

Lixiviación de Zn a partir de polvo del colector del alto horno para su aplicación potencial como material reciclado.

Leaching Zn from blast furnace flue dust for its potential application as recycled material.



Recuperado de: <https://www.ahmsa.com/sobre-ahmsa/>

Dr. Iván Omar Acuña Gutiérrez^a
Ing. Juan Antonio López Corpus^a
Ing. Alberto Perea Garduño^a

^aAltos Hornos de México S.A.B. de C.V., Prolongación Juárez s/n, col. La Loma,
C.P.25700, Monclova, Coahuila, México.

Correspondencia para autor: Dr. Iván Omar Acuña Gutiérrez
Altos horno de México S.A.B de C.V.
Correo electrónico: ivan.agtz@gmail.com.mx

Resumen

Se evaluó a nivel laboratorio la composición química y la lixiviación de Zn en ácido sulfúrico e hidróxido de sodio del polvo colector del alto horno (PCAH). El PCAH se sometió a separación magnética de baja intensidad (SMBI) para la obtención de un concentrado de Fe. Se determinó el Fe, Zn, P, Ti, SiO₂, K₂O, MgO, CaO, Na₂O, Al₂O₃ y MnO utilizando espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX). La lixiviación del concentrado SMBI PCAH para la remoción de Zn se realizó con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio a una concentración de 0.5M-1M de H₂SO₄ y 2M-8M de NaOH. El análisis químico del PCAH reportó un contenido inicial de Fe de 39.46% e.p., enriqueciéndose a valores de 64.11% e.p. mediante el proceso de separación magnética. El porcentaje de Zn inicial en el PCAH fue de 0.18% e.p. con respecto al 0.442% e.p. determinado en el concentrado SMBI PCAH. En la cola SMBI PCAH el contenido de Fe fue 27.67% e.p. Los resultados de las pruebas de lixiviación ácida (H₂SO₄) muestran una remoción del contenido de Zn de 79% utilizando un tiempo de 30 min, una temperatura de 60°C y una concentración de 1M (H₂SO₄). En la lixiviación alcalina (NaOH), el contenido de Zn fue reducido en un 27% en el concentrado SMBI PCAH.

Palabras clave: polvo del colector, concentrado SMBI PCAH, lixiviación.

Abstract

The chemical composition and leaching of Zn in sulfuric acid and sodium hydroxide of blast furnace flue dust (BFFD) was evaluated at the laboratory level. The BFFD was subjected to low intensity magnetic separation (LIMS) to obtain a Fe concentrate. Fe, Zn, P, Ti, SiO₂, K₂O, MgO, CaO, Na₂O, Al₂O₃ and MnO were determined using X-ray fluorescence spectrometry (XRF). Leaching of LIMS BFFD concentrate for Zn removal was carried out with sulfuric acid and sodium hydroxide at a concentration of 0.5M-1M H₂SO₄ and 2M-8M NaOH. The chemical analysis of BFFD reported an initial Fe content of 39.46wt-%, enriching to values of 64.11wt-% through the magnetic separation process. The initial Zn percentage in the BFFD was 0.18wt-% as regard to 0.442wt-% determined in the LIMS BFFD concentrate. In the LIMS BFFD tail the Fe content was 27.67wt-%. The acid leaching (H₂SO₄) tests results show a removal of Zn content of 79% using a time of 30 min, a temperature of 60°C and a concentration of 1M (H₂SO₄). In alkaline leaching (NaOH), the Zn content was reduced by 27% in the LIMS BFFD concentrate.

Keywords: flue dust, LIMS BFFD concentrate, leaching.

INTRODUCCIÓN

El alto horno es un equipo complejo en el que se produce arrabio que también es conocido como hierro primario. El resultado de producir arrabio trae consigo la generación de subproductos (escorias, lodos, polvos de colector y ciclón, gases). Generalmente el gas de alto horno es recirculado al proceso productivo (enviado a las coquizadoras de AHMSA (Altos hornos de México, sociedad anónima bursátil de capital variable). Por otra parte, los subproductos sólidos (escorias, lodos, polvos de colector y ciclón) no cuentan con un reproceso para ser utilizados nuevamente. Estos subproductos contienen Zn considerado como perjudicial para el alto horno (Yin y col., 2017).

En la literatura se menciona que las escorias pueden ser utilizadas para la producción de cementos (Díaz y col., 2013), concretos (Lizarazo y Claisse, 2011), ladrillos para pisos o recubrimientos de paredes (Binici y col., 2007; El-Nouhy, 2014), materiales cerámicos y vitrocerámicos (El-Mahllawy, 2008; Ding y col., 2015), bloques para pavimento (Aitici y Ersoy, 2008), asfalto (Rondón y col., 2018) e incluso como bases de adsorción o matrices de fijación de metales pesados (Seigneur y col., 2007; Koplík y col., 2016). Sin embargo, para los polvos de colector, polvos de ciclón y lodos, no existe una aplicación directa ya que estos se caracterizan por tener alto contenido de cinc.

