pueden ser recuperadas durante el resto de la lixiviación y el lavado del mineral lixiviado. La práctica industrial de la Queensland Nickel (Reid, 1984) ha demostrado que para el Ni esta puede alcanzar su totalidad, pero para el Co es difícil pronosticar el grado de recuperación. La causa fundamental es el pequeño valor del radio iónico del Co(III) $-0,063 \text{ nm}$ en relación con el radio iónico del Ni(II) $-0,074 \text{ nm}$ y Co(II) $-0,078 \text{ nm}$; y de éstos, a su vez, respecto a los radios iónicos del Fe(II) $-0,075 \text{ nm}$ y Fe(III) $-0,067 \text{ nm}$. Los iones de Co(III) son capaces de penetrar con mayor profundidad en la estructura defectuosa del sólido y junto a los iones de Ni(II) pueden ocupar los espacios vacantes de las estructuras de los cristales de los OHH, particularmente de la maghemita (Vainzhtein, 1986).

El estudio detallado del último intervalo de tiempo ($\tau \geq 0,5 \text{ h}$) permitió considerar que las alteraciones observadas en las Figuras 1 y 3 están ligadas a la ocurrencia de procesos secundarios simultáneos, como son: el envejecimiento de los OHH precipitados, expresado por la devolución de parte del Ni y el Co coprecipitados al licor (ver último tramo en las Figuras 1(a) y 1(b)); el intercambio iónico entre el Fe(III) en la fase sólida por el Co(III) en la fase líquida; la sustitución isomórfica de los iones en la red cristalina de los OHH, por las razones anteriores sobre los radios iónicos, manifestado por la alteración del balance material por Co, Fe y Ni tanto en la fase sólida como en la líquida.

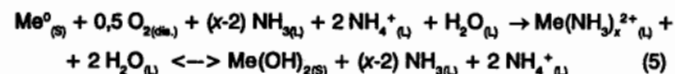
II. Velocidades de disolución del Ni y el Co

En trabajos anteriores (Chang, 1989; Rodríguez, Chang y Beloglazov, 1994) se demostró que la magnitud de K_1 para el caso de la disolución del Ni a partir de minerales reducidos industrialmente es prácticamente constante al variar el flujo de aire en un amplio intervalo. La diferencia en sus valores se manifiesta al cambiar la composición iónica del licor en iones de Co(III), lo que se muestra a continuación:

- Las tres pruebas realizadas con licor lixivante puramente carbonato-amoniaco (L puro) sin iones de metales (Chang, 1989) y los minerales reducidos de la Empresa de Nicaro con la siguiente composición química, en por ciento:

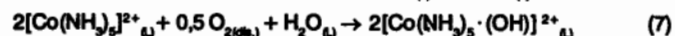
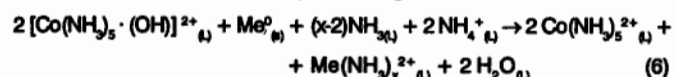
Fe (II)	Fe _{TOTAL}	Ni _{TOTAL}	Co _{TOTAL}
21,0*	45,7	1,22	0,084
22,4	47,7	1,31	0,097
22,2	45,7	1,31	0,089

mostraron que la disolución (oxidación) del Ni por la reacción general:



donde x para Fe y Cu es 2; 3 y 4; para Ni y Co es 2; 3; 4; 5 y 6, transcurre con una constante $K_1 = 0,19-0,20 \text{ h}^{-1}$ al variar el flujo de aire específico desde 1,8 hasta 7,3 m^3 de aire/(tonelada de mineral reducido · cada minuto de aeración).

- Si al licor lixivante le introducen iones de Co(III), cuya concentración varía entre 0,10 y 0,24 g/dm^3 en los tres experimentos realizados con un flujo de aire específico (Q_a) de 1,8 $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$, entonces la reacción de disolución se efectúa por el siguiente mecanismo:



el que muestra una variación de $K_1 = 0,23-0,27 \text{ h}^{-1}$ debido al incremento de la concentración de Co(III).

