

Recibido: 30 / 08 / 2007, aceptado en versión final: 10 / 09 / 2007

## Aplicación de tecnologías limpias en la metalurgia a través del diseño de recipientes industriales

Clean technologies in metallurgic processes through the design of industrial tanks

**Luis Puente Santibáñez\***, **Daniel Lovera Davila\***, **Vladimir Arias Arce\***, **Rosa Coronado Falcón\***, **Silvana Flores Chavez\*\***

---

### RESUMEN

La actividad minero-metalúrgica genera efluentes líquidos que deben ser tratados para su disposición al ambiente, cumpliendo la normatividad de la autoridad ambiental.

Las empresas de la gran minería y mediana minería llevan a cabo proyectos de adecuación ambiental en concordancia con las tendencias globales, pero el estrato de la pequeña minería y la minería informal no tiene entre sus prioridades la cuestión ambiental debido, entre otras causas, al mínimo desarrollo e investigación en tecnologías limpias que finalmente, influirán en la eficiencia de sus procesos.

El objetivo del presente estudio está centrado en proponer soluciones con base experimental para el diseño y dimensionamiento de recipientes en procesos de precipitación química y cementación de metales disueltos en efluentes.

Se detallan pruebas en laboratorio para la cementación de cobre de los efluentes líquidos mediante chatarra ligera de hierro, que permite recuperar como cemento de cobre con impurezas de hierro y reducir fuertemente el cobre disuelto logrando así minimizar el contenido metálico en el efluente.

Se simulan procesos de flujo para obtener la variable de respuesta conocida como tiempo de residencia para deducir el volumen recomendado del recipiente. La fracción convertida de cobre en el efluente a cobre precipitado como cemento es de alrededor del 90%, un resultado aceptable; sin embargo, se recomienda un posterior proceso de adsorción; por ejemplo, para lograr los máximos permisibles para disposición al ambiente.

**Palabras clave:** Tecnologías limpias, recipientes, cementación, tiempo de residencia.

### ABSTRACT

Mining and metallurgical activity produces liquid effluents as a waste during the extraction process, which must be treated in order to be disposed in the environment, following governmental and environmental legislation.

Big and medium size mining industry carry on environmental projects as it is the trend worldwide, but small size and informal mining did not have between its priorities the environmental issue due to the lack of research on clean technologies related to this sector which finally could influence in make more efficient its processes.

The main aim of the research is centered on propose solutions with an experimental basis for design and dimension of containers in processes with chemical precipitation and cementing of dissolved metals in liquid effluents.

Laboratory tests are detailed for cementing copper from liquid effluents by means of light scrap iron which allows recover cement of copper with ferrous impurities and strongly reduce the dissolved copper, diminishing the metallic content in the effluent.

\* Docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima (Perú).  
E-mail: lpuentes@unmsm.edu.pe

\*\* Estudiante de Maestría de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Flow processes are simulated in order to obtain variables of response like the time of residence in order to deduce the recommended volume of the container. The copper fraction converted from the precipitated copper is around 90% that is an acceptable result, notwithstanding it is recommended apply an adsorption process after the process in order to reach the maximum limits in order to be discharged to the environment.

**Keywords:** Clean technologies, containers, cementation, time of residence.

## I. INTRODUCCIÓN

### Tecnología limpia en operaciones mineras

En las operaciones metalúrgicas se generan efluentes líquidos conteniendo metales en solución que, para su disposición al ambiente, deben cumplir la normatividad de la autoridad ambiental.

El tratamiento de estos efluentes puede consistir en una precipitación química de los iones metálicos y formar precipitados poco solubles y confinarlos.

Una alternativa factible puede ser, para el caso de cobre disuelto, la cementación con chatarra ligera de hierro y recuperar el precipitado como cemento de cobre con impurezas de hierro.

Este proceso implica aplicar los fundamentos técnicos para reducir el contenido de metales disueltos en efluentes como una solución de bajo costo adaptable a las condiciones específicas de pequeñas operaciones mediante el dimensionamiento adecuado de tanques y recipientes en función a las condiciones específicas de operación.

Es importante el desarrollo e investigación con base experimental en laboratorio para escalar a niveles de la práctica operacional de la pequeña minería que no tiene entre sus prioridades la cuestión ambiental

Se plantea el tema como un aporte que paralelamente al desarrollo eficiente de los procesos, se apliquen tecnologías que minimicen la contaminación de aguas.

El desarrollo de pruebas experimentales para el dimensionamiento y diseño de recipientes en procesos de cementación de cobre en efluentes de las operaciones de la pequeña minería, contribuyen como elemento técnico de juicio para mejorar la eficiencia aplicando tecnologías limpias.

### Sistemas reactivos

Los sistemas reactivos de precipitación, cementación o neutralización permiten eliminar iones contaminantes de una solución, en el estudio se enfoca la cementación que es un proceso de intercambio metálico donde un metal activo puede reducir a otro menos activo disuelto en solución acuosa [1, 2].

Un metal se reduce cuando gana electrones, reduce su estado de oxidación y precipita como sólido, en este caso se conoce como cemento.

La velocidad con que este proceso puede ocurrir es campo de la cinética de las reacciones y se constituye en un factor determinante [3, 4].

La ecuación aplicable se define como:  $-dC / dt = K C^n$

Donde el término  $-dC / dt$  indica la disminución de la concentración (C) respecto al tiempo (t), en este caso C, representará la concentración del ión metálico que se desea precipitar.

K y n son constantes del proceso y que deben determinarse experimentalmente.

Para un proceso de flujo donde el efluente a tratar ingresa y sale continuamente del sistema aplicamos la ecuación de diseño [1, 5]:  $V / Q = Co X /$

Donde: V volumen efectivo del recipiente  
 Q Caudal del flujo líquido a tratar  
 Co Concentración al inicio del proceso  
 X Fracción convertida de reaccionante en producto  
 Γ Ecuación cinética

La relación V/Q se conoce como tiempo de residencia (T) y se define como el tiempo necesario que un volumen (V) de líquido reaccionante que ingresa al sistema debe permanecer para que alcance una fracción convertida (X) a producto [6].

La fracción convertida (X) se define por la relación:  $(Co - C) / Co$

Donde (C) representa la concentración del reaccionante en el tiempo (t)

## II. MÉTODO Y MATERIALES

El estudio sigue un diseño experimental a nivel laboratorio empleando muestras de efluentes líquidos de pruebas de lixiviación conteniendo iones cobre para cementar con chatarra ligera de hierro.

El equipo se compone de vasos de precipitación, agitador magnético, equipo analizador de cobre (espectrofotómetro de rango visible) y accesorios de laboratorio.

Los parámetros del proceso:

Concentración inicial (Co) del efluente a tratar:

Efluentes que contienen Co = 0,46 g Cu/l

Efluentes conteniendo Co = 1,47 g Cu/l

Temperatura ambiental

Agitación constante

Las variables principales para el control de las pruebas son la concentración (C) de cobre que va quedando en el efluente a tratar y el tiempo acumulado necesario para precipitar como cemento de cobre hasta un valor determinado de la fracción de reaccionante convertido(x) a producto.

Con estos datos se puede conocer la cinética de los procesos.

### III. RESULTADOS

Se han realizado pruebas de cementación de cobre a partir de muestras de efluentes líquidos, provenientes de operaciones de lixiviación ácida de minerales oxidados de cobre.

El análisis de las muestras reportan:

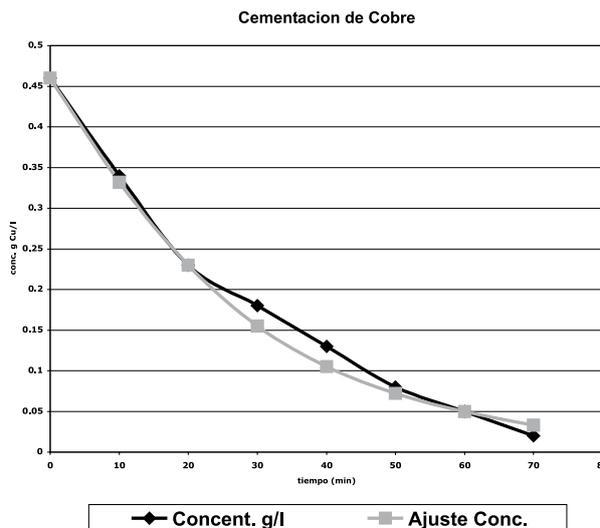
Concentración inicial de cobre Co = 0,46 g Cu/ l y Co = 1,47 g Cu/l.

Se detallan datos de la variación de la concentración de cobre respecto al tiempo para cálculo de la ecuación cinética respectiva.

**Tabla 1.** Pruebas de cementación de cobre a partir de efluente conteniendo concentración inicial de cobre Co = 0,46 g Cu/l

Tiempo (min.)	Concent. g Cu/l	Tendencia gráfico
0	0.46	0.46
10	0.34	0.33
20	0.23	0.23
30	0.18	0.16
40	0.13	0.11
50	0.08	0.07
60	0.05	0.05
70	0.02	0.03

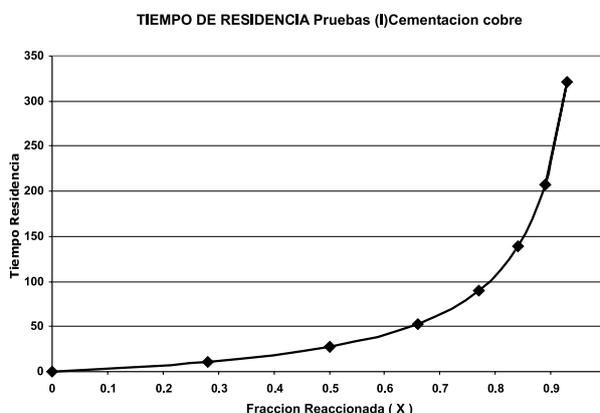
El análisis de las muestras indica la disminución de cobre en solución, debido a la formación del precipitado cemento de cobre.



**Gráfico 1.** El procesamiento de los datos permite deducir la cinética del proceso, cuya ecuación es de la forma:  $-dC/dt = 0.0328 C^{0.94}$

**Tabla 2.** La ecuación cinética  $-dC/dt = 0.0328 C^{0.94}$  se aplica en el cálculo del tiempo de residencia para un proceso de flujo.

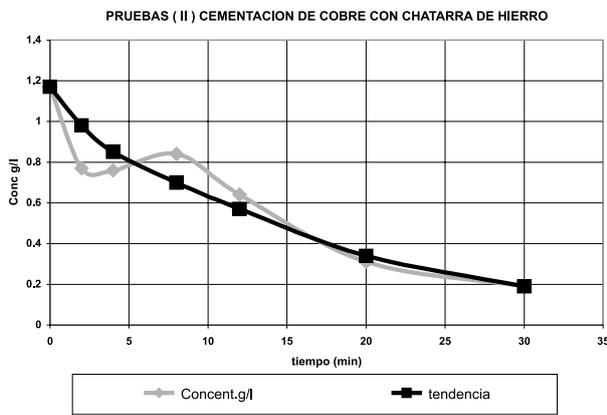
Tiempo (min.)	Concentración C (g Cu/l)	Fracc. Rx X	Ecuación cinética	Tiempo Resid. minutos
0	0.46	0	0.01582	0
10	0.332	0.28	0.01165	11.06
20	0.23	0.5	0.00825	27.87
30	0.155	0.66	0.00570	53.30
40	0.105	0.77	0.00395	89.64
50	0.072	0.84	0.00277	139.36
60	0.05	0.89	0.00197	207.94
70	0.033	0.93	0.00133	320.98



**Gráfico 2.** Tiempo de residencia en minutos para la cementación de cobre de efluente de concentración Co = 0,46 g Cu / l

**Tabla 3.** Pruebas de cementación de cobre a partir de efluente conteniendo concentración inicial de cobre  $C_0 = 1,17 \text{ g Cu/l}$

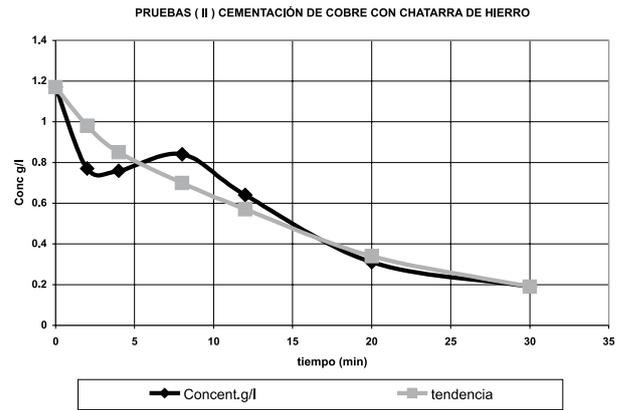
Tiempo Mín.	Concent. g Cu/l	tendencia
0	1.17	1.17
2	0.77	0.98
4	0.76	0.85
8	0.84	0.7
12	0.64	0.57
20	0.31	0.34
30	0.19	0.19



**Gráfico 3.** El procesamiento de los datos permite deducir la cinética del proceso, cuya ecuación es de la forma:  $-dC/dt = 0.0679 C^{1.163}$

**Tabla 4.** La ecuación cinética  $-dC/dt = 0.0679 C^{1.163}$  se aplica en el cálculo del tiempo de residencia para un proceso de flujo.

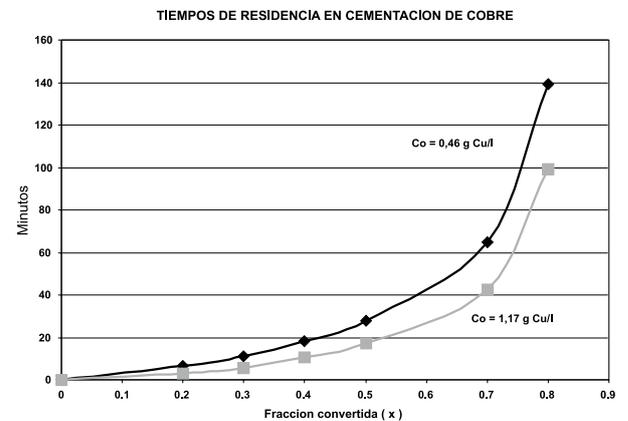
Tiempo (min.)	Concentración C (g Cu/l)	Fracc. Rx X	Ecuación cinética T	Tiempo Residen.
0	1.17	0	0.0815	0
2	0.98	0.16	0.0663	2.86
4	0.85	0.27	0.0562	5.69
8	0.7	0.40	0.0449	10.47
12	0.57	0.51	0.0354	16.96
20	0.34	0.71	0.0194	42.73
30	0.19	0.84	0.0099	99.08



**Gráfico 4.** Tiempo de residencia en minutos para la cementación de cobre de efluente de concentración  $C_0 = 1,17 \text{ g Cu / l}$ .

**Tabla 5.** Tiempos de residencia comparativa para cada proceso en función de la fracción reaccionada.

Cementación	$C_0 = 0,46 \text{ g Cu / l}$	$C_0 = 1,17 \text{ g Cu/l}$
Fraccion Rx	Tiempo Residen.	Tiempo Residencia
0		
0.2	6.8	2.9
0.3	11	5.7
0.4	18	10.5
0.5	27.9	17
0.7	65	42.7
0.8	139.4	99



**Gráfico 5.** Tiempos de residencia comparativos en ambos procesos.

#### IV. CONCLUSIONES

Se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- a) La concentración con la que se inician las pruebas es determinante para dimensionar los recipientes para estos procesos a partir de los tiempos de residencia necesarios para alcanzar porcentajes de conversión significativos en el rendimiento operativo.
- b) Se observa que efluentes con bajas concentraciones iniciales necesitarán más tiempo de residencia y, por lo tanto, para un determinado flujo de trabajo se deberá considerar un recipiente de mayor volumen.
- c) La conversión alcanzada en las pruebas experimentales está alrededor de 85% y constituye una eficiencia operativa aceptable aun cuando el efluente final todavía contendrá cobre en, aproximadamente, 0.03 gramos de cobre por litro, es decir, 30 partes por millón (ppm).
- d) Para alcanzar estándares permitidos (1ppm),

puede optarse por una etapa siguiente de precipitación o un proceso de absorción con resinas de intercambio iónico que si pueden captar todo el cobre remanente en ese caso.

#### V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Froment, G. (1990) *Chemical reactor analysis and design*. John Wiley & Son.
2. Fogler, H.S. (1999) *Elements of Chemical Reaction Engineering*. Prentice Hall, N. Jersey.
3. Levenspiel, O. (1999) *Chemical Reaction Engineering*. John Wiley & son, USA.
4. Smith, J.M. (1979) *Ingeniería de la Cinética Química*. CECSA, México.
5. J.M. Santamaría - J. Herguido. (1994) *Ingeniería de reactores*, Madrid, Síntesis.
6. Luiz, A.C.; Texeira, Cianide. *Destrucción by Chemical oxidation. Effluent treatment*. Universidad de Concepción, Chile