

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

MAESTRÍA DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA

**RECUPERACIÓN DE ZINC DE POLVOS DE ACERÍA POR
LIXIVIACIÓN SELECTIVA CON ÁCIDO FOSFÓRICO O
HIDRÓXIDO DE SODIO**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN METALURGIA

FERNANDO GABRIEL SÁNCHEZ RIVADENEIRA
fernando_fgsr@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVÍN Ph.D.
ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2023

© Escuela Politécnica Nacional (2023)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, FERNANDO GABRIEL SÁNCHEZ RIVADENEIRA, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía de los Conocimientos, Creatividad e Innovación COESC-, cedo los derechos patrimoniales de este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional.”

FERNANDO G. SÁNCHEZ RIVADENEIRA

CI: 1720550811

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Fernando Gabriel Sánchez Rivadeneira, bajo mi supervisión

Ing. Ernesto Hale de la Torre Chauvin Ph.D.

DIRECTOR DE TESIS

Auspicio

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PVIF-20-01, que se ejecutó en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria.

DEDICATORIA

A mis padres Jorge y Lucia, a mis sobrinos Saúl, Benjamín, Joaquín, Rafael y Camila, y a las personas que luchan por que los sueños se cumplan, aunque parezcan algo inalcanzables.

AGRADECIMIENTOS

Han sido dos años de estudio y mucho aprendizaje en el DEMEX y aquí va el agradecimiento para las personas que han estado presentes este tiempo.

A mis padres Jorge y Lucia por su apoyo desde el primer día que decidí tomar este camino de la metalurgia, porque me dieron sus palabras de aliento cuando lo requería, porque me han tenido paciencia y como los mejores padres supieron cuando presionarme y darme calma, porque me dieron el ejemplo de que trabajando se puede lograr muchas cosas, que se debe ser buena persona primero ante todo, a mis hermanos Jorge y Vladimir por estar pendientes de mí, darme el ejemplo a seguir y por darme la confianza de cuidar a sus hijos. A mis amados sobrinos Saúl, Benjamín, Joaquín, Rafael y Camila, porque llegaron a mi vida a darme tantas alegrías y enseñarme todos los días a ser un mejor tío Nando.

A mis abuelitas Carmen y María Santos, por estar junto a mi desde pequeño y ahora estar preocupadas porque me vaya bien, aconsejándome y motivándome cada día que las podía ver.

A mis tíos, Rosa, Anita, Amparito, Patricio, Javier, Adriana, Juan Carlos, Paulo, que me han ayudado siempre que han podido y me dan el ejemplo junto con mis padres que la familia está en todo momento pese a la distancia o desacuerdos.

A mis primos Roberto y Marco, con ellos me crie, porque me cuidaron desde pequeño y lo siguen haciendo, por su confianza en mí, su ayuda desde siempre y sus consejos, por permitirme compartir una cancha de futbol con ellos y por todo lo que siempre han hecho por mí.

A mis mejores amigos de la vida, Christian, Andrés, Taty y Belén, porque han sido mi apoyo en momentos de incertidumbre, han sido participes también de los mejores momentos y siempre han respondido un mensaje de ayuda, gracias a Dios que me los puso en mi camino y aún continúan conmigo. Porque son los mejores y les agradezco mucho el estar ahí. También a mis amigos del futbol de los jueves por ser un momento de relajación.

A dos personas que el DEMEX me los puso en el camino, Katy y Luis Andrés, supimos entendernos y llevarnos de la mejor manera, formamos una gran amistad, a los mejores poli amigos que me dio la poli por estar en momentos de sonrisas y en momentos de tristeza, por ser los mejores poli amigos, a Katy que hemos formado un gran equipo de trabajo, gracias por ser una amiga incondicional y tenerme paciencia.

Al DEMEX por recibirme de la mejor manera, es una gran familia y uno se siente a gusto yendo al DEMEX todos los días, como alguna vez lo dije tal vez sea mi lugar en el mundo, todos han sido tan buenas personas, me han dado la confianza para realizar mi investigación y también poder ayudar en lo que pueda, por su gran don de docencia y darme las mejores herramientas para poder culminar mi proyecto.

A la familia DEMEX, los y las inges, Eve, Verito, Klever, Ximena, Dianita, Ernesto, Ely, Carlitos y Eddy, a los estudiantes de la sala de tesis, Ali, Paulo, Luru, Daniel y un agradecimiento también a Wilmer por su gran colaboración y amistad en el laboratorio porque es una pieza fundamental en el DEMEX.

A la Doctora Alicia Guevara un agradecimiento especial porque sin ella no hubiera logrado este proyecto, su ayuda incondicional y paciencia infinita con mi persona, por su generosidad siempre y su guía en cada momento de estos dos años, que Dios le pague.

Al final de todo, un agradecimiento a todos por saber entenderme y aguantar mis silencios.

RECUPERACIÓN DE ZINC DE POLVOS DE ACERÍA POR LIXIVIACIÓN SELECTIVA CON ÁCIDO FOSFÓRICO O HIDRÓXIDO DE SODIO

Sánchez, Fernando

Departamento de Metalurgia Extractiva, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Resumen: Los polvos de acería generados por hornos eléctricos de fundición de acero son un peligro ambiental por el elevado contenido de metales como el zinc, hierro, plomo, entre otros, además por su reducido tamaño de partícula. Los polvos de acería se pueden valorizar por distintos métodos piro e hidrometalúrgicos. En el presente estudio se trabaja con polvos de acería que contienen 26,3% de Zn, 20,1% de Fe y 0,9 % de Pb en forma de compuestos como magnetita, zincita y franklinita principalmente. En este trabajo se propone recuperar el zinc por lixivitaciones ácidas (ácido sulfúrico y ácido fosfórico) y básicas (hidróxido de sodio), para una posterior recuperación de zinc metálico por electrólisis y fusión.

Los ensayos de lixiviación se realizaron en una y dos etapas, con y sin calentamiento a 80 °C. Las concentraciones de ácidos empelados fueron de 150 g L⁻¹ y para el hidróxido de sodio de 240 g L⁻¹. Los mejores resultados de la lixiviación alcanzan recuperaciones de 94% con ácido sulfúrico, 97% con ácido fosfórico y 80% con hidróxido de sodio, usando un proceso en dos etapas. La electrolisis con ánodo de grafito y cátodo de acero inoxidable brinda los mejores resultados de recuperación de zinc depositado en el cátodo que puede ser purificado por fusión hasta un 99% de pureza.

Palabras claves: polvos de acería, lixivitaciones ácidas y básicas, zinc ácido fosfórico.

ZINC RECOVERY FROM ELECTRIC ARC FURNACE DUST (EAFD) BY SELECTIVE LEACHING WITH PHOSPHORIC ACID OR SODIUM HYDROXIDE

Abstract: Electric Arc Furnace Dust (EAFD) is an environmental hazard due to their high content of metals such as zinc, iron, lead, among others, as well as their small particle size. EAFD can be valorized by different pyro and hydrometallurgical methods. In the present study, we work mainly with steel mill dust containing 26.3% Zn, 20.1% Fe, and 0.9% Pb in the form of magnetite, zincite, and franklinite compounds. The aim is to recover zinc by acid leaching (sulfuric acid and phosphoric acid) and basic leaching (sodium hydroxide), for subsequent recovery of metallic zinc by electrolysis and smelting.

The leaching tests are performed in one and two stages, with and without heating at 80 °C. The acid concentrations used are 150 g L⁻¹ and for sodium hydroxide 240 g L⁻¹. The best leaching recoveries were 94% with sulfuric acid, 97% with phosphoric acid, and 80% with sodium hydroxide, using a two-stage process and heating (80 °C). Electrolysis with graphite anode and stainless-steel cathode gives the best recovery results of zinc deposited on the cathode which can be purified by fusion to 99% purity.

Keywords: electric arc furnace dust, acid leaching, and basic, zinc, phosphoric acid.

1. INTRODUCCIÓN

Los polvos de acería generados por la fundición de chatarra de acero son considerados los residuos sólidos más contaminantes en la industria. Dutra et al. (2006), Halli et al. (2020) y Holappa (2017) estiman que se producen alrededor de 12 millones de toneladas de polvos de acería cada año. Sin embargo, más de la mitad de este material se envía a rellenos sanitarios, lo que genera una pérdida anual de más de un millón de toneladas de zinc, de acuerdo a Widi et al. (2020).

Durante el proceso de fundición, el zinc presente en la chatarra de acero se evapora, se oxida y, en forma de ZnO sólido, se transfiere a dispositivos que retienen los polvos de acería. En promedio, una tonelada de chatarra produce entre 15 y 25 kg de polvo de acería, con un contenido de zinc que varía entre el 15% y el 40%, según Guézennec et al. (2005) y Palimakaa et al. (2018). De acuerdo con Ostrowska & Mierzwa (2007), los polvos de acería también contienen otros elementos como cadmio, níquel, cromo, manganeso, carbón, estaño, antimonio

y cobre. Si estos residuos no son gestionados adecuadamente, podrían convertirse fácilmente en una fuente de contaminación de agua y suelos. Por ello, es necesario proponer alternativas para valorizarlos y aprovecharlos como materia prima de otros procesos (Halli et al., 2020).

Los polvos de acería generados en el horno de arco eléctrico son tratados mediante métodos pirometalúrgicos usando principalmente la tecnología Waelz para la concentración de óxido de zinc. Esto mediante la utilización de monóxido de carbono y otros agentes reductores como carbón, coque y otras fuentes de carbono, como indica Sinclair (2005). Sin embargo, el método Waelz produce una cantidad significativa de residuos que requieren otro tratamiento para su disposición final, como los afirman Mager et al. (2003) y Quijorna et al. (2014).

La tecnología actual para procesar los polvos de acería se enfoca principalmente en métodos pirometalúrgicos, los cuales implican trabajar con altas temperaturas para reducir el contenido de ZnO presente y oxidar el zinc en la fase gaseosa. El método predominante para procesar los polvos de acería es el proceso en el horno Waelz, el cual representa el 85% del mercado de recuperación de zinc (Stewart & Lead, 2015).

Debido al alto contenido de hierro que presentan estos materiales después del proceso de fabricación del acero, no siempre es posible recuperar el zinc presente usando los métodos hidrometalúrgicos tradicionales (Palimakaa et al., 2018). Sin embargo, el proceso hidrometalúrgico puede ser una alternativa prometedora para el reciclaje del zinc, siempre y cuando se controle adecuadamente la disolución del hierro durante el proceso (Oustadakis et al., 2010).

El tratamiento hidrometalúrgico de estos materiales es un método que presenta ventajas como el potencial de operación a menor escala, menores costos de transporte y menor inversión, así como una alta selectividad de recuperación de los metales de interés (Nakamura et al., 2008; Oustadakis et al., 2010; Tsakiridis et al., 2010). En particular, el uso de ácidos ha atraído la atención en la última década, ya que se han logrado altas recuperaciones de zinc mediante el uso de temperaturas elevadas, diferentes presiones o variaciones de la concentración de ácidos empleados. Además, este proceso tiene un bajo costo de operación en comparación con otros procesos alcalinos (Kelebek & Y, 2004; Lanzerstorfer, 2018; Sofilić et al., 2004; Wu et al., 2017).

La recuperación de zinc de los polvos de acería depende en gran medida de sus características, como por ejemplo el contenido de ferrita de zinc y el tamaño de partícula. Debido a la complejidad de su composición química ha sido difícil definir las condiciones del proceso de lixiviación para recuperar el zinc (Buzin et al., 2017; Havlik et al., 2005).

La lixiviación de los polvos de acería con ácido sulfúrico no es muy común, debido a las bajas recuperaciones de zinc que se obtienen, por esto se requiere el desarrollo de métodos selectivos y sostenibles para reciclar los polvos de acería, tomando en cuenta las características de la muestra, especialmente los altos contenidos de ferrita de zinc ($ZnFe_2O_4$,

franklinita), cuya presencia dificulta la recuperación de zinc (Havlik et al., 2005; Montenegro et al., 2013).