Los subproductos como lodos, polvos de colector y ciclón se generan por la captación y sedimentación de partículas volátiles en los sistemas de limpieza del gas alto horno. Estos subproductos se caracterizan por estar constituidos principalmente de unidades Fe, Ca, Si y C. La variabilidad de los valores en Fe y C dependerá de las materias primas agregadas en el proceso de un alto horno.

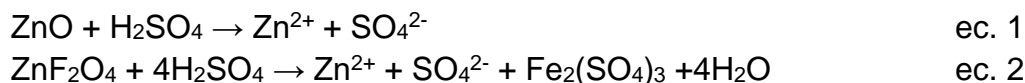
El contenido de Fe en los polvos del colector generados y recolectados en los sistemas de limpieza del gas alto horno en AHMSA oscila entre 30%-50% e.p. mientras que el C es de 15%-30% e.p. El polvo del colector representa un 2% e.p. mientras que el de los lodos es de apenas 0.5% e.p. del total de arrabio. Estos porcentajes de unidades Fe y C son consistentes con los reportados en la literatura (Andersson y col., 2017; Das y col., 2002). Por esta razón y debido al mayor volumen resultante en el polvo del colector es atractivo tratar de recuperar las unidades Fe y C.

Los polvos del colector están constituidos principalmente por óxidos metálicos. Los principales constituyentes son magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), calcita (CaCO_3) y cuarzo (SiO_2), además del carbono (El-Hussiny y Shalabi, 2010). El cinc por su parte en los subproductos de alto horno (Vereš y col., 2011) se caracteriza por estar presente en su forma de cincita (ZnO) y franklinita (ZnFe_2O_4) lo que dificulta su extracción (Dutra y col., 2006; Brunelli y Dabalá, 2015).

Se ha empleado la pirometalurgia a fin de reciclar estos polvos y el método más utilizado es el proceso Waelz (Hernández y col., 2018) que generalmente es con polvos de acería, este proceso tiene lugar en un horno rotatorio tubular donde los subproductos (polvos de colector y ciclón) aglomerados previamente se adicionan junto con coque, desplazándose a través del horno en dirección opuesta a los gases. Los productos resultantes usando este tipo de proceso son: óxidos de cinc, teniendo como impurezas plomo y cadmio (Hernández y col., 2018). La extracción del cinc a través de su forma de óxidos se lleva a cabo por la presencia de coque, la formación de monóxido de carbono al combustionar el coque y alcanzando temperaturas máximas de 1200°C intervienen en las reacciones de reducción que dan lugar a la formación del óxido de Waelz (Madías, 2009). Los métodos pirometalúrgicos para la remoción de cinc requieren altos consumos de energía (Dvorak y Vu, 2017); además, se requiere de coque para llevar a cabo la reducción y el Fe queda atrapado en una escoria lo que dificulta su recuperación.

Los métodos hidrometalúrgicos son una alternativa al procesamiento de los subproductos siderúrgicos, la lixiviación con ácidos o bases se ha empleado para la remoción de cinc. Generalmente, con este método se puede remover cinc de polvos siderúrgicos (Shawabkeh, 2010).

El ácido sulfúrico es uno de los agentes de lixiviación más utilizados para la remoción del cinc en los polvos del horno de arco eléctrico, de acuerdo a la literatura (Shawabkeh, 2010) las posibles reacciones del cinc (óxidos de cinc y ferritas de cinc) con el ácido sulfúrico son las siguientes:

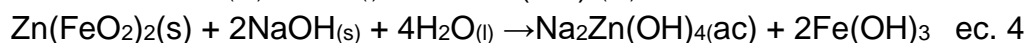
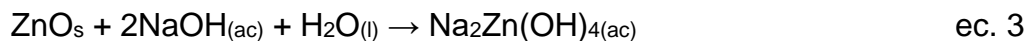


Según Brunelli y Dabalá (2015), se puede remover arriba de un 80% de Zn en polvos del horno arco eléctrico utilizando técnicas convencionales (lixiviación a presión atmosférica con agitación) y técnicas no convencionales (lixiviación a

presión atmosférica con ultrasonido), a temperaturas de 80°C y concentraciones de 2M de ácido sulfúrico. Con el incremento en la concentración y temperatura se puede lograr una mayor remoción de Zn del sólido.

En la lixiviación básica se ha utilizado el hidróxido de sodio en la extracción del Zn. Orhan (2005) realizó un estudio a nivel laboratorio para determinar la lixiviación de Zn en los polvos del horno arco eléctrico en un medio alcalino (NaOH). Con base en este estudio se determinó que se puede remover cinc hasta en un 80% utilizando una temperatura de 95°C y una concentración de 10M de NaOH durante 2 horas. Adicionalmente, en su investigación mostró que existe un aumento en la remoción de Zn por el incremento en el tiempo de permanencia.