Las tres pruebas se realizaron con el mineral reducido de la planta de hornos de la fábrica de Nicaro, el que se obtuvo del mineral crudo, cuyos contenidos en por ciento se relacionan a continuación:

Tipo de mineral	Ni _{Total}	Co _{Total}	Fe _{Total}	Fe(II)
Mineral crudo	1,105	1,101	39,350	12,200
Mineral reducido	1,200	0,105	47,800	23,100

- Si en lugar de iones de Co(III) se introducen iones de Co(II) mediante una disolución acuosa concentrada de CoCl_2 (puro para el análisis químico) con el fin de alcanzar concentraciones que varían desde 0,03 g/dm^3 hasta 0,26 g/dm^3 , entonces la reacción de disolución del Ni se comporta como si fuera L puro en el primer tramo y a medida que se va oxidando el Co(II) se adicionará la reacción (6), cuyo efecto se manifiesta en zonas posteriores. En este caso $K_1 = 0,17 \text{ h}^{-1}$, el que se obtuvo en tres pruebas (Chang, 1989) con el siguiente mineral:

Tipo de mineral	Ni _{Total}	Co _{Total}	Fe _{Total}
Mineral crudo	1,170	0,091	39,600
Mineral reducido	1,390	0,101	47,900

TABLA 2. Valores de la constante de velocidad de disolución del Ni en la zona I durante la lixiviación de minerales reducidos de la planta de hornos de reducción de Nicaro

	Licor lixivante		
	L puro	con Co(II)	con Co(III)
$K_1, \text{ h}^{-1}$	0,19-0,2	0,17	0,23-0,27
$Q_a, \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$	1,8-7,3	1,1-1,8	1,8
Cantidad de experimentos	3	3	3

Como se observa en la Tabla 2, a pesar del evidente efecto catalítico del Co(III), los valores de la constante de velocidad de oxidación del Ni no aumentan considerablemente, incluso, al compararse con los dos restantes casos que son diferentes en tipo de mineral y composición iónica del licor lixivante.

Se puede considerar que para cada composición del licor en NH_3 , CO_2 y Co(III) la constante K_1 prácticamente no varía con el incremento del flujo específico de aire, lo que es una contradicción con la interpretación clásica del proceso. En realidad, el síntoma de aumento de la velocidad de oxidación del Ni con el incremento de la presión parcial del oxígeno se manifiesta en la zona II (segundo tramo en la Figura 1) durante un tiempo mucho menor que el de la zona I; esto hace pensar que al procesarse los datos cinéticos por el método clásico de extracción contra tiempo, la susceptibilidad del mismo no permite detectar el error al promediarse los resultados gráficamente en todo el intervalo de tiempo. Además, en muchos casos, el intervalo de muestreo fue muy grande. Por tanto, los valores que se ofrecen en dichas publicaciones son el fruto de la combinación de dos procesos diferentes, donde el segundo (zona II) es el puramente difusivo, como se ha demostrado en los trabajos de Chang (1989; 1990) y en el presente artículo lo ilustramos resumidamente a través de la Figura 5(a). En este caso, los valores de K_1 se diferencian sustancialmente al

variar el Q_a , y en presencia de Co(III). En la Tabla 3 se muestran los valores de K_1' en algunos experimentos.

TABLA 3. Valores de la constante de velocidad de oxidación del Ni en la zona II durante la lixiviación de minerales reducidos de la planta de hornos de reducción de Nicaro

Q_a , m ³ /(t · min)	1,1	1,3	1,4	1,8
K_1' , h ⁻¹ con Co(III)	0,031	0,052	0,124	0,200
K_1' , h ⁻¹ sin Co(III)	0,012	-	0,060	0,122

Al comparar los valores numéricos de ambas constantes de velocidad se desprende que los K_1 son mayores que los K_1' , equiparándose cuando al iniciar la lixiviación están presentes los iones de Co(III) en el licor de contacto a valores de Q_a relativamente elevados, en el rango de su empleo industrial.

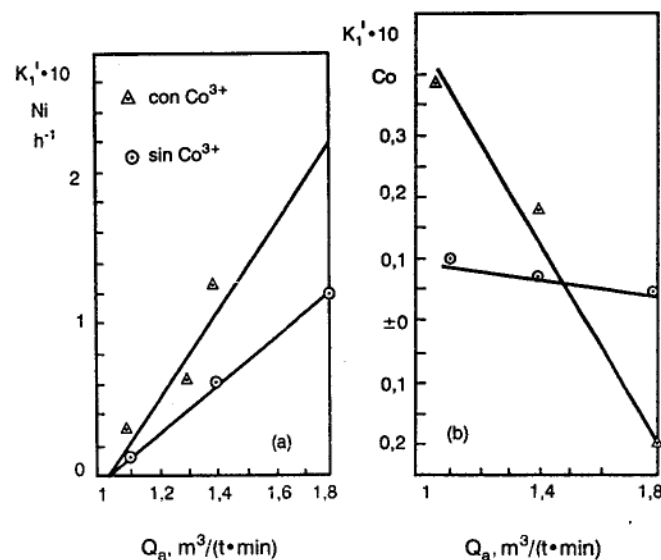


FIGURA 5. Correlación entre las constantes de disolución del Ni y (a) coprecipitación del Co, y el flujo de aire específico en la zona de lixiviación.

El cobalto se oxida en la zona I por las reacciones (5), (6) y (7) con una gran afectación en su velocidad de disolución por la concentración de este, como se ha demostrado en trabajos anteriores (Chang, Rodríguez y Dobrojtov, 1989; Chang, 1989).

Cuando la concentración de Co en el licor de contacto (LC) es constante (aprox. 0,04 g/dm³ de Co_{Total}), los valores de K_1 se incrementan discretamente con el aumento de Q_a como se puede observar a continuación:

Q_a , m ³ /(t · min)	1,1	1,6	1,8
K_1 , h ⁻¹	0,026	0,028	0,033

En las mismas condiciones experimentales referidas al Ni para mostrar los resultados de la Tabla 2, cuando Q_a es prácticamente constante (1,8), el efecto catalítico del Co(III) se observa en la siguiente comparación:

K_1 , h ⁻¹	Licor lixivante de contacto	
	con Co(II)	con Co(III)
	0,032	0,060

En la zona II, la constante (K_1) de disolución (oxidación) del Co decrece bruscamente con el incremento de Q_a y de la concentración de Co(III) en LC como se muestra en la Figura 1(b).

CONCLUSIONES

I. Localización de las pérdidas de Ni y Co con los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH). Velocidades de oxidación e hidrólisis de los iones de hierro

1.1. En la primera zona de lixiviación, cuya terminación se identifica por el $E_x \pm -482 \pm 5$ mV, las principales pérdidas de metales ocurren con la magnetita y la maghemita con un apreciable significado económico para el Co. La formación de soluciones sólidas puede atenuarse disminuyendo la concentración de Co en el licor de contacto con el mineral reducido hasta valores menores o cercanos a 0,1 g/dm³; en tanto, las pérdidas por segregación pueden ser insignificantes si se disminuye la aeración hasta obtener el mayor valor del primer máximo de extracción de Co en el rango de tiempo deseado. Estas pérdidas del mineral ocurren en el primer turboaerador cuando se trabaja con altas concentraciones de Fe, NH₃ y CO₂ en el licor lixivante.

1.2. En la segunda zona de lixiviación, cuyo inicio se identifica por los valores de $E_x \pm -467 \pm 5$ mV, las pérdidas de Co y Ni ocurren con la gohetita por segregación, caracterizada por una variación brusca de E_x en sentido electropositivo, dado por las bajas concentraciones de Fe en el licor al comenzar la reacción de primer orden por Fe. Nuevamente, el Co es el más afectado. El modo práctico para disminuir dichas pérdidas es aireando moderadamente antes de comenzar su precipitación masiva bajo el control de E_x . Estas pérdidas pueden ocurrir, también, en el primer turboaerador si las concentraciones de Fe son bajas, lo que obliga a buscar un Q_a óptimo que responda a un máximo de extracción de Ni y Co en este turboaerador. En condiciones industriales, dichos valores dependerán de varios factores, lo que hace necesario la creación de un modelo matemático. Si la concentración de Fe al comienzo de la reacción de primer orden por Fe es elevada (cerca o superior a 1 g/dm³), la gohetita se puede precipitar a partir del segundo turboaerador, lo que permitirá una mayor comodidad en la regulación de las pérdidas de Ni y Co mediante la aeración. Parte de estas pérdidas es recuperable durante el resto de la lixiviación y en el lavado del mineral lixiviado, con certeza, la totalidad del Ni.

1.3. La tercera zona de lixiviación, cuyo inicio se identifica por las alteraciones en el balance de materia por Fe, Ni y Co en sus respectivas curvas cinéticas, se caracteriza por la activa participación de los OHH que se precipitan en el intercambio de iones con el licor. La incorporación de dichos procesos secundarios a la ya iniciada precipitación de la gohetita y el surgimiento del Fe(OH)₃ hacen ingobernable las pérdidas de Co(III). Su efecto será menor, mientras mejores cualidades posean los OHH antes precipitados y, por tanto, las medidas recomendadas anteriormente, respecto al aire, son válidas para disminuir estas pérdidas irrecuperables.