Los métodos hidrometalúrgicos pueden ser fácilmente escalables y ofrecen la posibilidad de procesar metales como hierro, plomo y cadmio (Halli et al., 2017). Sin embargo, es importante considerar que en los polvos de acería se encuentran generalmente franklinita, cincita y magnetita. La cincita y la magnetita no presentan problemas en la lixiviación ácida o alcalina, pero la ferrita de zinc es considerablemente refractaria a la lixiviación. Aunque la lixiviación alcalina parece ser ventajosa debido a la baja lixiviación de hierro, esta requiere altas concentraciones del medio lixivante alcalino (Youcai & Stanforth, 2000).

Si bien la lixiviación con ácido no requiere altas concentraciones en la solución, como lo necesita la lixiviación alcalina, en el primer caso el hierro se transfiere parcialmente a la solución. Después de la lixiviación ácida, el zinc restante se encuentra en forma de ferrita de zinc (Havlik et al., 2006; Sarma et al., 1976), lo que complica finalmente su extracción. La lixiviación con ácido sulfúrico, según las condiciones empleadas, disuelve la especie más reactiva de zinc, mientras que la mayor parte del hierro permanece en el residuo por la presencia de ferritas de zinc (Oustadakis et al., 2010).

En los últimos años, se ha modificado el proceso mediante el pretratamiento térmico de los polvos de acería. Esto ha dado lugar al procesamiento hidrometalúrgico del óxido de zinc, conocido como ENDUTECH/EZINEX (Maccagni, 2016). Recupac ha desarrollado una patente de reciclaje para extraer compuestos comerciales de hierro y zinc de los polvos de acería de horno de arco eléctrico mediante tecnología hidrometalúrgica probada. El hierro y el zinc se recuperan y el óxido de hierro se utiliza para fabricar pigmentos industriales. Aunque muchos procesos han sido desarrollados en laboratorios, escalas piloto o en mayor escala, no se han implementado en la industria por diversas razones, lo que ha retrasado su implementación por varios años (Xia, 1997).

El zinc se encuentra en estos polvos de acería en forma de ZnO y de $ZnFe_2O_4$, por tanto, el problema clave es cómo extraer el zinc de la ferrita de zinc y transferirlo a la solución. El óxido de zinc se lixivía fácilmente, pero la ferrita de zinc ($ZnFe_2O_4$) es una fase muy estable, lo que puede resultar en una baja recuperación de zinc (Mordoğan et al., 1999). Mejorando los métodos para el manejo de productos intermedios formados durante el tratamiento hidrometalúrgico, encaminados a reducir el contenido de zinc en los polvos de acería a un nivel que permita su reciclaje para su uso en la industria siderúrgica (Palimakaa et al., 2018).

Hasta el momento, la mayoría de los estudios sobre la lixiviación de polvos de acería han utilizado ácido sulfúrico e hidróxido de sodio como agentes lixiviantes. El ácido sulfúrico tiene varias ventajas, como una alta velocidad de disolución, disponibilidad y precios moderados. Además, es posible utilizar bajas concentraciones y combinarlo posteriormente con el proceso de electrolisis para obtener zinc metálico, con la regeneración del ácido empleado. Sin embargo, la principal desventaja de usar ácido sulfúrico como agente lixiviantes es

la falta de selectividad hacia otros metales presentes en los polvos de acería, especialmente hacia el hierro que a veces está presente en cantidades mayores que el zinc. Esto genera finalmente en un alto consumo de agentes lixiviantes necesarios para purificar la solución de grandes cantidades de hierro (Xia, 1997).

Un agente lixivante alcalino puede ser selectivo hacia el zinc sobre el hierro, lo que facilita la remoción de este del electrolito obtenido. Además, esta selectividad permite separar el plomo del zinc, lo que puede ser utilizado como un elemento intermedio adicional y materia prima para recuperar el metal. Sin embargo, una desventaja de este proceso es que se requieren altas concentraciones del lixivante para lograr una eficiente y significativa recuperación de zinc, lo que lo hace más costoso que el ácido sulfúrico y dificulta la recuperación de la solución (Palimakaq et al., 2018).

Investigaciones recientes (Palimakaq et al., 2018), emplean polvos de acería con un agente lixivante como el hidróxido de sodio y han demostrado una gran dependencia de algunos parámetros de lixiviación, como la temperatura y la concentración del hidróxido de sodio, que deben ser controlados para mejorar la eficiencia del proceso. Sin embargo, otros parámetros como el porcentaje de sólidos, el tamaño de partícula y la velocidad de agitación son relativamente insignificantes para la extracción eficiente de zinc en el proceso (Palimakaq et al., 2018).

Con estos antecedentes, en este estudio se busca determinar si las soluciones de ácido fosfórico o las de hidróxido de sodio resultan más eficientes para recuperar zinc por lixiviación. Es importante mencionar que se emplean estas dos alternativas, ya que el ácido fosfórico no ha sido previamente evaluado para la extracción de zinc de polvos de acería y en el caso del hidróxido de sodio, es necesario definir su selectividad de disolución de zinc frente al hierro. Las soluciones ricas en zinc obtenidas por lixiviación ácida y alcalina se llevarán a un proceso de cementación y posteriormente electrolisis para obtener zinc como producto final.

2. METODOLOGÍA

Para la evaluación de la recuperación de zinc de polvos de acería se empleó una muestra de alrededor de 100 kg de material tomados a la salida del horno eléctrico de una empresa de producción de acero ubicada en la zona de Lasso, (Cotopaxi, Ecuador). Con este fin se emplea la siguiente metodología:

2.1 Caracterización física, química y mineralógica del polvo de acería

La muestra de polvos de acería se secó, se homogenizó y se cuarteó en fracciones de 1 kg para los análisis y ensayos posteriores. La caracterización física incluye la determinación de la densidad aparente y real por la norma (NTE INEN-ISO8130-3) y de granulometría empleando el equipo Laser HORIBA LA 950 V2, con un índice de refracción para polvos de acería de 2,234.

En la caracterización química se determinó el contenido de elementos mayores (Si, Al, Fe, Ca, K, Mg) y menores (Cu, Zn, Ni, Cd, Pb) por fluorescencia de rayos X, en el equipo S8 Tiger AX15 (Bruker). La caracterización mineralógica se realizó mediante difracción de rayos X, en el equipo D8 Advance (Bruker).

2.2 Evaluación de la recuperación de zinc de polvos de acería por lixiviación ácida y básica

2.2.1 *Lixiviación ácida:* En estos ensayos se trabajó con 40 gramos de muestra de polvos de acería y se consideraron las siguientes variables para la lixiviación, propuestas previamente por Ricaurte et al., 2014; Widi et al., 2020:

a) *Lixiviación con ácidos una etapa.*

- Porcentaje de sólidos: 10 % y 20 %
- Concentración de ácidos fue de 150 g L⁻¹
- Tiempo de agitación: de 24 h y 72 h

b) *Lixiviación con ácidos en dos etapas*

- Luego de la primera etapa se filtrará y con el ripio seco se lixivía la segunda etapa.
- Porcentaje de sólidos: 10 %
- Concentración de ácidos: 150 g L⁻¹
- Tiempo de agitación: 5 h
- Temperatura de calentamiento: 80 °C

2.2.2 *Lixiviación básica con hidróxido de sodio:* En este caso la metodología de trabajo fue tomada y modificada de Palimakaq et al., 2018; Widi et al., 2020.

a) *Lixiviación con hidróxido de sodio sin calentamiento*

Se trabajó con soluciones de hidróxido de sodio y 40 gramos de muestra, bajo las siguientes condiciones de lixiviación en una sola etapa.

- Porcentaje de sólidos: 10 % y 20 %.
- Concentración de hidróxido de sodio: 150 g L⁻¹.
- Tiempo de lixiviación de 24 h y 72 h.

b) *Lixiviación con hidróxido de sodio con calentamiento en dos etapas.*

El estudio con hidróxido de sodio también se realizó en una etapa y en dos etapas para mejores recuperaciones de zinc y se emplearon las siguientes condiciones:

- Porcentaje de sólidos: 10 %, 20 %, 30 % y 40 %.
- Concentración de hidróxido de sodio: 240 g L⁻¹.
- Tiempo de lixiviación de 5 h.
- Temperatura de calentamiento 80 °C.

Al final de los ensayos de lixiviación se determinó el contenido de zinc en las soluciones fuerte y de lavado por absorción atómica (Equipo AAnalyst 300, Perkin Elmer). El zinc remanente en la muestra sólida se determinará por fluorescencia de rayos X.

Estos datos permitirán realizar el balance metalúrgico respectivo para establecer las mejores condiciones para la recuperación de zinc por lixiviación.

2.3 Evaluación de la recuperación de zinc por electrodeposición de las soluciones de lixiviación

Las soluciones ricas, obtenidas de los ensayos de lixiviación, se llevaron al proceso de recuperación de zinc por electrodeposición, previo a este proceso se realizó una cementación con polvo de zinc, encaminada a disminuir la concentración de metales como el hierro y el plomo que también pudieron estar presentes en solución. La cementación se hace a 60 °C, en una plancha de calentamiento y con agitación magnética, durante 2 horas.

Las variables empleadas para electrólisis fueron tomadas con algunas modificaciones de los trabajos realizados por Palimakaa et al., 2018; Ricaurte et al., 2014 y estas son:

- Intensidad de corriente: de 750 A m⁻² y 1000 A m⁻²
- Control de pH para evitar la dilución del zinc en el cátodo.
- pH para lixiviación ácida entre 0 - 2.
- pH para lixiviación con hidróxido de sodio, entre 9 - 11.
- Tiempo de electrodeposición: 0,5 - 2 h hasta el depósito el zinc en el ánodo.
- Ánodos de plomo, grafito y acero inoxidable.
- Cátodos de acero inoxidable

Considerando los estudios realizados por Palimakaa et al., 2018; Ricaurte et al., 2014, se utilizaron los electrodos de plomo (ánodo) y acero inoxidable (cátodo) para la obtención de zinc. Además, se realizó la combinación de electrodos ánodo y cátodo para electrodeposición como se puede ver en la Tabla 1.

El contenido de zinc remanente en solución luego del tiempo de electrodeposición se determinó por absorción atómica (equipo AA300, Perkin Elmer).

El zinc metálico depositado en el electrodo de acero inoxidable se secó, se lavó y se analizó por Difracción de Rayos X en el equipo D8 Advance (Bruker) y además se usó Fluorescencia de Rayos X en el equipo S8 Tiger AX15 (Bruker), esto con el fin de conocer la composición del zinc depositado y posteriormente purificarlo por fusión con cloruro de amonio y cloruro de potasio. El proceso de fundición se realizó a 450 °C durante 2 horas.

Tabla 1. Combinación de electrodos para electrólisis de solución de zinc.

Ánodo	Cátodo
Plomo	Acero Inoxidable
Acero Inoxidable	Acero Inoxidable
Grafito	Acero Inoxidable

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización, de lixiviación (ácida y básica) y de electrolisis para la recuperación del zinc.

3.1 Resultados de caracterización física, química y mineralógica de los polvos de acería

De acuerdo a Acero Garica, 2003, si la densidad aparente de los polvos de acería es baja (no es mayor a 1,5 g cm⁻³), los polvos tienen mayor cantidad de poros, lo que, en función de las condiciones empleadas, podría dificultar su manejo y procesamiento, así como afectar la eficiencia de las operaciones de lixiviación o electrolisis usadas para la recuperación del metal presente. Por otro lado, si la densidad aparente es alta, (entre 1,5 g cm⁻³ y 4 g cm⁻³), los polvos pueden ser más compactos y tener menos poros, lo que podría facilitar su manejo y procesamiento, pero también podrían requerir más energía para su tratamiento por su facilidad para aglomerarse entre partículas. En este estudio la densidad aparente obtenida para los polvos de acería es de 0,8 g cm⁻³, que es un valor bajo y podría darnos una idea de la dificultad del tratamiento de las soluciones de lixiviación y electrólisis. La densidad real fue de 3,22 g cm⁻³, que también se considera un valor intermedio que va a influir en la eficiencia de los procesos de mezcla y separación, en este caso no va a ser considerable el movimiento y la separación de partículas para el proceso de lixiviación.