Youcai y Stanforth (2000) realizaron una investigación acerca del proceso de hidrometalurgia para la remoción de cinc a través de polvos del horno arco eléctrico en soluciones alcalinas. Las reacciones que plantearon para la interacción de óxidos y ferritas de cinc durante la lixiviación alcalina fueron las siguientes:



Con el uso de la hidrometalurgia se puede separar cinc de los óxidos y ferritas de cinc para la recuperación de Fe. Adicionalmente, la separación magnética es el proceso más indicado para el enriquecimiento de Fe y separación de C de los subproductos. Se ha reportado en la literatura (Yehia y El-Rehiem, 2005) el reciclado de unidades Fe en polvos del alto horno a través de la separación magnética (SM), con este método se puede recuperar la fracción de magnetita, obteniéndose concentrados de 61-64% e.p. de Fe (Das y col., 2002).

En AHMSA se cuenta con subproductos de alto horno confinados, estos materiales presentan contenidos de Fe atractivos para su reproceso. Sin embargo, en la planta no se cuenta con la información e investigación para el desarrollo de un proceso que permita la extracción de estas unidades. En la literatura (Madías, 2009) existen trabajos relacionadas al tratamiento de polvos del colector en condiciones específicas, por otro lado, el proceso de lixiviación propuesto por investigaciones (De la Torre, 2013) y su planteamiento a nivel industrial dificulta su escalamiento. Por este motivo, en este documento se estudia la factibilidad a nivel laboratorio de utilizar un proceso híbrido de separación magnética y lixiviación de

polvos de colector con baja concentración de Zn ($0.5 < \text{Zn}$) para la recuperación de unidades Fe y disminución en el contenido de Zn en el PCAH, con el fin de su posible reutilización como materia prima en procesos de peletización y sinter de AHMSA.

MATERIALES Y MÉTODOS

El polvo del colector fue tratado siguiendo el proceso mostrado en el diagrama de flujo de la figura 1.

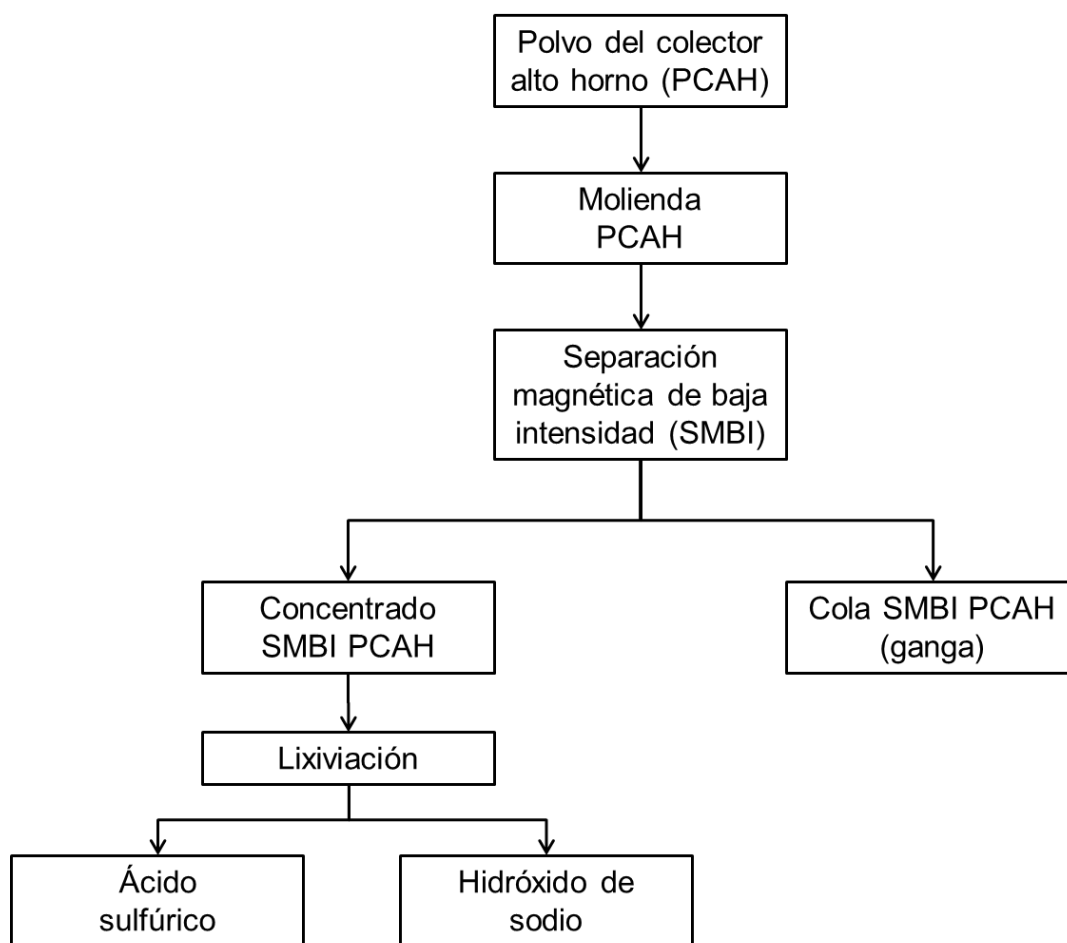


Figura 1. Diagrama de flujo de proceso.

Caracterización de polvo colector

Se obtuvo una muestra del polvo colector del alto horno (PCAH) para el análisis de composición química por espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX). La determinación del carbón y azufre fue por medio de combustión con detección infrarroja LECO. Se realizó un análisis de difracción de rayos X (DRX) para determinar las fases cristalinas presentes en el PCAH. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis microestructural por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB).

Molienda y separación magnética

El polvo colectado del alto horno fue tratado antes de los experimentos, la materia prima (polvo del colector del alto horno; PCAH) es homogenizada y se toma una muestra representativa de acuerdo a las prácticas de laboratorio utilizadas en AHMSA las cuales se describen a continuación:

1. Una cantidad de 15kg de PCAH es tomada y homogenizada en una placa de acero y un cuarteador, el material se mezcla y se apila con ayuda de una pala, el proceso se repite 5 veces.
2. Luego de homogenizar el PCAH en la placa se toma una muestra de 1.2kg y se lleva al área de molienda.
3. La muestra de 1.2kg es colocada dentro del molino con agua para realizar una molienda por medio acuoso (obtención de un 85% de sólidos a -325 mallas de acuerdo a prácticas establecidas en laboratorio AHMSA), la relación agua:sólidos empleada es de 0.43 y el tiempo de molienda es de 2 horas.
4. El material molido (-325 Y +325) es secado en parrillas a una temperatura de 100°C por 6 horas.

Luego de haber sometido el PCAH a molienda y reducir su tamaño de partícula, el PCAH es procesado por separación magnética de baja intensidad (SMBI). La práctica se realizó de la siguiente manera con base en las instrucciones estándar del laboratorio AHMSA:

1. El PCAH molido es colocado en un recipiente de 20L con agua y mezclado manualmente para obtener una pulpa del PCAH.
2. La pulpa de PCAH es separada y lavada, el proceso empieza con la adición de pulpa a través de un contenedor de entrada del dispositivo SMBI. Una vez que las partículas son atraídas al imán, estas se separan por medios manuales para

así obtener un concentrado de partículas magnéticas a partir de la pulpa del PCAH. El proceso se repite 2 veces para lavar el concentrado.

3. El concentrado SMBI PCAH es pesado y de esta forma se obtiene la cantidad de material recuperado. La composición química del concentrado y cola se analizaron por FRX y LECO.

Proceso de lixiviación

La lixiviación es un proceso por medio del cual un compuesto puede ser separado para recuperar y/o remover un elemento en específico. Se estudió el efecto de la lixiviación con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio sobre la remoción del cinc en el concentrado SMBI PCAH.

La muestra de concentrado SMBI PCAH fue sometida al proceso de lixiviación con agitación y temperatura con el fin de reducir el contenido de Zn. Los parámetros de proceso que se utilizaron en las pruebas de lixiviación realizadas al PCAH fueron 0.5M y 1M de H_2SO_4 , 2M y 8M de NaOH, tiempo de 15 min y 30 min, y temperatura ambiente y $60^\circ C$. Estos parámetros se seleccionaron basados en datos de literatura para el tratamiento de lixiviación de polvos siderúrgicos con ácido sulfúrico (Havlik y col., 2006; Oustadakis y col., 2010). Estudios sobre la lixiviación de Zn de polvos de acerías utilizando hidróxido de sodio sirvieron de base para determinar los parámetros en soluciones alcalinas (Palimaka y col., 2018).

El procedimiento de lixiviación se realizó de la siguiente manera:

1. Se prepararan las soluciones de ácido sulfúrico (0.5M y 1M) e hidróxido de sodio (2M y 8M), y se mide el pH. Se toma una cantidad de 100ml para cada una de los ensayos.
2. Una muestra de 10g del concentrado SMBI PCAH se utiliza para llevar a cabo la lixiviación en ácido sulfúrico o hidróxido de sodio.
3. La solución es calentada hasta alcanzar la temperatura de $60^\circ C$.
4. Una vez alcanzada la temperatura de $60^\circ C$, el concentrado SMBI PCAH es añadido al recipiente con la solución en agitación y se empieza a contar el tiempo de permanencia (15 min o 30 min).
5. Finalizado el tiempo de permanencia, el material sólido recuperado es vertido sobre filtros y lavado 5 veces con agua destilada.

6. El sólido lixiviado es secado en parrillas a una temperatura de 100°C por 6 horas. Por último, se analiza su composición química por FRX y se determina el % e.p. de Zn final.

Con base en el % e.p. de Zn estimado en FRX del concentrado SMBI de PCAH antes y después del proceso de lixiviación se utiliza la ecuación 5 para cuantificar el porcentaje de Zn removido del sólido.

$$\text{Porcentaje de Zn removido (\% Zn)} = \frac{\% \text{Zn}_o - \% \text{Zn}_f}{\% \text{Zn}_o} \times 100\% \quad \text{ec. 5}$$

Porcentaje de Zn removido (% Zn), es el porcentaje de cinc extraído del sólido después del proceso de lixiviación; % Zn_o, es el % e.p. de cinc inicial en el sólido concentrado SMBI PCAH; % Zn_f es el % e.p. de cinc final en el concentrado SMBI PCAH después del proceso de lixiviación con ácido sulfúrico o hidróxido de sodio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La composición química del PCAH antes de su procesamiento es presentada en la tabla 1. Es importante señalar que los resultados mostrados en la tabla 1 como composiciones oxidadas y en su forma elemental se deben principalmente a los requerimientos de las plantas de sinter y pellet en las cuáles este subproducto pretende ser utilizado. La composición química en su forma elemental y óxidos en los procesos de sinter y pellet, se utiliza para estimar el contenido en volumen de escoria, álcalis e índice de basicidad (parámetro operativo en alto horno) que pueden generar. La determinación de las unidades de Fe es importante para el balance de materia en los procesos de sinter, pellet y alto horno.

Tabla 1. Composición química (% e.p.) del polvo colector del alto horno.

Elementos y óxidos	Fluorescencia de rayos X											LECO	
	Fe	Zn	P	Ti	SiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MnO	C	S
% e.p.	39.46	0.18	0.08	0.22	7.35	0.24	0.86	4.53	0.08	1.82	0.48	32.24	0.49

La figura 2 presenta el patrón de difracción de rayos X (DRX) de la muestra de polvo colector. Se puede observar la presencia de las principales fases como: magnetita (Fe₃O₄), hematita (Fe₂O₃), wustita (FeO), cuarzo (SiO₂) y calcita

(CaCO₃), estas fases son similares a las encontradas en la literatura en el polvo del colector del alto horno (El-Hussiny, 2010). La magnetita es un material magnético que se puede recuperar mediante la separación magnética de baja intensidad (Das y col., 2002), con el uso de esta técnica y el campo magnético inducido generado alrededor de 2000 Gauss (Murariu, 2013), se pueden atraer las partículas hacia la superficie del imán.

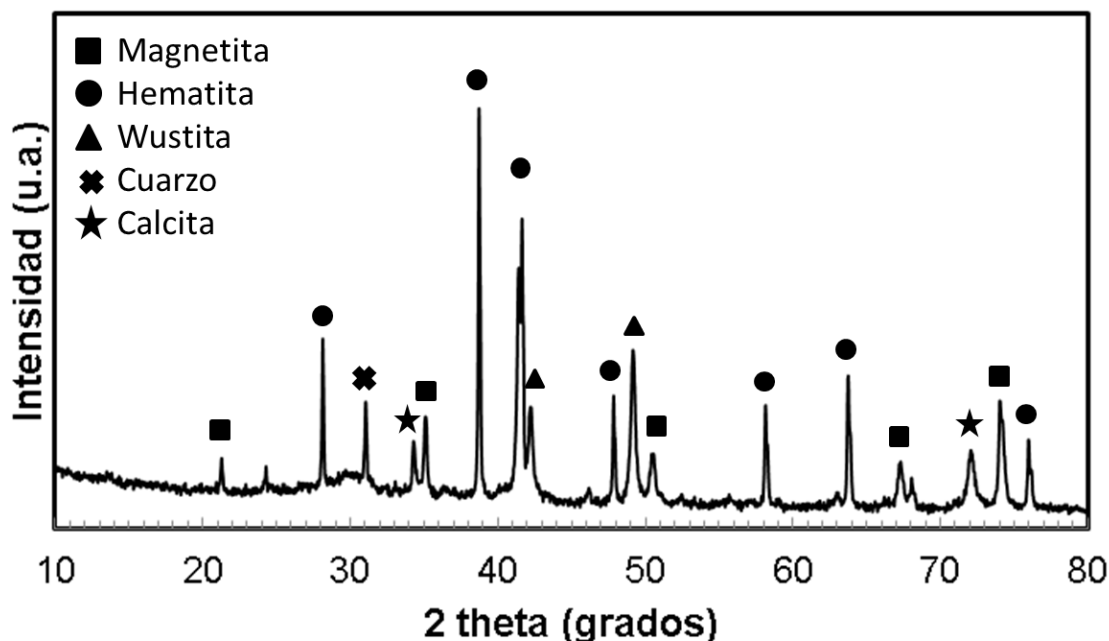


Figura 2. Espectro de difracción de rayos X del polvo del colector del alto horno.

La tabla 2 muestra los resultados de la composición química del concentrado SMBI PCAH y cola SMBI PCAH obtenido del polvo colector del alto horno. En la tabla 2 se pueden encontrar de forma elemental los contenidos de Fe, Zn, P, Ti, C y S, mientras que el resto de los elementos en forma de óxidos. El contenido de Fe en el PCAH inicialmente fue de 39.46% e.p. (tabla 1) con el procesamiento del polvo colector por medio de separación magnética el Fe detectado en el concentrado SMBI PCAH fue de 63.11% e.p., valor superior al PCAH. El contenido de cinc en el PCAH fue de 0.18% e.p. mientras que en el concentrado SMBI PCAH fue de 0.442% e.p., valor superior. El incremento en el contenido de Fe en el concentrado SMBI PCAH se debe principalmente a que con el proceso de separación magnética se retienen las partículas que son magnéticas logrando de esta manera separar las partículas magnéticas de las no magnéticas (Das y col.,

2002; Arol y Aydogan, 2004). El contenido de Fe en la cola SMBI PCAH fue de 27.67% e.p. lo que representa un valor menor al inicial en el polvo del colector. Además, se puede observar en la tabla 2 que el contenido de C en la cola SMBI PCAH se incrementó debido a que este elemento no es magnético. No obstante, hay que tomar en consideración que con la separación magnética compuestos con propiedades magnéticas como la ferrita de cinc (Ebrahimi y col., 2014) e incrustaciones de partículas no magnéticas en partículas magnéticas pueden ser arrastradas con el uso de la separación magnética.

Tabla 2. Concentrado y cola SMBI del polvo colector del alto horno.

Elementos y óxidos	Fluorescencia de rayos X											LECO	
	Fe	Zn	P	Ti	SiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MnO	C	S
Concentrado SMBI % e.p.	63.11	0.442	0.051	0.267	2.573	0.144	1.347	3.136	0.209	0.73	0.341	0.676	0.398
Cola SMBI % e.p.	27.67	0.17	0.094	0.186	8.413	0.308	0.807	4.902	0.209	2.131	0.527	40.83	0.582

En la figura 3 se muestra una imagen en mapeo de una partícula del PCAH tomada en el microscopio electrónico de barrido (MEB). Se puede observar en la imagen que la partícula está compuesta principalmente por los elementos Fe, Zn, Si, Ca y O. Con base en los resultados de DRX, el silicio está presente en la forma de cuarzo (SiO₂), el calcio como calcita (CaCO₃), el Fe en magnetita (Fe₃O₄) y hematita (Fe₂O₃), mientras que el cinc de acuerdo con Vereš y col. (2011) en su forma de ZnO y ZnFe₂O₄. La partícula está constituida por una matriz de Fe, el Zn se encuentra disperso sobre la matriz. Por su parte, el Si y el Ca no se encuentran sobre toda la superficie de la partícula. En el análisis de rayos X se detectaron las fases de cuarzo y calcita, como se aprecia en el mapeo de la partícula PCAH (figura 3), estos elementos (Si y Ca) están concentrados en zonas de la partícula.

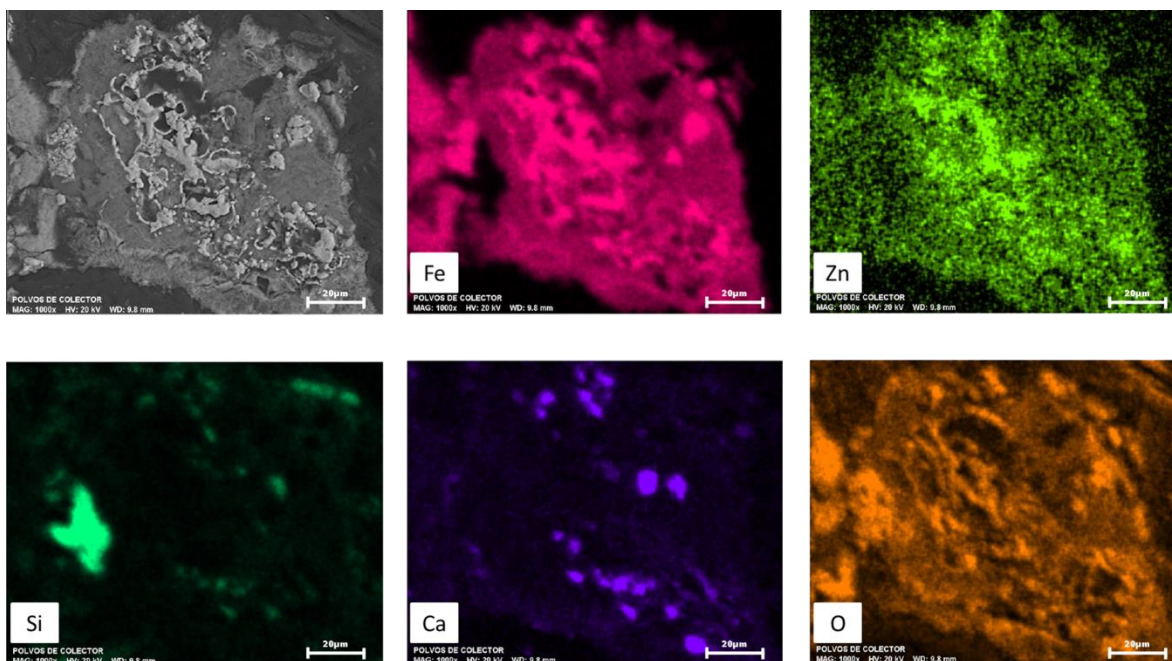


Figura 3. Imagen de mapeo de polvo colector de alto horno.

La figura 4 muestra el porcentaje de Zn del concentrado SMBI PCAH después del proceso de lixiviación con ácido sulfúrico. Se puede observar que el contenido de Zn removido es de hasta 79% (figura 4) en el concentrado SMBI PCAH. El incrementar la temperatura de ambiente a 60°C aceleró la remoción del Zn en el concentrado SMBI PCAH para concentraciones de 0.5M y 1M (H₂SO₄). El incremento en el tiempo de permanencia de las partículas en la solución de ácido sulfúrico aumentó el porcentaje de Zn removido del concentrado SMBI PCAH recuperado.

La figura 5 muestra el porcentaje de Zn del concentrado SMBI PCAH después del proceso de lixiviación con hidróxido de sodio. El incrementar la concentración de 2M a 8M de NaOH aumentó el porcentaje de Zn removido del concentrado SMBI PCAH en comparación con el incremento en el tiempo (15 min y 30 min) y la temperatura (ambiente y 60°C). El valor máximo de Zn removido en el concentrado SMBI PCAH recuperado después del proceso de lixiviación alcalina fue de 27%.

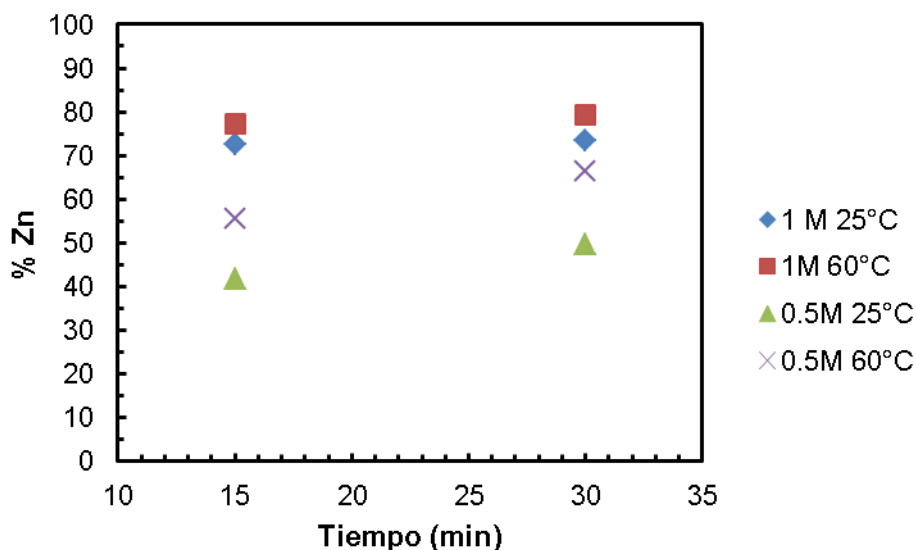


Figura 4. Porcentaje de Zn removido del concentrado SMBI PCAH a concentraciones de 0.5M y 1M de ácido sulfúrico, y temperatura de 25°C y 60°C.

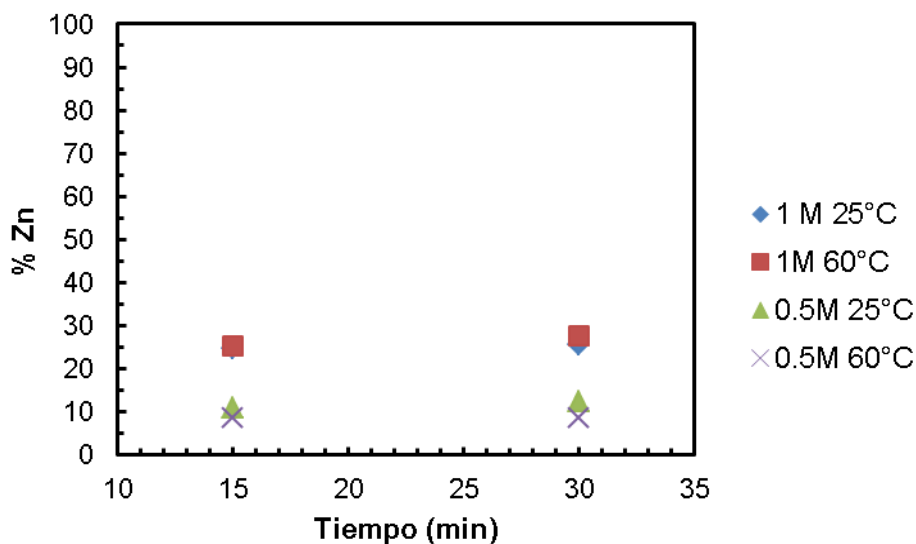


Figura 5. Porcentaje de Zn removido del concentrado SMBI PCAH a concentraciones de 2M y 8M de hidróxido de sodio, y temperatura de 25°C y 60°C.

Los diagramas Eh-pH muestran la estabilidad de iones y fases en dependencia del pH y potencial, estos diagramas se utilizan en los procesos REDOX (reducción-oxidación) y han sido herramientas útiles en la hidrometalurgia. Las soluciones ácidas utilizadas en los experimentos de lixiviación presentaron un pH de 0 para la

concentración de 1M en ácido sulfúrico mientras que cuando la concentración fue de 0.5M el pH medido fue 0.3. Havlik y col. (2006) realizaron un estudio termodinámico utilizando los diagramas Eh-pH para sistemas Zn-Fe-H₂O, en sus estudios se menciona que la estabilidad de los iones Zn²⁺_(ac) y Fe²⁺_(ac) es factible en la región ácida (pH 0-5), si el pH se desplaza hacia la izquierda en la zona ácida (pH 0), la zona de estabilidad será mayor. La precipitación de estos iones (Zn²⁺_(ac) y Fe²⁺_(ac)) es posible conforme se disminuye el potencial (0.8 volts a 0 volts) y se incrementa el pH (arriba de 5). El aumento en la temperatura de 25°C a 100°C influye en la estabilidad de los iones Zn²⁺_(ac) y Fe²⁺_(ac) desplazando su línea de estabilidad hacia la zona ácida. El pH medido en los experimentos para las concentraciones de 0.5M-1M de H₂SO₄ fue de 0 y 0.3, por lo que, la solubilidad del cinc en la solución de ácido sulfúrico puede ser posible. Las reacciones efectuadas entre los compuestos de cinc y la solución de ácido sulfúrico dan como resultado la disolución de iones Zn²⁺ y SO₄²⁻ más precipitados (Shawabkeh, 2010).

Po otra parte, el hidróxido de sodio reportó un pH cercano a 14. En los diagramas Eh-pH de la investigación realizada por Havlik y col. (2006) para sistemas Zn-Fe-H₂O se mantiene la estabilidad de los compuestos de cinc (ferritas de cinc) para un pH por encima de 5. Sin embargo, en los diagramas de equilibrio presentados por Dutra y col. (2006) indican que el cinc se puede disolver tanto en medios ácidos y básicos. Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que el cinc no fue soluble y no se removió del concentrado SMBI PCAH cuando fue sometido a lixiviación alcalina (NaOH). Havlik y col., (2006) mencionan que la estructura del compuesto de cinc presente en el sólido a lixiviar es el principal causante de su capacidad de disolución, mientras que el óxido de cinc es fácilmente lixiviado en soluciones ácidas, en contraste, las ferritas de cinc (franklinita) son compuestos que difícilmente serán diluidos.

La temperatura es otro factor que influye en la remoción de Zn, en los concentrados SMBI PCAH la extracción del cinc fue mayor a temperaturas de 60°C para las soluciones de ácido sulfúrico. Shawabkeh, (2010) menciona que la temperatura influye directamente en los proceso de difusión y transferencia de masa, de esta manera se acelera la disolución de cinc. En este estudio, no se observó efecto en la variación de la temperatura en las lixivitaciones realizadas con hidróxido de sodio, posiblemente, a la estructura del cinc (ferritas de cinc) presente en el polvo del colector. El cambio en la concentración de NaOH (2M-8M) fue el parámetro que influyó en la remoción del cinc del polvo del colector.

Conclusiones

En este estudio se evaluó a nivel laboratorio la composición química y la lixiviación de Zn del concentrado SMBI obtenido a partir de un polvo del colector generado del alto horno. El incremento en el contenido de Fe en el concentrado SMBI PCAH por el proceso de separación magnética de baja intensidad potencia su aplicación como material de reciclado debido a los rangos de Fe que se requieren en los procesos primarios.

En los estudios de lixiviación las soluciones ácidas (ácido sulfúrico) reportaron mayor porcentaje de Zn removido en el concentrado SMBI PCAH en comparación con las soluciones básicas (hidróxido de sodio). Se logró la máxima extracción de cinc (79%) utilizando los parámetros: 1M de ácido sulfúrico, 30 min y 60°C.

El uso de la hidrometalurgia o métodos físicos de separación pueden ser procesos alternativos para refinar y hacer viable el reciclado de subproductos en los procesos primarios.

Bibliografía

Aitici, U. & Ersoy, A. (2008). Evaluation of destruction specific energy of fly ash and slag admixed concrete interlocking paving blocks (CIPB). *Construction and Building Materials*. 22(7): 1507-1514.

Andersson, A., Ahmed, H., Rosenkranz, J., Samuelsson, C. & Bjorkman, B. (2017). Characterization and upgrading of a low Zinc-containing and fine blast furnace sludge – a multi objective analysis. *ISIJ International*. 57(2): 262-271.

Arol, A. & Aydogan, A. (2004). Recovery enhancement of magnetite fines in magnetic separation. *Colloids and surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*. 232(2): 151-154.

Binici, H., Aksogan, O., Nuri, M., Akca, E. & