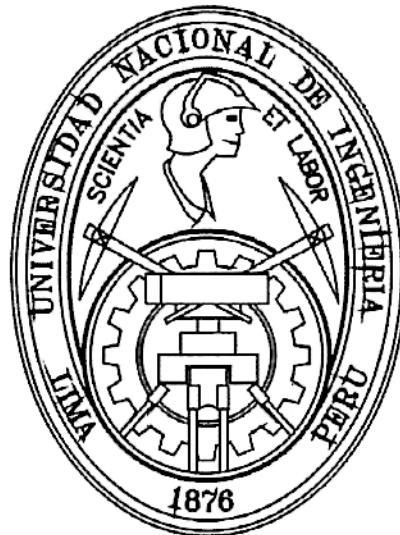


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA

SECCION DE POS GRADO



**CEMENTACIÓN DE PLOMO CON HIERRO  
EN SOLUCIONES CLORURADAS**

**TESIS**

PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN:

**INGENIERÍA METALÚRGICA**

PRESENTADO POR:

**MANUEL RUBÉN GUERREROS MEZA**

LIMA - PERÚ

2006

## ÍNDICE

**AGRADECIMIENTO**

**RESUMEN**

**SUMMARY**

### CAPÍTULO I

#### INTRODUCCIÓN

<b>1.1</b>	<b>Planteamiento del problema.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Antecedentes del problema.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Alternativa propuesta.....</b>	<b>21</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos de la investigación .....</b>	<b>23</b>
<b>1.5</b>	<b>Hipótesis .....</b>	<b>24</b>

### CAPÍTULO II

#### EXTRACCIÓN DE PLOMO DEL CONCENTRADO DE MINERAL

##### SULFURADO DE PLOMO

<b>2.1</b>	<b>Proceso pirometalúrgico del plomo .....</b>	<b>25</b>
	2.1.1 Lechos de fusión – aglomeración .....	26
	2.1.2 Fundición del plomo .....	26
	2.1.3 Refinería de plomo .....	27
<b>2.2</b>	<b>Emisiones producidas en el proceso pirometalúrgico .....</b>	<b>27</b>
	2.2.1 Emisiones gaseosas.....	28
	2.2.2 Aguas residuales .....	29
	2.2.3 Desechos sólidos .....	29
<b>2.3</b>	<b>Tecnologías emergentes para el tratamiento de concentrados de plomo.....</b>	<b>30</b>

2.3.1 Nuevos procesos de fundición de plomo .....	33
2.3.1.1. Proceso QSL.....	34
2.3.1.2. Proceso ISASMELT/AUSMELT .....	36
2.3.1.3. Proceso KYVCET .....	38
2.3.1.4. Proceso KALDO-TBRC.....	40
2.3.1.5. Proceso OUTOKUMPU.....	42
2.3.1.6. Comparación de los nuevos proceso pirometalúrgicos.....	44
2.3.2 Lixiviación de minerales de sulfuro de plomo .....	46
2.3.2.1 <i>Proceso de lixiviación con cloruro férrico y electrólisis             (U.S. BUREAU OF MINES PROCESS)</i> .....	48
2.3.2.2 <i>Proceso de cloruración, lixiviación y electrólisis             (CYMET)</i> .....	51
<b>2.4 Recuperación del metal de soluciones acuosas .....</b>	<b>54</b>
2.4.1 Cementación.....	54
2.4.1.1 <i>Proceso de cementación</i> .....	54
2.4.1.2 <i>Electroquímica de la cementación</i> .....	57
2.4.2 Cinética de la cementación.....	61
2.4.2.1 <i>Polarización</i> .....	61
2.4.2.2 <i>Causas de la polarización</i> .....	64
2.4.2.3 <i>Diagrama de Evans</i> .....	73
2.4.2.4 <i>Cinética electroquímica</i> .....	75
2.4.2.5 <i>Control cinético en sistemas de cementación</i> .....	77

## CAPÍTULO III

### INVESTIGACIÓN ELECTROQUÍMICA DE CEMENTACIÓN DE PLOMO

#### CON HIERRO EN SOLUCIONES CLORURADAS

<b>3.1</b>	<b>Parte experimental .....</b>	<b>84</b>
	3.1.1 Metodología.....	84
	3.1.2 Procedimiento experimental.....	86
<b>3.2</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>88</b>
	3.2.1 Potencial de circuito abierto.....	88
	3.2.1.1 <i>Evaluación de resultados.....</i>	<i>90</i>
	3.2.1.1.1 <i>Evaluación del potencial de reposo de electrodo de Acero 1020.....</i>	<i>90</i>
	3.2.1.1.2 <i>Evaluación del potencial de reposo para diferentes electrodos.....</i>	<i>90</i>
	3.2.1.1.3 <i>Evaluación del potencial de reposo - electrodo de plomo y acero 1020.....</i>	<i>91</i>
	3.2.2 Diagramas de polarización .....	93
	3.2.2.1 <i>Evaluación de resultados.....</i>	<i>98</i>
	3.2.2.1.1 <i>Polarización del electrodo de acero 1020.....</i>	<i>98</i>
	• <i>Efecto del pH.....</i>	<i>98</i>
	• <i>Efecto de la concentración del cloruro de plomo .....</i>	<i>98</i>
	• <i>Efecto de la temperatura.....</i>	<i>99</i>
	• <i>Efecto de la velocidad del disco rotatorio... 99</i>	
	3.2.2.1.2 <i>Evaluación de la polarización para diferentes</i>	