En cuanto al tamaño de partícula, se encontró que el d₈₀ es de 5,4 µm, mientras que el d₅₀ fue de 2,5 µm. Si comparamos estos valores con los obtenidos por Lee et al. (2020), donde se tiene un d₅₀ de 10,6 µm, podemos decir que el tamaño de partícula de los polvos de acería usados en este trabajo es 4 veces más pequeño que el promedio presentado por Lee et al. (2020). Esto podría tener una influencia positiva en la velocidad de lixiviación del zinc, pero dificultaría la separación de la solución al final del proceso.

En cuanto a la caracterización química por FRX, se identificó que el polvo de acería contiene principalmente zinc (26,3%), hierro (20%), seguido de cantidades menores de calcio, magnesio, sodio y plomo como se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de caracterización química por FRX de polvos de acería

Elemento	Contenido (%)
Zn	26,3
Fe	20,0
Ca	3,7
Mg	3,4
Na	3,1
Pb	0,9
Al	0,3

En los estudios de Lee et al. (2020) y Halli et al. (2017) se ha encontrado que la composición de los polvos de acería es similar, con porcentajes de zinc y hierro entre 10 - 30%, y un contenido de plomo entre 2 - 10%. En el material estudiado en este trabajo, se encontró un contenido de zinc de 26,3%, una cantidad baja de plomo como 0,98% y prácticamente la ausencia de otros metales como arsénico, cromo, níquel y bismuto, lo que puede influir positivamente en los ensayos posteriores de lixiviación, ya que se tendrá una la solución rica en zinc sin contaminación elevada de plomo u otros metales.

La caracterización mineralógica por DRX reveló la presencia de magnetita (42%), zincita (38%) y franklinita (4%) como los compuestos más representativos en los polvos de acería, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultado de análisis por DRX de polvos de acería

Mineral	Fórmula	Contenido (%)
Magnetita	Fe ₃ O ₄	42
Zincita	ZnO	38
Halita	NaCl	8
Franklinita	ZnFe ₂ O ₄	4

Estos mismos compuestos han sido identificados en estudios previos como los de Halli et al. (2017), Lee et al. (2020), Oustadakis et al. (2010), Palimakaş et al. (2018) y Teo et al. (2018), lo que sugiere que la composición mineralógica de los polvos de acería, en general, es similar respecto a la presencia de franklinita, también llamada ferrita de zinc que es el componente más difícil de lixiviar, debido a su composición que tiene la presencia de hierro y zinc (ZnFe₂O₄) y tiene una estabilidad alta, lo que evita la disolución química (Borda et al., 2021), lo que genera reducciones en la recuperaciones de zinc.

3.2 Resultados de la evaluación de la recuperación de zinc de polvos de acería por lixiviación con ácido fosfórico, hidróxido de sodio y ácido sulfúrico (como referencia).

a) Resultados de ensayos de lixiviación ácida

En este estudio se evaluó la eficiencia de la lixiviación de polvos de acería utilizando ácido sulfúrico y ácido fosfórico, empleando la metodología descrita en la sección 2.2.1

a1) Resultados de lixiviación con ácidos en una etapa

En la Figura 1 se presentan los resultados de la recuperación de zinc, obtenidos en el primer ensayo de lixiviación con ácido sulfúrico y ácido fosfórico, al 10% de sólidos y a temperatura ambiente, empleando las condiciones iniciales descritas en la sección 2.2.1. Se observa que la recuperación de zinc fue de 96% con ácido sulfúrico y 85% con ácido fosfórico. Los resultados obtenidos con ácido sulfúrico son concordantes con el estudio de Ricaurte et al., 2014 y para el ácido fosfórico han sido superiores a los reportados en el estudios de (Halli et al., 2017). En ambos casos se tienen resultados elevados de recuperación de zinc.

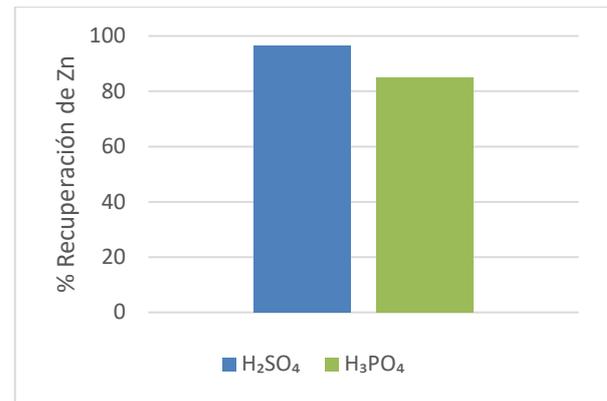


Figura 1 Recuperación de zinc de polvos de acería con ácido sulfúrico y ácido fosfórico, a 10% de sólidos, 24h de agitación, a temperatura ambiente y concentración de ácidos de 150g L⁻¹.

En la Figura 2 podemos observar que la recuperación de zinc con ácidos sulfúrico al 10% de sólidos y 72 horas de agitación es de 98%, mejorando la recuperación obtenida a 24 h de lixiviación. Con ácido fosfórico la recuperación disminuyó considerablemente, esto se dio porque la concentración de ácido fosfórico se redujo durante el proceso y afectó la eficiencia de la lixiviación. Entonces se tomó la decisión de continuar con los ensayos de lixiviación ácida con 24 h de agitación.

En la Figura 3 se puede observar una disminución en la recuperación de zinc con ácido sulfúrico, comparado con las lixivitaciones previas, con resultados de 90% de recuperación. En la lixiviación con ácido fosfórico se produjo una considerable reducción con el incremento del porcentaje de sólidos, esto debido probablemente a la formación de capas compactas del material, que es una de las características de los polvos de acería, como consecuencia de la presencia de ferritas de zinc. El contacto de la solución lixivante fosfórica con el sólido se reduce al aumentar el porcentaje de sólidos y no se logra alcanzar ni siquiera el 20% de recuperación de zinc. Por tanto, los ensayos de lixiviación posteriores se realizarán solo a 10% de sólidos, que es el valor que permite obtener las mejores recuperaciones de zinc.

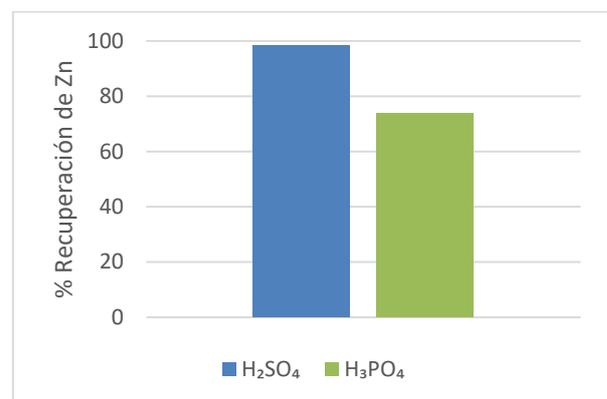


Figura 2. Recuperación de zinc de polvos de acería con ácido sulfúrico y ácido fosfórico, a 10% de sólidos, 72h de agitación, a temperatura ambiente y concentración de ácidos de 150g L⁻¹.

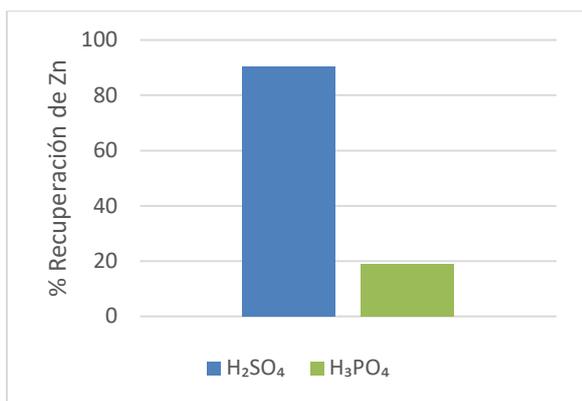


Figura 3. Recuperación de zinc de polvos de acería con ácido sulfúrico y ácido fosfórico, a 20% de sólidos, 24h de agitación, sin calentamiento y concentración de ácidos de 150g L⁻¹.

Los resultados obtenidos de la lixiviación con ácido sulfúrico son consistentes con los estudios realizados por Halli et al. (2017), donde se tiene una recuperación superior al 80% en un tiempo de lixiviación de 7 días. También se encontraron recuperaciones similares en estudios realizados por Ricaurte et al. (2014) y De la Torre et al. (2013), con recuperaciones de 76% y 80%, respectivamente, en un tiempo de lixiviación de 24 h. En este caso se confirma que el ácido sulfúrico es uno de los agentes lixiviantes más eficientes para disolver zinc de polvos de acería como el empleado en el presente estudio y en trabajos previos realizados por Halli et al. (2017), Ricaurte et al. (2014) y De la Torre et al. (2013).

Por otro lado, se debe mencionar que casi no se encuentran investigaciones sobre la lixiviación de polvos de acería con ácido fosfórico a excepción de Halli et al. (2017). Halli et al. (2017) reporta una investigación en la que la recuperación de zinc es baja, siendo menor al 10%, donde podemos decir que en esta investigación se han mejorado las recuperaciones con ácido fosfórico. Si bien existen otras investigaciones que utilizan ácido fosfórico como lixivante, estas incluyen la extracción por solventes en su metodología de purificación y no se consideran como referencias en este estudio.

b) Resultados de lixiviación con ácidos en dos etapas.

Para estos ensayos se modificaron los parámetros (Sección 2.2.1), para realizar el proceso en dos etapas, con una temperatura de lixiviación de 80°C y una agitación de 5 h. En la Figura 4 se muestra la recuperación de zinc del 97% en la primera etapa (material original). El relave de esta primera etapa se lixivía nuevamente bajo las mismas condiciones experimentales, obteniéndose una recuperación del 2,9% respecto a la cantidad de muestra original residual en esta segunda etapa de lixiviación. Si se considera la recuperación de zinc respecto a la masa del relave, esta representa el 94% de lixiviación utilizando ácido sulfúrico.

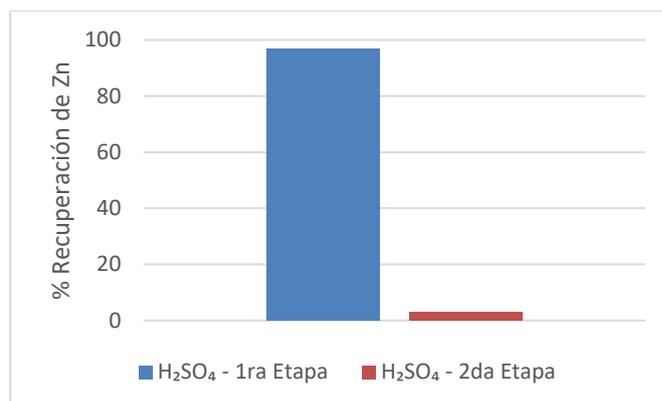


Figura 4. Recuperación de zinc de polvos de acería con ácido sulfúrico después de dos etapas de lixiviación a 80°C, concentración de ácido sulfúrico de 150 g L⁻¹, 10% de sólidos y 5h de agitación en ambas etapas.

Es común utilizar este tipo de lixiviación en dos etapas para el tratamiento de minerales de zinc como la esfalerita estudiado por Karimi et al., 2017 y Souza et al., 2007. En este estudio, se utilizó esta técnica debido al alto contenido de zinc en los polvos de acería y se obtuvo un incremento de las recuperaciones de zinc (Figura 4), ya que la combinación de estas etapas de lixiviación permitió una recuperación de zinc cercana al 100% (primera etapa 97% y 2,9% segunda etapa).

La recuperación de zinc, en dos etapas de lixiviación con ácido sulfúrico, sería del 99,9%, esto se puede explicar considerando que la solubilidad del sulfato de zinc es de 86,6 g L⁻¹ a 80°C de acuerdo a Perry et al., 2009. Por este motivo se requieren dos etapas de lixiviación para mejorar la eficiencia de la recuperación.

Respecto a los resultados de los ensayos de lixiviación en dos etapas, con ácido fosfórico y calentamiento, con una agitación de 5 horas en cada etapa, se obtienen los valores que se muestran en la Figura 5, donde se indica una recuperación de zinc del 97% en la primera etapa (material original). El relave de esta primera etapa se lixivía nuevamente bajo las mismas condiciones experimentales, obteniéndose una recuperación del 3.1% respecto a la cantidad de muestra original residual en esta segunda etapa de lixiviación. Si consideramos la recuperación de zinc respecto al peso del relave, esta representa el 90% de lixiviación utilizando ácido fosfórico.

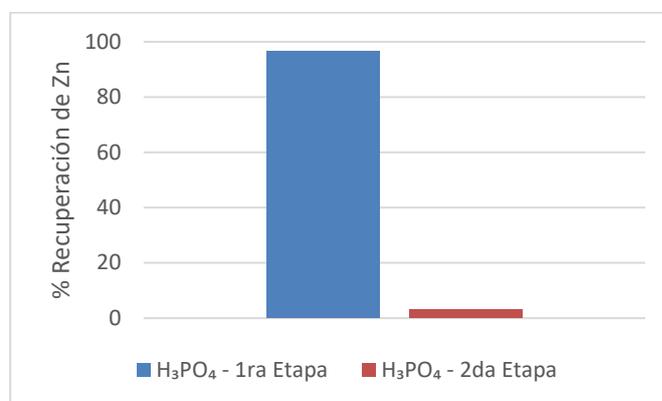


Figura 5. Recuperación de zinc de polvos de acería en dos etapas, en la primera etapa y en la segunda con H₃PO₄ con calentamiento a 80°C, a 10% de sólidos y 5h de agitación en ambas etapas.

Estos resultados demuestran que se pueden obtener recuperaciones de zinc elevadas al lixiviar con ácido fosfórico, siempre que se trabaje con calentamiento (80°C) y en dos etapas, para mejorar la eficiencia de la recuperación. Si comparamos estos resultados con los obtenidos en la lixiviación fosfórica inicial sin calentamiento, se puede observar un incremento de al menos el 13% en la recuperación de zinc, lo que puede ser considerado para ensayos posteriores de recuperación.

3.2.2 Lixiviación con hidróxido de sodio

Los ensayos de lixiviación con hidróxido de sodio se realizan con altas concentraciones (150 g L⁻¹ y 240 g L⁻¹), empleando las condiciones metodológicas de la sección 2.2.2.

a) Resultados de lixiviación con hidróxido de sodio sin calentamiento

Para los ensayos de lixiviación, usando hidróxido de sodio (150 g L⁻¹), sin calentamiento, a 10% de sólidos y 24h de agitación, se obtuvo una recuperación de zinc de 31%. Este es un valor bajo, considerando las recuperaciones obtenidas con ácido sulfúrico (96%) y ácido fosfórico (85%). Sin embargo, es un resultado consistente con los obtenidos en las investigaciones Halli et al. (2017), que reportaron el 20% de recuperación de zinc bajo condiciones similares.

Empleando las mismas condiciones de lixiviación para los polvos de acería, con hidróxido de sodio (150 g L⁻¹), sin calentamiento, variando solamente el tiempo de agitación de 24 a 72 horas, la recuperación de zinc es de 21%.

Los resultados obtenidos muestran que no es necesario más tiempo de lixiviación para incrementar la recuperación del metal, al contrario, un mayor tiempo de proceso reduce los valores de disolución de zinc, reduciendo la eficiencia del proceso. Esto debido probablemente a la composición mineralógica del material, la ferrita de zinc (franklinita) es prácticamente insoluble en hidróxidos, mientras que el óxido de zinc es fácilmente lixiviado en soluciones ácidas, pero la eficiencia de disolución disminuye en soluciones básicas como el hidróxido de sodio a temperatura ambiente.

b) Resultados de lixiviación con hidróxido de sodio con calentamiento

Empleando las condiciones experimentales de la Sección 2.2.2., se incrementó la concentración de hidróxido de sodio y se trabajó con calentamiento (80 °C). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6, donde se observa que la recuperación más alta se tiene al trabajar con 10% de sólidos (80% de recuperación).

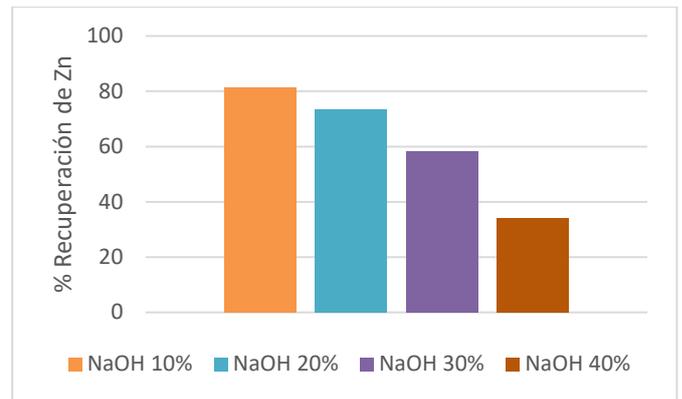


Figura 6. Recuperación de zinc de polvos de acería con hidróxido de sodio, a 10%, 20%, 30% y 40% de sólidos por 5h de agitación, con calentamiento a 80°C y concentración de hidróxido de sodio de 240g L⁻¹.

Mientras se aumenta el porcentaje de sólidos en los ensayos, se obtiene una disminución de la recuperación de zinc, esto debido probablemente a la dificultad del contacto del polvo con la solución a mayor porcentaje de sólidos. Estos resultados son distintos a los reportados por Palimakaç et al., 2018, que señala que a mayor porcentaje de sólidos, se obtiene mayor recuperación de zinc, esto debido a las diferencias en las composición de los polvos de acería ya que nuestra muestra no tiene presencia de níquel, arsenico, bismuto y cromo.

Se realizaron ensayos de lixiviación con hidróxido de sodio al 10% de sólidos, en dos etapas con calentamiento a 80 °C (sección 2.2.2). Los resultados se muestran en la Figura 7, donde se muestra una recuperación de zinc del 80% en la primera etapa (material original). El relave de esta primera etapa se lixivia nuevamente bajo las mismas condiciones experimentales, obteniéndose una recuperación del 20% respecto a la cantidad de muestra original residual en esta segunda etapa de lixiviación. Si se considera la recuperación de zinc respecto al peso del relave, esta representa el 96,6% de lixiviación utilizando hidróxido de sodio, demostrando que lixiviación con temperatura y en dos etapas ha resultado beneficioso para extracción de zinc con hidróxido de sodio.

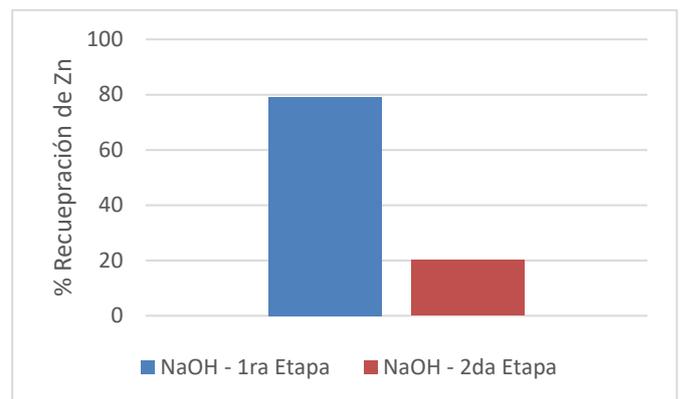


Figura 7. Recuperación de zinc de polvos de acería con hidróxido de sodio, a 10% de sólidos por 5h de agitación, con calentamiento a 80°C y concentración de hidróxido de sodio de 240g L⁻¹ en dos etapas

3.3 Evaluación de la recuperación de zinc de las soluciones ricas de las lixiviaciones por electrodeposición y fusión

Después de obtener las soluciones ricas en zinc de lixiviaciones con ácido fosfórico e hidróxido de sodio, se procedió a realizar los ensayos de cementación para limpiar de impurezas presentes en la solución fuerte de zinc (Sección 2.3).

Se debe señalar que para el hidróxido de sodio se analizó el contenido de hierro y plomo después de la cementación y se pudo constatar que se eliminó un 88% de plomo y un 30% de hierro, luego del proceso. Las soluciones depuradas se llevaron a los ensayos de electrolisis.

Para los ensayos de electrolisis se tomaron las combinaciones propuestas de ánodo y cátodo (Tabla 1), dando como resultado lo siguiente:

- Combinación de ánodo de plomo y cátodo de acero inoxidable: en este caso el zinc sí fue depositado en el cátodo de acero inoxidable, pero al analizar el depósito obtenido por FRX, se encontró un alto contenido del plomo de ánodo. Esto mostró que el plomo de ánodo probablemente se estaba disolviendo.
- Combinación de ánodo y cátodo en acero inoxidable: en esta opción los electrodos se oxidaron con facilidad y obtuvo la disolución de níquel y cromo en la solución.
- Combinación de ánodo de grafito y cátodo de acero inoxidable: en este caso el zinc se depositó en el cátodo y luego del análisis de DRX de dicho depósito se comprobó que se trataba de zinc metálico.

En las soluciones obtenidas de los ensayos de lixiviación con ácido fosfórico, (en reposo al menos un día), se notó la presencia de un precipitado blanco, el cual fue enviado a análisis DRX, dando como resultado la presencia de espencherita ($Zn_4(PO_4)_2(OH)_2 \cdot 3H_2O$), que es un compuesto que se emplea para mejorar el proceso de electrolisis del cobre.

Para los ensayos de electrolisis con las soluciones resultantes de la lixiviación con ácido fosfórico, se emplearon las mismas combinaciones de electrodos (Tabla 1).

- Combinación ánodo de plomo y cátodo de acero inoxidable: en este caso el zinc no se depositó luego de un ensayo de 2 h.
- Combinación de ánodo y cátodo de acero inoxidable: en este ensayo se produjo el depósito de zinc, pero los electrodos se calentaron y tomaron una coloración negra, señal de degradación durante el proceso.
- Combinación ánodo de grafito y cátodo de acero inoxidable: el grafito se disolvió en la solución y no se realizó ningún depósito de zinc en el cátodo.

Al final de los ensayos de electrolisis se recuperó el zinc depositado para purificarlo por fusión con cloruro de amonio y potasio como carga fundente a 450 °C, para obtener zinc con 99% de pureza.

4. CONCLUSIONES

Se pueden valorizar polvos de acería provenientes de un horno

de fundición eléctrico, con un tamaño de partícula d_{80} de 5,4 μm , que contienen componentes principales como magnetita (Fe_3O_4), zincita (ZnO), halita ($NaCl$) y franklinita o ferrita de zinc ($ZnFe_2O_4$).

Se realizaron ensayos de lixiviación con dos diferentes ácidos, sulfúrico (como referencia) y fosfórico, en la lixiviación de los polvos de acería con ácido sulfúrico permite obtener recuperaciones de zinc del 94% mientras que del 97% para lixiviaciones con ácido fosfórico, con un tiempo de agitación de 5 h y calentamiento a 80 °C en dos etapas.

La lixiviación de los polvos de acería con hidróxido de sodio permite obtener recuperaciones de zinc del 80% con concentraciones de 240 g L^{-1} , calentamiento a 80 °C, 5 h de agitación y dos etapas del proceso

El uso de temperatura de calentamiento de al menos 80 °C y el proceso de lixiviación en dos etapas fue clave para obtener mejores recuperaciones de zinc con ácidos y bases.

El ácido fosfórico es más selectivo para el zinc, que el ácido sulfúrico que disuelve todos los elementos presentes en los polvos de acería (hierro, zinc y plomo). El hidróxido de sodio es muy selectivo para el zinc, dejando el hierro en el relave y retirando posteriormente el hierro y plomo de la solución con la cementación.

La cementación con zinc resulta efectiva para depurar la solución metales que podrían interferir con la electrolisis como el plomo.

La electrolisis con ánodo de grafito y cátodo de acero inoxidable demostró obtener mejores resultados, presentando mayores cantidades de zinc depositado en el cátodo que puede ser purificado por fusión hasta un 99% de pureza.

5. RECOMENDACIONES

Se puede explorar el uso de electrodos de zinc o níquel para la electrolisis en lugar del ánodo de grafito para soluciones ácidas y básicas.

Evitar la separación magnética previa, debido al pequeño tamaño de partícula que presenta el polvo de acería empleado en este estudio. Esto hace poco eficiente esta separación.

Se pueden realizar ensayos que permitan eliminar el hierro en exceso que se tiene en la solución rica en zinc, el hierro presente puede ser un problema para la recuperación de zinc por electrolisis.

Ampliar el estudio considerando la determinación de la cinética de la lixiviación con ácido fosfórico e hidróxido de sodio

6. REFERENCIAS

- [1] Acero Garica, J. P. (2003). Caracterización De Polvos Metálicos. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 85.

- [2] Altarawneh, M., Ahmed, O. H., Al-Harabsheh, M., Jiang, Z.-T., & Dlugogorski, B. Z. (2021). A kinetic model for halogenation of the zinc content in franklinite. *Applied Surface Science*, 562. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150105>
- [3] Azizitorghabeh, A., Rashchi, F., Babakhani, A., & Noori, M. (2017). Synergistic extraction and separation of Fe(III) and Zn(II) using TBP and D2EHPA. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 52(3), 476–486. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1250778>
- [4] Borda, J., López, F., Torres, R., & Parra, M. (2021). Reciclaje de EAFD a través de la lixiviación selectiva de zinc con soluciones de citrato: comparación con un ácido inorgánico. *Tecnura*, 25(69 SE-Investigación), 131–149. <https://doi.org/10.14483/22487638.16965>
- [5] Borda, J., & Torres, R. (2022). Recycling of zinc and lead from electric arc furnace dust by selective leaching with EDTA. *Canadian Metallurgical Quarterly*. <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2046902>
- [6] Borda, J., Torres, R., & Lapidus, G. (2022). Selective leaching of zinc and lead from electric arc furnace dust using citrate and H_2SO_4 solutions. A kinetic perspective | Lixiviación selectiva de zinc y plomo del polvo de un horno de arco eléctrico utilizando soluciones de citr. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 21(1). <https://doi.org/10.24275/rmiq/cat2606>
- [7] Buzin, P. J. W. K. de, Heck, N. C., & Vilela, A. C. F. (2017). EAF dust: An overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(2), 194–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.10.002>
- [8] Chairaksa-fujimoto, R., Maruyama, K., Miki, T., & Nagasaka, T. (2016). Hydrometallurgy The selective alkaline leaching of zinc oxide from Electric Arc Furnace dust pre-treated with calcium oxide. *Hydrometallurgy*, 159, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.009>
- [9] Chen, Y., Teng, W., Feng, X., Li, J., Liu, W., Ren, S., Yang, J., & Liu, Q. (2022). Efficient extraction and separation of zinc and iron from electric arc furnace dust by roasting with $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ followed by water leaching. *Separation and Purification Technology*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119936>
- [10] Cole, P. M., & Sole, K. C. (2002). Solvent extraction in the primary and secondary processing of zinc. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102(8), 451–456.
- [11] De la Torre, E. H., Guevara Caiquetán, A. del C., & Espinoza, C. (2013). Valorización de polvos de acería mediante recuperación de Zinc por lixiviación y electrolísis. *Revista Politécnica*, 32(1), 51–56. http://www.academia.edu/9495920/Valorización_de_polvos_de_acería_mediante_recuperación_de_zinc_por_lixiviación_y_electrólisis
- [12] Delvasto, P., Aldao, B. I., & Ravotti, D. S. (2011). Caracterización de polvos de acería eléctrica producidos en Venezuela y evaluación preliminar de su lixivabilidad con ácidos orgánicos diluidos. *DYNA (Colombia)*, 78(169), 221–229.
- [13] Denton, G. M., Barcza, N. a, Scott, P. D., & Fulton, T. (2005). EAF Stainless Steel Dust Processing. *Spring*, January 2005, 1–9.
- [14] Dutra, A. J. B., Paiva, P. R. P., & Tavares, L. M. (2006). Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Minerals Engineering*, 19(5), 478–485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.013>
- [15] Ghani, A. A., Saleem, J., Hameed, Z. A., Lal, H., & Shoaib, M. (2016). Study of Zinc Leaching of EAF Flue Dust Using Sodium Hydroxide. 17(1), 33–37. <https://doi.org/10.21743/pjaec/2016.06.005>
- [16] Gutierrez Pérez, L. (2014). Modelado Geo-Químico En La Gestión De Polvo De Acería. 64.
- [17] Halli, P., Agarwal, V., Partinen, J., & Lundström, M. (2020). Recovery of Pb and Zn from a citrate leach liquor of a roasted EAF dust using precipitation and solvent extraction. *Separation and Purification Technology*, 236, 116264. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116264>
- [18] Halli, P., Hamuyuni, J., Revitzer, H., & Lundström, M. (2017). Selection of leaching media for metal dissolution from electric arc furnace dust. *Journal of Cleaner Production*, 164, 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.212>
- [19] Havlík, T., e Souza, B. V., Bernardes, A. M., Schneider, I. A. H., & Miškufová, A. (2006). Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1–3), 311–318.
- [20] Havlik, T., Turzakova, M., Stopic, S., & Friedrich, B. (2005). Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, 77(1), 41–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>
- [21] Hong-xu, L. I., Yang, W., & Da-qiang, C. (2010). Zinc leaching from electric arc furnace dust in alkaline medium. 967–971.

- <https://doi.org/10.1007/s11771>
- [22] Jafari, H., Abdollahi, H., Gharabaghi, M., & Balesini, A. A. (2018). Solvent extraction of zinc from synthetic Zn-Cd-Mn chloride solution using D2EHPA: Optimization and thermodynamic studies. In *Separation and Purification Technology* (Vol. 197). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.01.020>
- [23] Kalpakli, A. O., Caymaz, M., Ilhan, S., & Zoraga, M. (2021). Recovery of Zn as ZnO from Steelmaking Waste Materials by Mechanochemical Leaching, Solvent Extraction, Precipitation, and Thermal Decomposition Route. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(1), 277–290. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00340-8>
- [24] Kelebek, S., & Y, S. (2004). Characterization of basic oxygen furnace dust and zinc removal by acid leaching (Vol. 17). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.030>
- [25] Lee, H. S., Park, D. S. M., Hwang, Y., Ha, J. G., & Shin, H. S. (2020). Toward high recovery and selective leaching of zinc from electric arc furnace dust with different physicochemical properties. *Environmental Engineering Research*, 25(3), 335–344. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.132>
- [26] Maccagni, M. G. (2016). INDUTECH®/EZINEX® Integrate Process on Secondary Zinc-Bearing Materials. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(2), 133–140. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0041-0>
- [27] Mager, K., Meurer, U., & Wirling, J. (2003). Minimizing dioxin and furan emissions during zinc dust recycle by the waelz process. *JOM*, 55(8), 20–25. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0099-6>
- [28] Montenegro, V., Oustadakis, P., Tsakiridis, P. E., & Agatzini-Leonardou, S. (2013). Hydrometallurgical treatment of steelmaking electric arc furnace dusts (EAFD). *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44, 1058–1069.
- [29] Mordoğan, H., Çiçek, T., & Işık, A. (1999). Caustic soda leach of electric arc furnace dust. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 23(3), 199–207.
- [30] NAKAMURA, T., SHIBATA, E., TAKASU, T., & ITOU, H. (2008). Basic Consideration on EAF Dust Treatment Using Hydrometallurgical Processes. *Resources Processing*, 55(3), 144–148. <https://doi.org/10.4144/rpsj.55.144>
- [31] Oustadakis, P., Tsakiridis, P. E., Katsiapi, A., & Agatzini-Leonardou, S. (2010). Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part I: Characterization and leaching by diluted sulphuric acid. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1–3), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.059>
- [32] Palimaka, P., Pietrzyk, S., & Stepien, M. (2017). Recycling of Zinc from the Steelmaking Dust in the Sintering Process. *Energy Technology 2017: Carbon Dioxide Management and Other Technologies*, 181–189.
- [33] Palimaka, P., Pietrzyk, S., Stępień, M., Cieccko, K., & Nejman, I. (2018). Zinc recovery from steelmaking dust by hydrometallurgical methods. *Metals*, 8(7), 1–13. <https://doi.org/10.3390/met8070547>
- [34] Pereira, D. D., Rocha, S. D. F., & Mansur, M. B. (2007). Recovery of zinc sulphate from industrial effluents by liquid-liquid extraction using D2EHPA (di-2-ethylhexyl phosphoric acid). *Separation and Purification Technology*, 53(1), 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.06.013>
- [35] Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2009). *Manual del ingeniero químico*. In *Termodinámica*.
- [36] Quijorna, N., de Pedro, M., Romero, M., & Andrés, A. (2014). Characterisation of the sintering behaviour of Waelz slag from electric arc furnace (EAF) dust recycling for use in the clay ceramics industry. *Journal of Environmental Management*, 132, 278–286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.012>
- [37] Ricaurte, J., de la Torre, E., Espinoza, C., & Guevara, A. (2014). Estudio Comparativo de la Recuperación de Zn de Polvos de Acería por Lixiviación con H₂SO₄ y HCl, electrodeposición electrolítica y bi-electrolítica. *Revista Epn*, 33(2), 8990.
- [38] Sarma, V. N. R., Deo, K., & Biswas, A. K. (1976). Dissolution of zinc ferrite samples in acids. *Hydrometallurgy*, 2(2), 171–184.
- [39] Señas, L., Maiza, P., Marfil, S., & Valea, J. (2003). Impacto Ambiental producido por morteros cementicios con polvos de Acería. *Ciencia e Ingeniería*, 24, 47–53.
- [40] Simonyan, L. M., & Demidova, N. V. (2020). Selective extraction of carbon-free zinc and lead from EAF-dust. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 63(8), 631–638. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-631-638>
- [41] Sinclair, R. J. (2005). *zy*. 13, 15–31.
- [42] Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Cerjan-Stefanović, Š., Novosel-Radović, V., & Jenko, M. (2004). Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 109(1), 59–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.032>
- [43] Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Cerjan-Stefanović,

- Š., Novosel-Radović, V., Jenko, M., Lanzerstorfer, C., Wu, S., Chang, F., Zhang, J., Lu, H., & Kou, M. (2004). Electric arc furnace (EAF) dust: Application of air classification for improved zinc enrichment in in-plant recycling. *Journal of Cleaner Production*, 12(1), 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.032>
- [44] Stewart, C., & Lead, I. (2015). Sustainability in Action : Recovery of Zinc from EAF Dust in the Steel Industry. June.
- [45] Teo, Y. Y., Lee, H. S., Low, Y. C., Choong, S. W., & Low, K. O. (2018). Hydrometallurgical extraction of zinc and iron from electric arc furnace dust (EAFD) using hydrochloric acid. *Journal of Physical Science*, 29, 49–54. <https://doi.org/10.21315/jps2018.29.s3.6>
- [46] Tsakiridis, P. E., Oustadakis, P., Katsiapi, A., & Agatzini-Leonardou, S. (2010). Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: Downstream processing and zinc recovery by electrowinning. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1–3), 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.004>
- [47] Tsakiridis, V. M. S. A. P. O. P. (2016). Hydrometallurgical Treatment of EAF Dust by Direct Sulphuric Acid Leaching at Atmospheric Pressure. *Waste and Biomass Valorization*, July 2012. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9543-z>
- [48] Velásquez, N. M. (2019). Recuperación “verde” de metales de baterías de ion-litio utilizando cáscara de naranja. 11–61.
- [49] Wang, J., Zhang, Y., Cui, K., Fu, T., Gao, J., Hussain, S., & AlGarni, T. S. (2021). Pyrometallurgical recovery of zinc and valuable metals from electric arc furnace dust – A review. *Journal of Cleaner Production*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126788>
- [50] Widi, A., Agus, H., Istihanah, N. E., Fajar, N., Aulia, P. T. Y., Joni, S., Isnaeni, Farida, & Dwi, W. L. (2020a). Zinc oxide recovery from solid waste of electric arc furnace dust (Eafd) using hydrometallurgical method. *Key Engineering Materials*, 849 KEM, 108–112. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.849.108>
- [51] Widi, A., Agus, H., Istihanah, N. E., Fajar, N., Aulia, P. T. Y., Joni, S., Isnaeni, Farida, & Dwi, W. L. (2020b). Zinc oxide recovery from solid waste of electric arc furnace dust (Eafd) using hydrometallurgical method. *Key Engineering Materials*, 849 KEM, 108–112. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.849.108>
- [52] Wozniacki, Z., Telejko, T. K., & Kenig, R. (2014). Sintering as the method of utilization of steelmaking dusts with a high content of zinc oxides. *Hutnik-WH*, 81, 166–171.
- [53] Xia, K. (1997). Recovery of Zinc From Zinc Ferrite and Electric Arc Furnace Dust. *Engineering*, September, 240.
- [54] Xue, Y., Hao, X., & Liu, X. (2022). Recovery of Zinc and Iron from Steel Mill Dust — An Overview of Available Technologies. 1–17.
- [55] Youcai, Z., & Stanforth, R. (2000). Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Journal of Hazardous Materials*, 80(1), 223–240. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00305-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00305-8)