II. Velocidades de disolución del Ni y el Co

2.1. La metodología empleada para obtener los valores de las constantes K_1 y K_1' para Ni y Co se puede generalizar para evaluar sistemas reales de minerales y licores de composiciones complejas en reactores de diferentes tipos, con la finalidad de determinar la productividad relativa específica de los mismos durante su selección para la industria.

2.2. Las regularidades cinéticas obtenidas durante la determinación de las constantes de velocidades de disolución del Ni, demuestran la existencia de dos mecanismos de oxidación y dos regímenes de ocurrencia bien delimitados en el tiempo.

2.3. Las contradicciones existentes en las dos zonas de disolución del Ni y el Co en cuanto a dependencia del flujo de aire específico y concentración total de cobalto en LC, condenan los niveles de extracciones de cobalto bajo las concepciones actuales de aireación en los tradicionales turboaeradores.

2.4. Las conclusiones anteriores nos permiten fundamentar científicamente la selección de nuevos tipos de reactores (por ejemplo, el reactor tubular) o el perfeccionamiento constructivo de los existentes, así como sobre su cantidad y número de etapas a emplear en correspondencia con el objetivo tecnológico principal que se determine por la empresa.

BIBLIOGRAFÍA

- COLVIN, N. and J.W.GULYAS: «The Marinduque Surigao Nickel Refinery», in *International Laterite Symposium*, pp. 346-356, New Orleans, AIME, N.Y., 1979.
- CHANG CARDONA, A.R.; P.A. MARIÑO; J.I. RODRÍGUEZ y otros: «Cinética de la oxidación de Fe, Ni y Co en la lixiviación carbonato-amoniaca de los minerales reducidos de Ni», *Minería y Geología*, 6(3): 37-46, 1988.
- CHANG CARDONA, A.R., J.I. RODRÍGUEZ y G.N. DOBROJOTOV: «Influencia del régimen de aeración sobre las extracciones de cobalto en la primera etapa de lixiviación carbonato-amoniaca de los minerales reducidos de Ni», *Minería y Geología*, 1(1): 51-62, 1989.
- CHANG CARDONA, A.R.: «Perfeccionamiento de la tecnología de la Empresa René Ramos Latour, Nicaro, Cuba», Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas, 150 pp., Universidad Técnica de St. Petersburgo, Rusia, 1989. Depositado en fondo de ICT de la Academia de Ciencias de Cuba.
- : «Perfeccionamiento de la lixiviación carbonato-amoniaca», *Memorias del VII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnologías Metalúrgicas*, vol. I, pp. 357-365, CENIM, Madrid, España, 1990.
- CHANG CARDONA, A.R. y A.G. BOBKOVSKI: «Estudio experimental sobre la hidrólisis de los iones de hierro durante la lixiviación carbonato-amoniaca de los minerales oxidados de Ni previamente reducidos», *Minería y Geología*, 2(2): 75-79, 1993.
- CHANG CARDONA, A.R.; J.I. RODRÍGUEZ; A.G. BOBKOVSKI e I.N. BELOGLAZOV: «Estudio de las particularidades estructurales y composición de fase de los productos de la hidrólisis de los iones de hierro a partir de licores carbonato-amoniaca», *Zvetnie Metalli*, (9): 30-34, 1995 (en ruso).
- DOBROJOTOV, G.N.: *Procesos y aparatos de la producción hidrometalúrgica*, 85 pp., Editorial Universidad Técnica de St. Petersburgo, Rusia, 1978.
- REID, J.G.: «Algunas observaciones sobre las características de la tostación, lixiviación y lavado del mineral laterítico de Greenvale», *Boletín Técnico, Serie Níquel*, (1): 29-40, 1984.
- RODRÍGUEZ, J.I., A.R. CHANG e I.N. BELOGLAZOV: «Estudio de la lixiviación carbonato-amoniaca de minerales reducidos durante el tratamiento de menas oxidadas de Ni», *Zvetnie Metalli*, (2): 22-24, 1994 (en ruso).
- VAIZHTEIN, I.A.: «Tratamiento de soluciones que contienen sales de hierro», *Limpieza y utilización de las aguas residuales de los talleres metalúrgicos ferrosos*, 109 pp., Moscú, 1986.

APROVECHAMIENTO DE RECURSOS MINERALES