electrodos.....	100
3.2.2.1.3 Evaluación de la polarización del electrodo de hierro fundido .....	100
3.2.2.1.4 Efectos en la polarización del electrodo de plomo .....	101
• Efecto del pH.....	101
• Efecto en la concentración del cloruro de plomo .....	102
• Efecto de la velocidad del disco rotatorio	102
• Efecto del ión férrico .....	102
<b>3.2.3 Diagramas E- log i .....</b>	<b>103</b>
3.2.3.1 Evaluación de resultados.....	110
3.2.3.1.1 Diagramas <b>E – Log i</b> para electrodo de acero 1020.....	110
• Efecto del pH .....	111
• Efecto de la concentración del cloruro de plomo .....	111
• Efecto de la temperatura.....	112
• Efecto de la agitación.....	112
3.2.3.1.2 Diagramas <b>E – Log i</b> para el electrodo de plomo .....	112
• Efecto e la concentración del ión Fe <sup>3+</sup> .....	113
• Efecto de la concentración del cloruro	

	<i>de plomo</i> .....	113
	• <i>Efecto de la velocidad del disco rotatorio</i> .....	114
	• <i>Efecto del pH</i> .....	114
	3.2.3.1.3 <i>Evaluación para diferentes electrodos</i> .....	114
3.2.4	Diagramas de Evans .....	115
	3.2.4.1 <i>Evaluación de Resultados</i> .....	116
3.2.5	Diagramas de potencial mixto .....	117
	3.2.5.1 <i>Evaluación de resultados</i> .....	120
	3.2.5.1.1 <i>Sistema plomo - hierro fundido</i> .....	120
	3.2.5.1.2 <i>Sistema plomo - Acero 1020</i> .....	120

## CAPÍTULO IV

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### CEMENTACION DE PLOMO CON HIERRO DE SOLUCIONES

##### CLORURADAS

<b>4.1</b>	<b>Aspectos termodinámicos</b> .....	<b>123</b>
	4.1.1 <i>Acción del ión férrico</i> .....	123
	4.1.2 <i>Acción del ácido</i> .....	123
<b>4.2</b>	<b>Aspectos cinéticos electroquímicos</b> .....	<b>124</b>

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>126</b>
------------	---------------------------	------------

<b>5.2 RECOMENDACIONES .....</b>	<b>129</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>130</b>
<b>APENDICES:</b>	
<b>Apéndice A1 Tabla de datos de la figura N°3.1 POTENCIAL DE DIFERENTES ELECTRODOS .....</b>	<b>136</b>
<b>Apéndice A2 Tabla de datos de la figura N°3.2 POTENCIAL DE REPOSO ELECTRODOS: ACERO 1020 Y PLOMO .....</b>	<b>145</b>
<b>Apéndice A3 Tabla de datos de la figura N° 3.5 electrodo de acero 1020 efecto de la temperatura .....</b>	<b>154</b>
<b>Apéndice A4 Tabla de datos de la Figura N°3.6 Electrodo de Acero1020 Efecto de la velocidad de agitación.....</b>	<b>156</b>
<b>Apéndice A5 Tabla de datos de la Figura N°3.10 Electrodo de plomo efecto del pH .....</b>	<b>159</b>

## RESUMEN

En nuestro país, la minería es muy importante en el desarrollo de la economía. Por lo que es necesaria una industria minera que asegure la producción, suministro de minerales y metales para su desarrollo. Sin embargo, los procesos tradicionales de tratamiento de los concentrados de minerales de plomo son: la tostación, la fusión y la refinación; si bien son eficientes dañan la atmósfera contaminando con emisiones gaseosas principalmente con bióxido de azufre y otras impurezas. La necesidad de minimizar la contaminación del medio ambiente ha impulsando el desarrollo de procesos hidrometalúrgicos alternativos capaces de procesar concentrados con menos contaminación que los procesos pirometalúrgicos. Entre los procesos emergentes, la lixiviación en medios clorurados, muestran las mejores expectativas de aplicación industrial. En consecuencia la recuperación económica de metales de menas pobres y de las complejas puede mejorarse en base a la hidrometalurgia.

En el trabajo de Tesis se desarrolló la investigación electroquímica de la cementación del plomo en medios clorurados. El objetivo principal es analizar el mecanismo de la reacción de reducción del plomo sobre partículas de hierro empleando los fundamentos de la cinética electroquímica, en base a las reacciones anódicas y catódicas que ocasionan diferencias de potenciales en la superficie del electrodo. Para el desarrollo de la investigación se ha empleado el equipo de Sistema Electroquímico Voltalab 21, que básicamente consta de un



potenciostato/Galvanostato PGP201 DE 20v/10<sup>a</sup> con generador de señal, cables de conexión para la celda, software electroquímico Volta Master 4. Con la ayuda de los diagramas de Evans y el método de las pendientes de Tafel se han determinado los potenciales mixtos y las densidades de corriente de intercambio o corrosión. Obteniéndose como resultado para el sistema plomo-acero 1020 valores de logaritmo de la densidad de corriente:  $i_{corr} = -2.6 \text{ A/cm}^2$  y el potencial de corrosión:  $E_{corr} = -0.159\text{V vs SHE}$  y las mejores condiciones operativas fueron de pH:1.5, velocidad de agitación:200RPM, temperatura 90°C y concentración de cloruro de plomo 0.05 M. A partir de los resultados obtenidos llegamos a la conclusión que es factible implementar el circuito de cementación de plomo con hierro en la lixiviación de concentrados de sulfuro de plomo.

## SUMMARY

In our country, the mining is very important in the economy. Consequently its needs a mining industry that assures the production, provision of minerals and metals for its development. Nevertheless, the traditional processes of treatment of the lead mineral concentrated ones are: the roasting, smelting and refining; although they are efficient, they damage the atmosphere mainly contaminating with gaseous emissions with sulphur dioxide and other impurities. The necessity to diminish the contamination of the environment has continued impelling the development of alternative hydrometallurgical processes able to process concentrated with less contamination than the pyrometallurgical processes. Between the emergent processes, the processes on the leaching in chloride means, show industrial application expectation. Consequently the economic metal recovery of poor minerals and the complex ones by traditional methods can be improved on the basis of hydrometallurgy.

In the Thesis work the investigation referring to the electrochemical studies of chloride means cementation of the lead in average was developed. The primary target is to analyze the reduction mechanism of the lead on iron particles being using the foundations of the electrochemical kinetic, on the basis of the anodic and cathodic reactions that cause differences of potentials in the surface of the electrode. For the development of the investigation the equipment of Electrochemical System Voltalab 21 has been used, that basically consists of a potenciostato/Galvanostato PGP201 OF 20v/10<sup>a</sup> with signal generator, cables of connection for the cell,

electrochemical software Volta Master 4. With the aid of the diagrams of Evans and the method of slopes of Tafel the mixed potentials and the densities of interchange or corrosion have been determined. Obtaining like result for the system seal with lead-steel 1020 values of traffic log density:  $i_{corr} = -2.6 \text{ A/cm}^2$  and the corrosion potential:  $E_{corr} = -0.159\text{V}$  vs SHE and the best operative conditions was of pH:1.5, speed of agitación:200RPM, temperature  $90^{\circ}\text{C}$  and lead chloride concentration 0,05 M. From the obtained results we reached the conclusion that is feasible to implement the circuit of lead cementation with iron in the leaching of concentrated of lead sulphide.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los avances en la hidrometalurgia se viene aplicando cada vez más para la producción de metales en el mundo, no sólo por sus impresionantes resultados sino también porque se está constituyendo en el medio acertado para hacer frente a los crecientes costos energéticos de extracción y a las restricciones de contaminación del medio ambiente impuestas a las empresas mineras; consecuentemente las tecnologías tradicionales de extracción y beneficio están atravesando por un periodo de innovación y desarrollo.

Existen varias razones para ello. Las reservas de minerales ricos de algunos productos están disminuyendo rápidamente, lo que significa que hay que explotar yacimientos más pobres y procesar el mineral que se extrae de ellos para satisfacer la demanda del mercado.

Una razón es económica debido a las cíclicas alzas y bajas en la cotización de los metales generados por el incremento del consumo de nuevos materiales, por consiguiente se requieren métodos más ingeniosos para obtener rentabilidad de los yacimientos mineros de baja calidad.

En la actualidad, el aumento de restricciones y regulaciones ambientales, exige el manejo cuidadoso de las emanaciones contaminantes, impulsando a solucionar los desafíos tecnológicos a corto y largo plazo a fin de remover y neutralizar los desechos nocivos investigando nuevas tecnologías limpias en la industria minera, que desarrollan en procesos que minimicen o impidan las emisiones contaminantes.

Diversos trabajos de investigación se han desarrollado con la finalidad de dar solución a los problemas ambientales generados en la extracción pirometalúrgica de los metales sin embargo aun no se ha encontrado una solución efectiva. Estas dificultades obligan a buscar nuevas alternativas como el tratamiento de los concentrados de minerales por la vía hidrometalúrgica por ejemplo la lixiviación de concentrados de sulfuro de plomo y obtener por cementación el metal

como producto final.

El interés en la hidrometalurgia para el tratamiento de concentrados se debe básicamente a la actual preocupación por controlar la contaminación ambiental producida por las fundiciones y al aumento creciente de la demanda de metales unida a una disminución de leyes, acentuación de la complejidad de minerales y concentrados que hacen bajar la eficiencia, y por lo tanto la economía, de los procesos convencionales.

La lixiviación de sulfuros, en condiciones adecuadas de oxidación, produce como subproducto azufre elemental que puede almacenarse, transportarse y convertirse en ácido sulfúrico cuando se necesite. En cambio, el anhídrido sulfuroso producido en las fundiciones de concentrados debe convertirse directamente en ácido sulfúrico para su eliminación; esto provoca problemas cuando no existe la necesidad de ácido en el mismo lugar o cerca de la fundición. Actualmente se carece de un método económico para transformar directamente el anhídrido sulfuroso a azufre elemental, además la recuperación total de anhídrido-sulfuroso es costosa, especialmente de los gases diluidos de los hornos.

La necesidad de disponer nuevas tecnologías de tratamientos de minerales que de lo contrario no podrían explotarse eficazmente es de crítica importancia. En el caso de los metales no ferrosos, la hidrometalurgia comienza a modificar una situación que antes era

desalentadora. Indudablemente los nuevos métodos de metalúrgia extractiva permiten tratar económicamente las menas pobres y los residuos de operaciones previas.

## 1.2 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

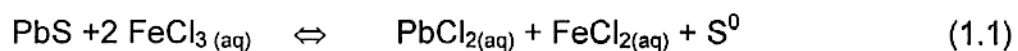
La lixiviación clorurante está recibiendo considerable atención por ser más rápida y completa en el tratamiento de concentrados, uno de los reactivos es el cloruro férrico que es utilizado como un agente lixivante para la disolución de la Calcopirita en el que el azufre elemental se forma, mientras que el cloruro de cobre y el cloruro ferroso permanecen en solución.

La disolución de minerales sulfurados de plomo en soluciones de ácido clorhídrico ha sido desarrollado por Sherman and Strickland (42), con el inconveniente de que éstos originan la emanación de cloro y sulfuro de hidrógeno. Trabajos de investigación de la recuperación del plomo de concentrados empleando tostación clorurante y lixiviación también ha sido desarrollado por Tolley y Stauter (48) el proceso combina la operación de cloruración en seco, lixiviación con cloruro de sodio y electrólisis para obtener plomo puro.

Morizot y Winter (27) (Departamento Mineralúrgic, Bureau de Recherches, Geologiques et Minières), han desarrollado un proceso hidrometalúrgico empleando la volatilización y cloruración con cloruro

de calcio de minerales complejos concentrados. Andersen y Boe (2) han estudiado la lixiviación oxidante y clorurante de concentrados de sulfuros complejos.

El proceso de lixiviación y electrólisis para la recuperación de plomo de concentrados de galena han sido publicados por US Bureau Of Mines. (18, 19,20). En el proceso el concentrado es lixiviado en cloruro férrico y cloruro de sodio a 95°C de acuerdo a la siguiente reacción:

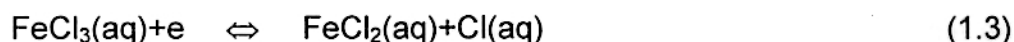


Los resultados muestran que en 20 minutos el 98% de Pb es extraído como cloruro de plomo que luego es cristalizado, secado y tratado en la sección de electrólisis en el que se emplea cloruro de plomo, cloruro de litio para la electrólisis de sales fundidas. La celda opera a 450°C y el cloruro de Pb forma plomo metálico en el cátodo y cloro gaseoso en el ánodo.

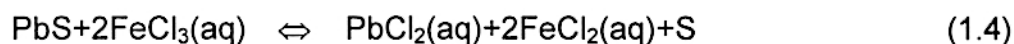


Por consiguiente la química de la solución clorurada es de especial interés para la hidrometalurgia del plomo por la gran solubilidad del cloruro de plomo a temperatura mas elevada que la del ambiente. La galena reacciona anódicamente, como se ilustra en las reacciones de media celda ecuación (1.2). Esta reacción puede ser originada por el par de reducción catódica del cloruro férrico.





Resultando en general la ecuación estequiométrica



El plomo en la solución forma una serie de complejos de cloruros  $\text{PbCl}_y$ , dependiendo de la cantidad de exceso de  $\text{Cl}^-$  en la solución. Palmer (1983) y Dutrizac (1985) han elaborado la siguiente ecuación cinética de reacción de difusión de Fick para partículas isométricas.

$$1 - (2/3)\alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = (K_p / d_0^2)t \quad (1.5)$$

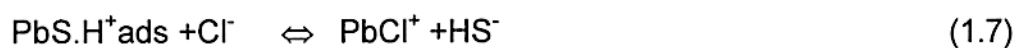
Donde:  $\alpha$  es la fracción de plomo lixiviado,  $d_0$  es el diámetro de la partícula inicial,  $t$  es el tiempo, y  $K_p$  es la velocidad en  $\text{cm}^2/\text{segundos}$ . Resultando que los valores de  $K_p$  aumentan con el incremento de la concentración del cloruro férrico llegando a ser independiente de la concentración del cloruro férrico por encima de 0.2M.

Dutrizac (1985) ha demostrado un cambio similar en el control encontrando que  $K_p$  es independiente de la concentración de cloruro férrico, para concentraciones mayores que 0.1M en ausencia de NaCl. En concentraciones altas de  $\text{Fe}_2\text{Cl}_3$ , disminuye linealmente con el incremento de la concentración de  $\text{PbCl}_2$ . Estos resultados sugieren que la etapa controlante es la difusión a velocidades bajas del cloruro férrico a través de la capa de azufre hacia los poros internos y hacia fuera de la difusión del cloruro de plomo a alta velocidad.

La energía de activación fue calculada en 16kJ/mol (4kcal/mol) que es consistente con el modelo de poro difusional.

La disolución directa de la galena, tiene dos ventajas comparado a la lixiviación con cloruro férrico. La reacción es rápida seguida de una cinética lineal (Scout y Nicol, 1976; Awukura, Kamei and Majita, 1980), y el proceso consigue llevarse a cabo en soluciones de bajas concentraciones de hierro. Una ventaja importante es la selectividad de la galena en la presencia de otros minerales sulfurados, y la mayor desventaja es la formación de ácido sulfhídrico.

El modelo de lixiviación no oxidativa propuesta por Awakura, Kamei y Majima (1980) incluye la absorción del  $H^+$  seguido de una reacción de superficie.



Próseguido por la formación de complejos  $PbCl_y$ , dependiendo de la composición de la solución.

En el caso de concentrados de plomo, la galena es el mineral más abundante e importante, por consiguiente, es conveniente adoptar y aplicar estos conocimientos al tratamiento de los concentrados de plomo producidos en el país. Sin embargo, esto no resultará tan similar debido a la complejidad en la composición mineralógica de los yacimientos resultando la investigación necesaria para modificar los

procesos de lixiviación clorurante propuestos por varios investigadores, entendiéndose que los resultados serán efectivos también en el caso de otros sulfuros.

### 1.3 ALTERNATIVA PROPUESTA

Debido a las características propias de los procesos pirometalúrgicos, éstas generan grandes interacciones en el medio ambiente produciendo elementos contaminantes de bióxido de azufre, vapor y partículas finas de metales. Estos problemas ecológicos, han incentivado en las últimas décadas el desarrollo de alternativas hidrometalúrgicas para el tratamiento de minerales sulfurados, específicamente el interés de entre los procesos emergentes, la lixiviación en medios clorurados de los concentrados de plomo muestran expectativa de aplicación industrial, que se ven favorecidos por las siguientes razones:

- En condiciones adecuadas de oxidación se obtiene como subproducto azufre elemental, que puede almacenarse, transportarse y convertirse en  $H_2SO_4$  al ritmo y en la proporción que se necesite.
- Se solubiliza una pequeña fracción de la mena, dejando el resto sin reaccionar, lo cual hace que el costo de arrastrar materiales inertes a través del proceso sea comparativamente mucho menor

que en una fundición de plomo.

- Ha aumentado la disponibilidad de reactivo, simultáneamente se ha mejorado los métodos de regeneración; ocurriendo lo mismo con los materiales especiales resistentes a la corrosión.

No obstante los estudios realizados de lixiviación de los concentrados de plomo en medios clorurados del que se obtiene de la solución purificada, el cloruro de plomo y por electrolisis en baño de sales fundidas el propio metal, no es factible aun su aplicación industrial. Sin embargo la atención se dirige hacia la adaptación de otros medios de reducción del metal.

De la gran variedad de métodos de obtención a partir de soluciones diluidas del metal correspondiente, la cementación de plomo se presenta como una alternativa de los procesos convencionales en un futuro cercano. Su desarrollo, aunque no signifique un desplazamiento total de otros métodos, habrá contribuido, sin duda, a lograr, aunque sea en parte, la meta ideal de la metalurgia extractiva, es decir la recuperación total de los compuestos valiosos de una mena, sin producir residuos nocivos para el medio ambiente y de una manera económicamente atractiva incrementando la aplicación de los modernos procesos hidrometalúrgicos.

A pesar del gran interés por encontrar el proceso hidrometalúrgico ideal para concentrados de plomo y las numerosas aplicaciones

industriales de lixiviación de minerales sulfurados, todavía falta mucho por conocer respecto a la cinética y a los mecanismos del proceso. Mas aun el estudio a temperatura mas elevada del ambiente, se ve dificultada por la escasez de datos disponibles en la literatura.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Con la finalidad de emplear tecnologías limpias para reducir en lo mínimo la contaminación ambiental en la obtención hidrometalúrgica del plomo; el trabajo de investigación se orienta a los siguientes objetivos:

### **1.4.1 Objetivo general**

Determinar los potenciales de circuito abierto, construir diagramas de polarización y potenciales mixtos a partir de las pendientes de tafel derivadas de los diagramas de Evans de la cementacion del plomo en hierro en soluciones cloruradas.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

a.- Estudiar la precipitación de plomo a partir de soluciones cloruradas y posteriormente se puede desarrollar el proceso integral de obtención del plomo a partir de sus concentrados por la vía hidrometalúrgica.

- b.- Determinar el mecanismo que rige la cementación.
- c.- Descubrir la formación de películas pasivantes en la interfase metal solución.
- d.- Evaluar el efecto del ion férrico.

## 1.5 HIPÓTESIS

La investigación de la cinética electroquímica de la cementación de plomo con hierro en soluciones cloruradas, establecerá los fundamentos cinéticos del proceso y su interacción con los compuestos presentes en la solución.

por técnicas electroquímicas por el tiempo empleado y además es de gran utilidad para el reconocimiento rápido y comparativo de potenciales de electrodos de diferentes metales.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Profundizar el estudio del proceso integral hidrometalúrgico para el tratamiento de minerales sulfurados de plomo.
- Establecer los parámetros de escalamiento a nivel piloto a partir de la presente investigación.
- Evaluar el proceso hidrometalúrgico y cementación del plomo para diferentes yacimientos de nuestro país.
- Investigar la posibilidad del empleo de extracción por solventes para iones plomo en soluciones cloruradas
- Experimentar la etapa de electrodeposición del plomo a partir de soluciones cargadas.
- Difundir las experiencias electroquímicas realizadas en este trabajo de tesis.
- Con los datos de este trabajo, se recomienda ampliar otros estudios para determinar parámetros cinéticos adicionales.
- Evaluar la influencia de iones plata en el proceso de cementación de plomo en medios clorurados.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

- La cementación de plomo en acero 1020 es un proceso electroquímico espontáneo.
- Los sitios anódicos pueden formarse alrededor de la superficie del hierro el cual explica como la pieza de metal entera puede ser consumida
- La mayor solubilidad de los cloruros respecto a los sulfatos permiten obtener soluciones más concentradas
- Existe la posibilidad de obtener plomo al estado elemental por lo



cual es importante conocer la cinética, termodinámica, desarrollo del proceso integral de lixiviación, purificación de soluciones y cementación.

- Las técnicas electroquímicas aportan información valiosa para estimar el grado de avance y pasivación en el proceso de cementación, con lo que es posible realizar diagnósticos confiables que permitan tomar medidas adecuadas para el desarrollo del proceso.
- La influencia del ión férrico es determinante en el aspecto termodinámico y cinético en la cementación del plomo.
- Fue posible corroborar dos condiciones experimentales que ya se habían observado: a mayor cantidad de agente corrosivo mayor velocidad de corrosión, y la presencia de picaduras durante los procesos de corrosión que no se consideran en el cálculo de la misma, conducen a una subestimación en la magnitud de la velocidad de corrosión.
- La presencia del ión férrico produce un descenso favorable en el potencial de corrosión del hierro.
- La presencia de cloruros aumenta la cinética de disolución del acero 1020, tienden a producir picaduras y otras formas de corrosión localizada. Por esto, las pruebas electrolíticas en soluciones halogenadas son más corrosivas.
- En las soluciones conteniendo cloruros, si se alcanza el potencial de

picadura se producen averías en la capa protectora de óxido, dando origen a corrosión localizada o por picadura. Hay una relación definida entre este potencial de ruptura y el contenido de cloro en la solución. El potencial de picadura depende del pH y del contenido de cloro, el potencial de protección es independiente de ambos.

- Si el potencial de picadura se extiende en la superficie de hierro, en una solución conteniendo cloruros debido a la presencia de oxígeno, la picadura formada induce un área ácida en el sistema.
- La velocidad de disolución del acero 1020 en medios clorurados se incrementa con el aumento de la temperatura.
- La velocidad observada para el acero 1020 a temperatura ambiente (20°C - 22°C) es baja como para ser empleado en los procesos que involucren su uso.
- La lixiviación de las menas complejos de sulfuro de plomo en medios clorurados ofrece una alternativa interesante desde el punto de vista tecnológico, frente a procedimientos convencionales de extracción pirometalúrgico, especialmente si buscamos procesos ecológicamente viables.
- Las mejores condiciones operativas para la cementación de plomo en acero 1020 de soluciones cloruradas: pH = 1.5, velocidad de agitación 200 rpm, temperatura 90°C y concentración de cloruro de plomo de 0,05 M.
- *Es conveniente evaluar la cinética de un proceso electroquímico*

## BIBLIOGRAFÍA

1. Adcock, P.A. and Adeloju S.B.  
***Measurement of polarization parameters impacting on electrodepositing morphology***; Theory and development of technique; Journal of Applied Electrochemistry 32: 1101-1107.2002 kluwer Academic Publisher. Netherlands.
2. Andersen E., Boe, G.H., Danielssen, T & Finne P.M.  
***Production of base metals from complex sulphide concentrates by the ferric chloride route in a small, continuous pilot plant***; Elkem-Center, Kristiansand, Norway IMM, Inglaterra 1980.
3. Andrea, E. Álvarez y Daniel, R. Salinas.  
***Electrodeposición de Zn. sobre hopg en presencia de gelatina***; Inst. De Ing. Electroquímica y Corrosión. Dpto. de Ing. Química, Universidad Nacional del Sur, Argentina 2003.
4. Balberyszski, T. & Ibagos, L.  
***Optimization of process parameters for a continuous copper cementation system***; International Symposium on Hydrometallurgy, Chicago, Illinois USA. 1973.
5. Barth, H., Gans, W. & Knacke, O.  
***An experimental contribution to the kinetics of cementation***; International Symposium on Hydrometallurgy, Chicago, Illinois USA. 1973.
6. Biswas, A.K. and Reid, J.G.  
***Investigation of the cementation of copper on iron***; Seminar on copper cementation, JUNAC. Lima Perú Jan. 1978
7. Biswas, A.K. and Reid, J.G.  
***Copper reduction from solution with copper sponge***; Seminar on copper Cementation, JUNAC. Lima Perú Jan. 1978
8. Bobeck, G.E. and Su, H.  
***The kinetics of dissolution of sphalerite in ferric chloride solution***; in Metallurgical transactions B Volume 16B, September 1995 EE.UU.
9. Bockris, John O'M., Amulya, K.N. Reddy.  
***Electroquímica moderna*** Volumen 1 y 2 Editorial Reverté S.A. España 1980