INFORMACIÓN SUPLEMENTARIA

PARTE I
ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO
SULFÚRICO, ÁCIDO FOSFÓRICO E HIDRÓXIDO
DE SODIO

FICHA TÉCNICA N°1

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	24
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixivante	H ₂ SO ₄
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10

Tabla FT1. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con ácido sulfúrico

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
24h	46950	96

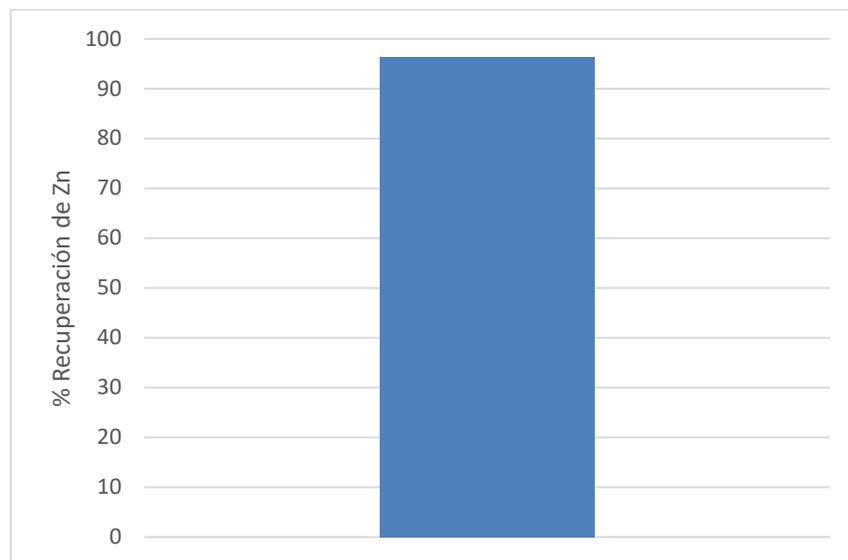


Figura FT6 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en ácido sulfúrico de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°2

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	24
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	H ₃ PO ₄
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10

Tabla FT2. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con ácido fosfórico

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
24h	46250	85

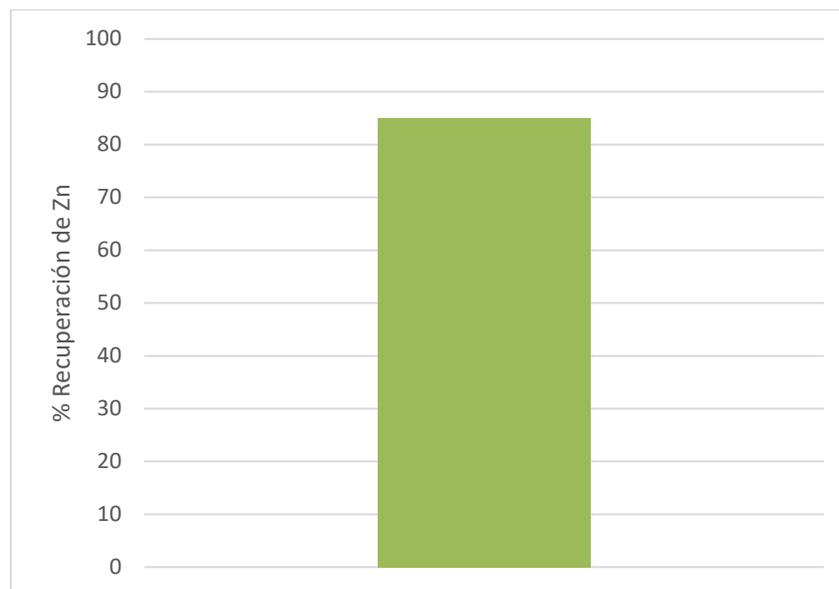


Figura FT7 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en ácido fosfórico de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°3

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	24
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	NaOH
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10

Tabla FT3. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con hidróxido de sodio

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
24h	9490	31

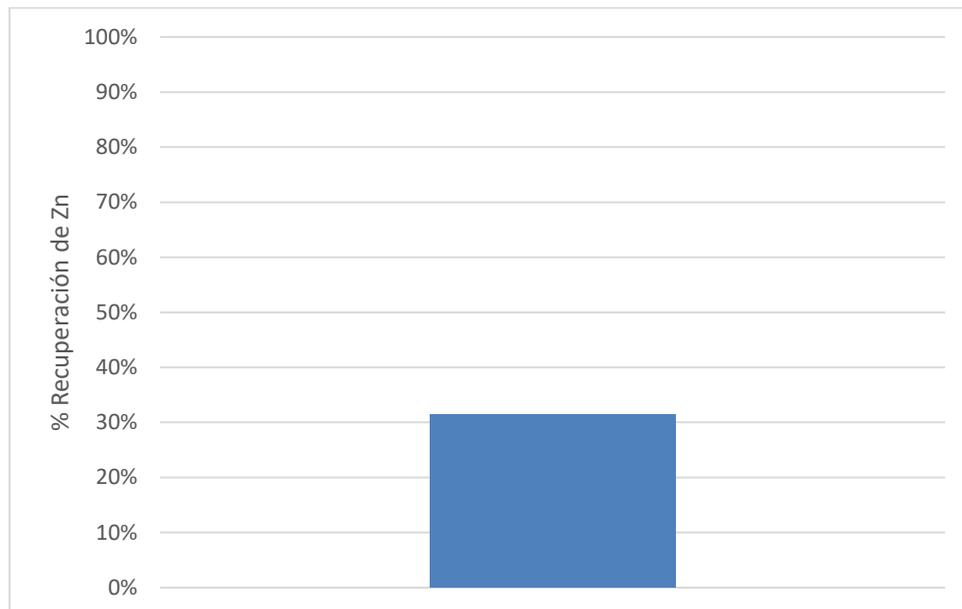


Figura FT3 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en hidróxido de sodio de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°4

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	72
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	H ₂ SO ₄
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10

Tabla FT4. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con ácido sulfúrico

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
72	43400	98

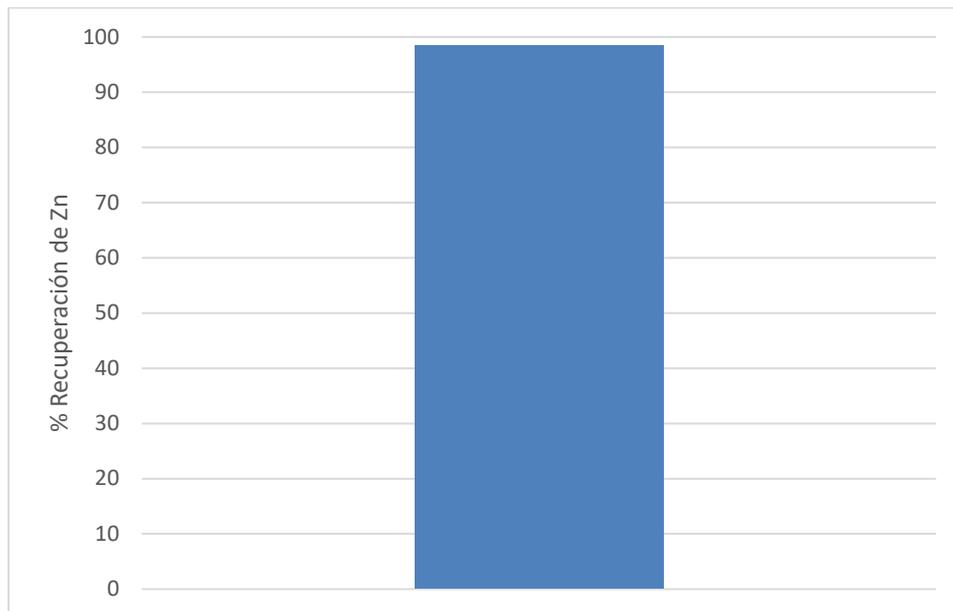


Figura FT4 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en ácido sulfúrico de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°5

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	72
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	H ₃ PO ₄
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10

Tabla FT5. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con ácido fosfórico

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
72	29300	74

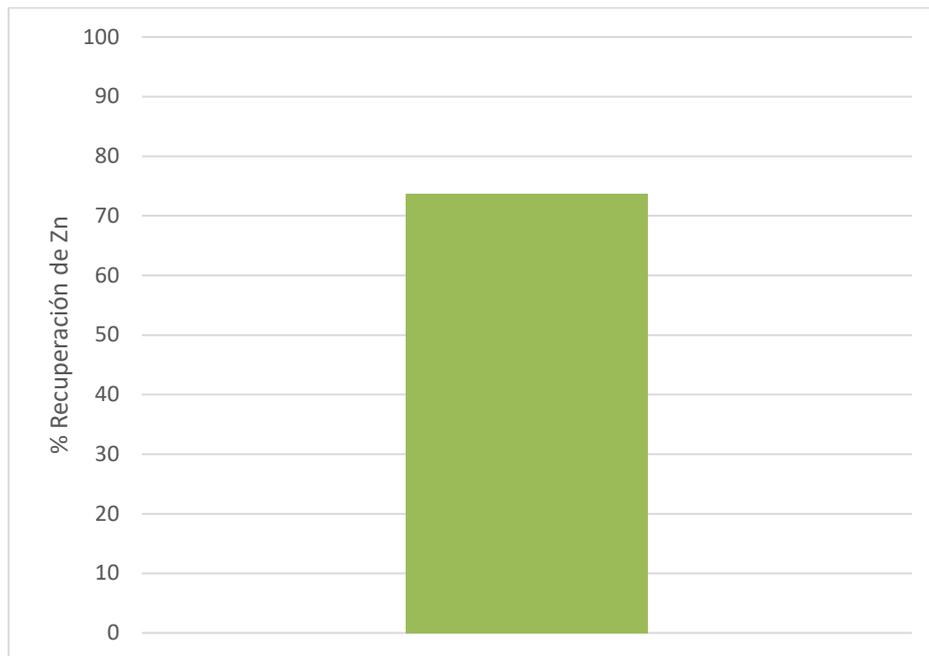


Figura FT5 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en ácido fosfórico de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°6

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	72
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	NaOH
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10

Tabla FT6. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con hidróxido de sodio

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
72	7020	21

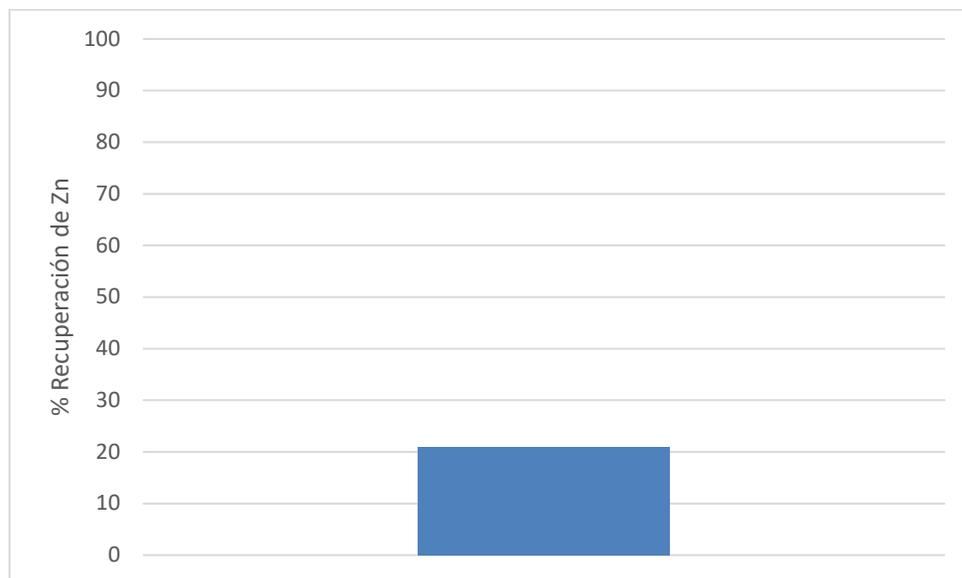


Figura FT6 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en hidróxido de sodio de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°7

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	24
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	80
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	H ₂ SO ₄
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	20

Tabla FT7. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con ácido sulfúrico

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
24	91500	90

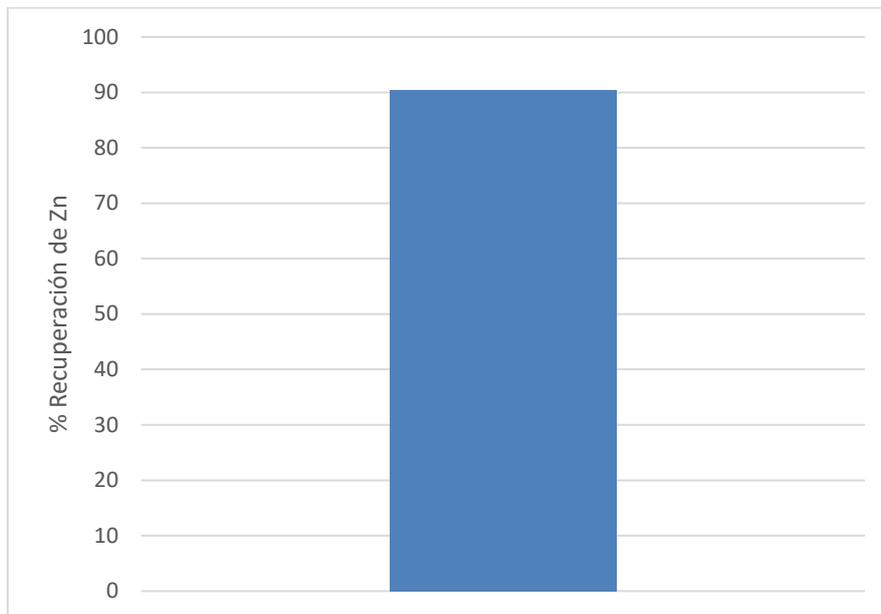


Figura FT7 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en ácido sulfúrico de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°8

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	24
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	80
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	H ₃ PO ₄
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	20

Tabla FT8. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con ácido fosfórico

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
24	16900	19

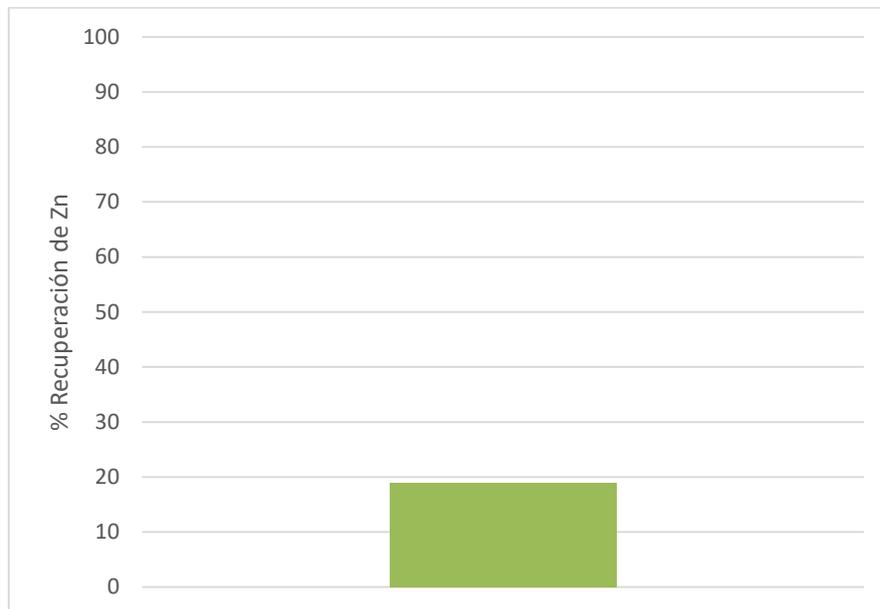


Figura FT8 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en ácido fosfórico de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°9

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	20
Tiempo total del ensayo (h)	24
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	80
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	NaOH
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	20

Tabla FT9. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con hidróxido de sodio

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
24	8310	9

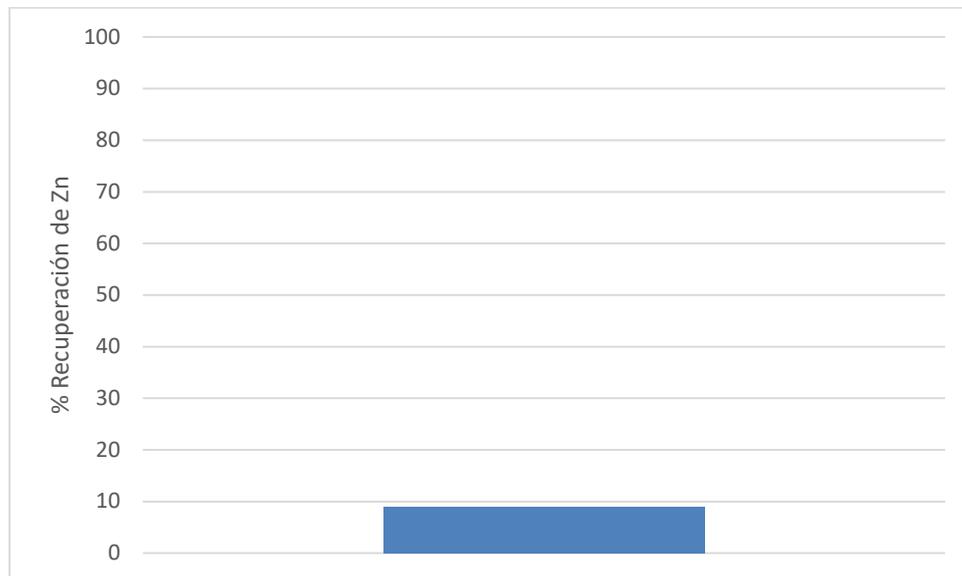


Figura FT9 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en hidróxido de sodio de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°10

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	80
Tiempo total del ensayo (h)	5
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixivante	H ₂ SO ₄
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10
Etapas de lixiviación	2

Tabla FT10. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con ácido sulfúrico

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
5	45800	97
5	1631	2,9

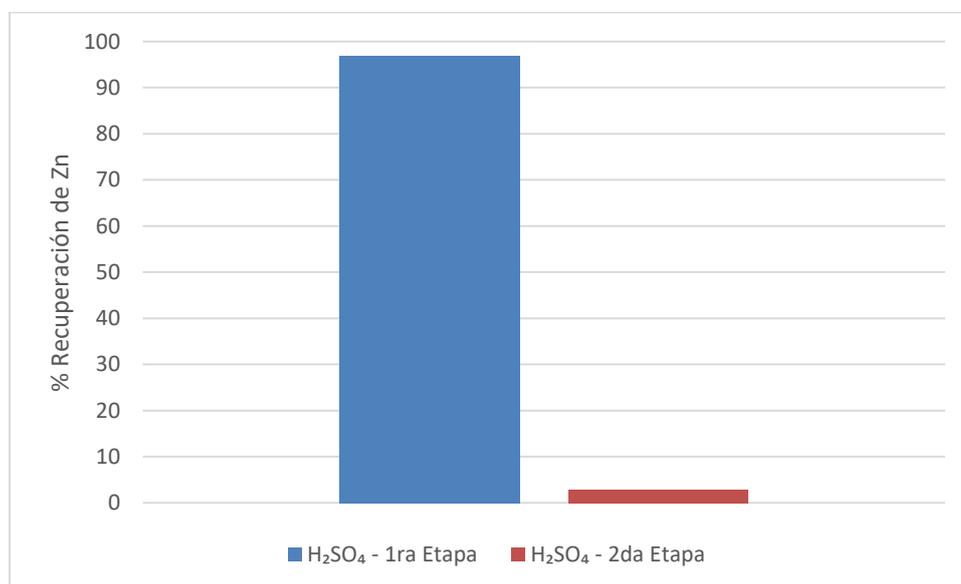


Figura FT10 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en ácido sulfúrico de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°11

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	80
Tiempo total del ensayo (h)	5
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	H ₃ PO ₄
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10
Etapas de lixiviación	2

Tabla FT11. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con ácido fosfórico

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
5	36200	97
5	15800	3,1

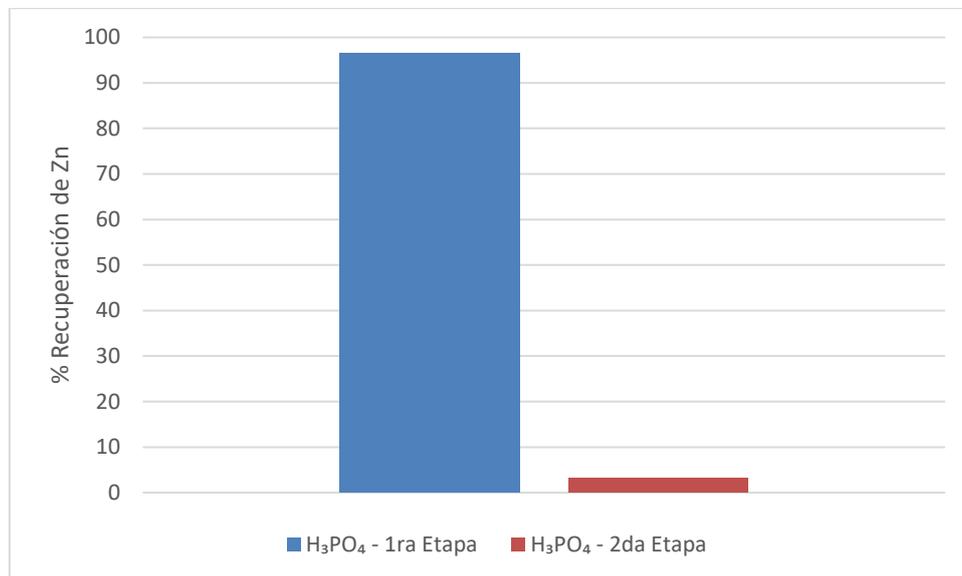


Figura FT11 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en ácido fosfórico de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°12

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	80
Tiempo total del ensayo (h)	5
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	40
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	NaOH
Concentración de ácido (g/L)	150
% sólidos (%)	10
Etapas de lixiviación	2

Tabla FT12. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con hidróxido de sodio

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
5	31300	80
5	35740	20

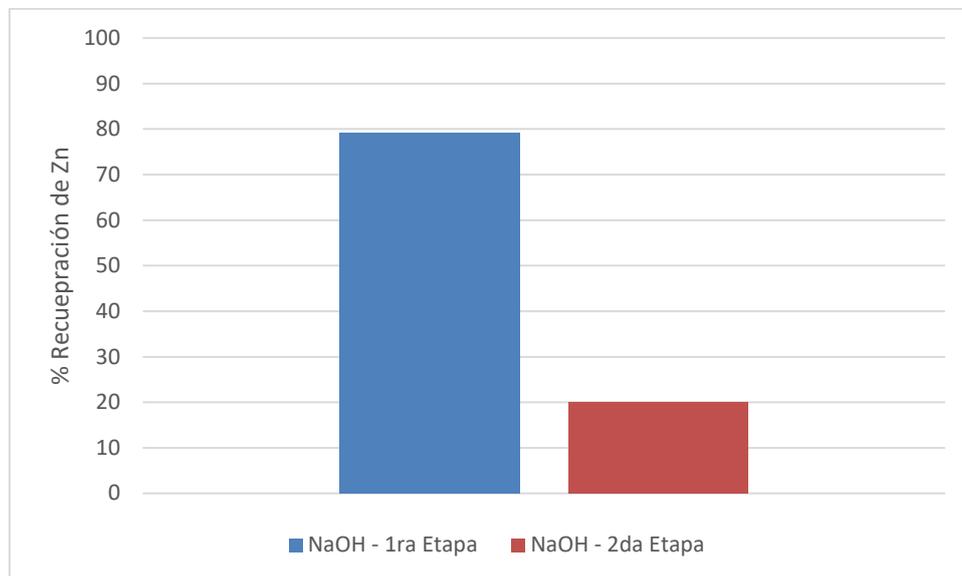


Figura FT12 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en hidróxido de sodio de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°13

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	80
Tiempo total del ensayo (h)	5
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	30
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	NaOH
Concentración de ácido (g/L)	240
% sólidos (%)	10

Tabla FT13. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con hidróxido de sodio

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
5	31800	81

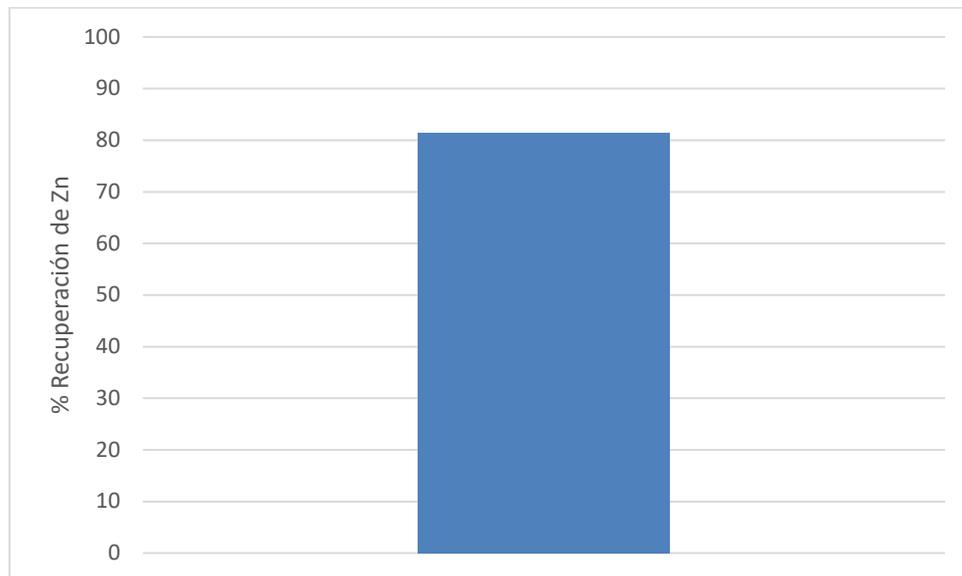


Figura FT13 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en hidróxido de sodio de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°14

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	80
Tiempo total del ensayo (h)	5
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	60
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	NaOH
Concentración de ácido (g/L)	240
% sólidos (%)	20

Tabla FT14. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con hidróxido de sodio

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
5	85700	74



Figura FT14 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en hidróxido de sodio de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°15

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	80
Tiempo total del ensayo (h)	5
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	120
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	NaOH
Concentración de ácido (g/L)	240
% sólidos (%)	30

Tabla FT15. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con hidróxido de sodio

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
5	111000	58



Figura FT15 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en hidróxido de sodio de polvos acería

FICHA TÉCNICA N°16

Condiciones del ensayo	
Temperatura (°C)	80
Tiempo total del ensayo (h)	5
Agitación (RPM)	600
Masa de muestra (mg)	160
% Zn en la muestra	26,35
Zn en la muestra (mg)	10,54
Agente lixiviante	NaOH
Concentración de ácido (g/L)	240
% sólidos (%)	40

Tabla FT16. Zinc proveniente de polvos de acería de lixiviación con hidróxido de sodio

t (h)	Zn (mg L ⁻¹)	% Recuperación
5	71900	34



Figura FT16 Recuperación de zinc proveniente de la lixiviación en hidróxido de sodio de polvos acería

PARTE II
RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN
DE POLVOS DE ACERÍA



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultados Análisis de Difracción de Rayos X

Solicitante : Ing. Fernando Sánchez.
No. Referencia : RM - 10251
Fecha : 17 - 02 - 2022
Muestras recibidas : Una muestra sólida denominada:
Muestra 1 : Polvo de acería (*Código registrado según cliente*).

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA Y TOPAS) para cualificación y semi-cuantificación. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Mineral	Fórmula	Muestra 1 Contenido (%)
Magnetita	Fe_3O_4	42
Zincita	ZnO	38
Halita	$NaCl$	8
Franklinita	$ZnFe_2O_4$	4
Ilmenita	$FeTiO_3$	3
Grupo plagioclasas	$(Na,Ca)Al(Si,Al)Si_2O_8$	3
Silvita	KCl	2

NOTA: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida.

ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN
Firmado digitalmente
por ERNESTO HALE DE
LA TORRE CHAUVIN
Fecha: 2022.02.18
11:20:04 -05'00'

Ing. Ernesto de la Torre PhD.
Jefe de Departamento



Firmado electrónicamente por:
**EVELYN PAMELA
CRIOLLO TIRADO**

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados de Análisis

Solicitante: Ing. Fernando Sánchez.

Referencia: RM - 10251

Fecha: 22/03/2022

Muestras recibidas: Dos muestras sólidas denominadas:

Muestra 1: Torta-1-Polvos (*Código registrado según cliente*).

Muestra 2: Torta-2-Polvos (*Código registrado según cliente*).

Resultados Análisis Fluorescencia de Rayos X

El análisis químico de las muestras se determinó en el equipo de Fluorescencia de rayos X S8 Tiger, con el programa Spectra Pluss. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis:

Elemento	Muestra 1	Muestra 2
	Contenido (%)	Contenido (%)
Fe	27,58	25,59
Zn	11,39	12,33
P	8,06	5,24
Mn	1,90	3,38
Si	1,72	3,57
Pb	1,49	0,58
Mg	1,25	1,11
Na	1,16	---
Ca	0,98	1,88
K	0,93	0,41
Al	0,50	0,59
Cr	0,42	0,38
Cl	0,24	0,12
Cu	0,18	0,19
S	0,13	1,28
Ti	0,10	0,09
Ba	0,08	0,12
Sn	0,08	0,07
Ni	0,02	0,02
Sr	0,02	---
Br	0,01	---

Nota: La muestra fue analizada mediante pastilla prensada, por lo cual los resultados son semi-cuantitativos.

ERNESTO HALE
DE LA TORRE
CHAUVIN

Firmado digitalmente
por ERNESTO HALE DE
LA TORRE CHAUVIN
Fecha: 2022.03.22
18:51:17 -05'00'

Ing. Ernesto de la Torre PhD.
Jefe de Departamento



Firmado electrónicamente por:
EVELYN PAMELA
CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio



Resultado de Análisis

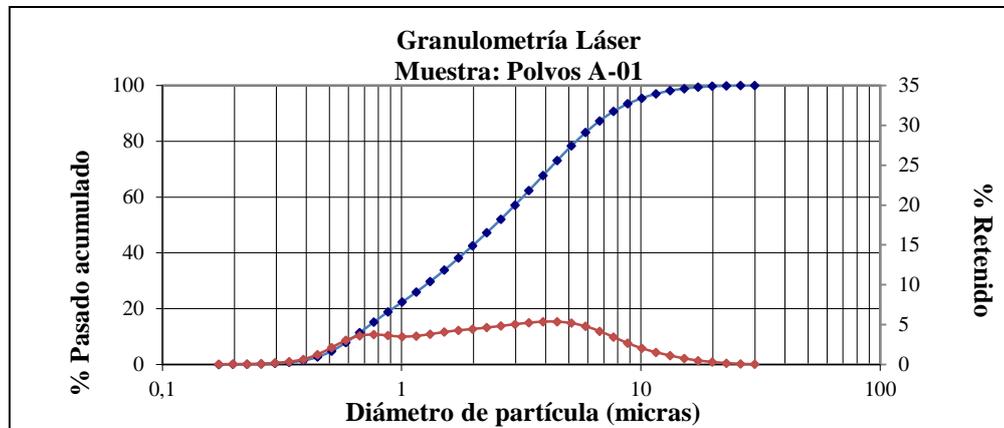
Solicitante : Ing. Fernando Sánchez.
No. Referencia : RM – 10251
Fecha : 04 - 05 - 2022
Muestras recibidas : Polvos A-01

Resultados Análisis de Granulometría Láser

El análisis de granulometría láser se lo realizó empleando el equipo LASER SCATTERING PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ANALYZER LA-950V2, marca HORIBA. *El equipo utiliza la teoría de Mie para evaluar las mediciones, (dispersión de ondas electromagnéticas en partículas esféricas).*

A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Polvos A-01	
Parámetros	Diámetro de Partícula (µm)
d10	0,6
d50	2,5
d60	3,2
d80	5,4
d90	7,5



El análisis se realizó utilizando el índice de refracción para polvo acería: 2,234.

Nota: Esta técnica de análisis es adecuada para partículas esféricas inferiores a 38 micras, que no se pueden determinar su tamaño por tamizado.

ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN
Firmado digitalmente por ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN
Fecha: 2022.05.05
15:21:52 -05'00'

Ing. Ernesto de la Torre PhD.
Jefe de Departamento



Firmado electrónicamente por:
EVELYN PAMELA
CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio



ANEXO: Tabla de resultados de granulometría láser.

Muestra: Polvos A-01							
Número	Diámetro de	Retenido	Pasado	Número	Diámetro de	Retenido	Pasado
(#)	Partícula	(%)	Acumulado	(#)	Partícula	(%)	Acumulado
	(μm)		(%)		(μm)		(%)
1	0,2	0,0	0,0	20	2,3	4,6	47,3
2	0,2	0,0	0,1	21	2,6	4,8	52,1
3	0,2	0,1	0,1	22	3,0	5,1	57,1
4	0,3	0,1	0,2	23	3,4	5,2	62,4
5	0,3	0,2	0,4	24	3,9	5,4	67,8
6	0,3	0,4	0,8	25	4,5	5,4	73,1
7	0,4	0,7	1,5	26	5,1	5,2	78,3
8	0,4	1,3	2,7	27	5,9	4,8	83,1
9	0,5	2,1	4,9	28	6,7	4,2	87,3
10	0,6	3,0	7,9	29	7,7	3,4	90,7
11	0,7	3,6	11,5	30	8,8	2,7	93,4
12	0,8	3,8	15,3	31	10,1	2,0	95,5
13	0,9	3,6	18,9	32	11,6	1,5	97,0
14	1,0	3,5	22,4	33	13,2	1,1	98,1
15	1,2	3,6	26,0	34	15,2	0,8	98,9
16	1,3	3,8	29,8	35	17,4	0,5	99,4
17	1,5	4,1	33,9	36	19,9	0,3	99,7
18	1,7	4,3	38,2	37	22,8	0,2	99,9
19	2,0	4,5	42,6	38	26,1	0,1	100,0



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

MAESTRÍA DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA

ORDEN DE EMPASTADO

De acuerdo con lo estipulado en el Art. 101 del Reglamento de Régimen Académico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), aprobado por el Consejo Politécnico el 19 de octubre del 2017, y una vez comprobado el cumplimiento del formato de presentación establecido para la tesis escrita presentada por el Señor:

ING. FERNANDO GABRIEL SÁNCHEZ RIVADENEIRA

Se emite la presente orden de empastado con fecha: 31 enero 2024



Firmado electrónicamente por:
**DIANA ENDARA
DRANICHNIKOVA**

**Dra. Diana Endara Dranichnikova
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE
METALURGIA EXTRACTIVA**