10. Costa, José M.  
***Fundamentos de electródica, cinética electroquímica y sus aplicaciones***; Ed. Alambra España 1981.
11. Cotterill, Cigan (Editors).  
***Extractive metallurgy of lead and zinc***; Aime World Symposium on Mining & Metallurgy of lead & zinc Volume II EE. UU. 1986
12. Crundwell, F.  
***The influence of the electronic structure of solids on the anodic dissolution and leaching of semi conducting sulphide minerals***; Hydrometallurgy, vol 21 (1998), pp. 155-190
13. Dean Mussatti, Jenifer Mager and G.P. Martins.  
***Electrochemical aspects of the dissolution of gold in cyanide electrolytes containing lead***; Department of Metallurgical and Materials Engineering, Colorado School Mines, Golden CO 80401 1995 EE.UU.
14. Ensinger, W. J.  
***Introduction into basic phenomena of electrochemical corrosion and measurement techniques***; Ruprecht – Karls- Universität Heidelberg Germany 1985.
15. Giuseppe Bianchi, Francesco Maza.  
***Corrosione e protezione dei metalli***; Masson Itália Editori Divisione scientifica Tamborile. Itália 1979.
16. Guerreros Meza, Manuel Rubén.  
***Cementación de plomo con hierro en soluciones cloruradas***; Pontificia Universidad Católica del Perú; Sección de Ingeniería de Minas, Laboratorio de Hidro-Electrometalurgia, [www.pucp.edu.pe/acad/Ciuf\\_metalurgia/](http://www.pucp.edu.pe/acad/Ciuf_metalurgia/); 2005 Perú.
17. Gonzáles, J. A.  
***Control de la corrosión, estudio y medida por técnicas electroquímicas***; CSIC. España 1989
18. Haung, D.H.H.; Twidwel D.L.G. and Miller D.J.D.  
***Hidrometallurgy vol i. ii.*** Ed. IMM. London, 1975.
19. Haver, F.P. and Elges C.  
USBM Report of Investigation 8166  
Recovery of lead from lead chloride by fused-salt electrolysis; EE.UU. 1976.

20. Haver, F.P. Wong, M.M.  
USBM Report of Investigation 8105,  
***Ferric chloride – brine leaching of galena concentrate***; EE.UU.  
1976.
21. Hiskey, J.B. & Wadsworth, M.E.  
***Procesos electroquímicos en la lixiviación de sulfuros y óxidos metálicos***; Process and Fundamental Considerations of Selected Hydrometallurgical Systems; Martín C, Kuhn, Editor; SME-AIME; New York, 1981. pp. 303-325.
22. Jun Li, Ting-Ke Zhong and Milton E. Wadsworth.  
***Application of mixed potential theory in hydrometallurgy***, in Hydrometallurgy, 29 (1992) 47-60, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
23. Miller, Jan D.  
***An analysis of concentration and temperature effects in cementation reactions***; Miner. Sci. Engng. Vol.5.Nº3, July 1973 EE.UU.
24. Miller, Jan D. and Beckstead, L.W.  
***Surface deposit effects in the kinetic of copper cementation by iron***; Metallurgical Transactions Volume 4 August 1973 EE.UU.
25. Miller, Jan D. and Parga, J.R.  
***Characterization and electrochemical analysis of gold cementation from alkaline cyanide solution by suspend zinc particles***; Hydrometallurgy, 24 (1990) The Netherlands.
26. Miller, J.D.  
***The signigance of electrochemistry in the analysis of mineral processing phenomena***; Seventh Australian Electrochemical Conference, The Univ. of New south Wales, Sidney February 1988.
27. Morizot, G.  
***Volatilization chloridization with calcium chloride of complex sulphide minerals and concentrates***; IMM, Inglaterra 1980.
28. Murphy, J.E. and Haver, F.P.  
USBM Report of Investigation 7913,  
***Recovery of lead from galena by a leach- electrolysis procedure***, EE.UU. 1974.

29. Murphy, J.E. and Chambers, M.F.  
USBM Report of Investigation 9335,  
***Production of lead metal by molten-salt electrolysis with energy efficient electrodes***, EE.UU. 1991.
30. Nadkarni, R.M. & Wasworth, M.E.  
***Kinetic study of the cementation of copper with iron***; paper  
Departament of Metallurgy university of Utah. Salt lake city, Utah U.S.A.
31. Niño, N.Y., Vera, E.  
***Crecimiento de películas plasmopolimerizadas en substratos de acero aisi 4140: estudio experimental de la respuesta a proceso de corrosión***; Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; revista Colombiana de Física, Vol.35, N°2,2003
32. Nicol, M. J. Needes, C.R.S.  
***A potentiostatic study of the anodic dissolution of uranium dioxide in aqueous solutions***; National Institute for Metallurgy, report n°1448 South Africa 1972.
33. Nicol M. J. Paul R. L., Diggle, J.W. & Saunders, A.P.  
***The electrochemical dissolution of galena in aqueous solutions***; National Institute for Metallurgy, Report N°1878 South Africa 1977.
34. Parga, J.R., Wan R.Y. & Miller, J.D.  
***Zinc – dust cementation of silver from alkaline cyanide solutions-analysis of merrill-crowe plant data***; Minerals and Metallurgical Processing August 1988 EE.UU.
35. Peters, E.  
***The physical chemistry of hydrometallurgy***; International Symposium on Hydrometallurgy, Chicago, Illinois USA. 1973.
36. Reynolds James E., Duane Goens & Charles W. Kenney,  
***Hazen Research, Inc.***  
***Pilot plant development of chloride processes for lead – zinc concentrates***; Lead –Zinc Update, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME). Golden Colorado July 21, 1977 EE.UU.
37. Ruiz, M.C., Honores, S. and Padilla, R.  
***Leaching kinetics of digenite concentrate in oxygenated chloride media at ambient pressure***; Metallurgical and materials Transactions B, volume 29B, Octubre 1998.

38. Schalch, E., Nicol, M.J., Diggle, J.W., Charlton, B.D. & Vaessen, J.P.H.  
***An electrochemical and kinetic investigation of the behavior of gold in chloride solutions***; National Institute for Metallurgy, Report N°1848 South Africa 1981.
39. Schalch, E., Nicol, M.J., Balestra, P.E.L., Stapleton, W.M.,  
***An electrochemical investigation of copper cementation on iron***;  
National Institute for Metallurgy, Report N°1799 South Africa 1976.
40. Schlitt, W.J., Richards K.J.  
***Chemical aspects of copper cementation***; Solution Mining  
Symposium, AIME, Dallas, Texas, Feb. 1974.
41. Schrebler Guzman, Ricardo.  
***Comportamiento potenciodinámico de electrodos de hierro en soluciones alcalinas***; Instituto de Investigaciones fisicoquímicas (INIFTA) 1978 Argentina
42. Sherman, M. And Strickland L.  
***Dissolution of lead sulfide ores in acid chloride solutions***; ***AIME Transactions 1957 VOL. 209 EE.UU.***
43. Sohn H.Y.,  
***kinetics of fluid-solids reactions in extractive metallurgy***; II  
Symposium Nacional de Ingeniería Metalúrgica, Noviembre de 1983  
Lima Perú.
44. Sohn H.Y., Wadsworth M.E.  
***Rate processes of extractive metallurgy***; ed. Plenum Press, New  
York, 1979.
45. Strickland, P.H. & Lawson, F.  
***The measurement and interpretation of cementation rate data***;  
International Symposium on Hydrometallurgy, Chicago, Illinois USA.  
1973.
46. Subagja, Rudi and Akio, Fuwa.  
***New hydrometallurgical process development for lead recovery from their minerals***;  
Waseda University, Tokyo Japan, Metallurgical Review of MMIJ, Vol. 5,  
N°2 (1988)
47. Thomas, A. Phillips.  
USBM Information Circular 8773,  
***Economic evaluation of a leach-electrolysis process for recovering lead from galena concentrate***; EE.UU. 1978.

48. Tolley W. And J. Stauter,  
***The recovery of lead from sulfide concentrates using a chlorination, brine leaching and electrolysis process***; Report UOP. INC. Illinois. 1980 EE.UU. Process and Fundamental considerations of Selected Hydrometallurgical Systems; Martin C. Kuhn, Editor; SME-AIME; New York, 1981,
49. Wang G. X., Fusternau M.C. & Marsden J.O.  
***Zinc cementation of eluates from carbon-adsorption system***; Mineral and metallurgical, processing, February 1996 EE.UU.
50. Wadsworth M. E.  
***Sulfide and metal leaching reactions***; Technical papers, Mining Engineering, June 1988
51. Wolfgang Forker.  
***Cinética electroquímica***; Ed. Universitaria de Buenos Aires Argentina 1971.
52. Zhang, H., Nicol, M.J., Staunton, W. P.  
***An electrochemical study of an alternative process for the leaching of gold in thiosulfate solutions***; Murdoch University Australia, 44<sup>o</sup> Annual conference of Metallurgist of CIMM Calgary, Alberta, Canada Edited by G. Deschênes, D. Hodouin and L. Lorenzen Canada 2005.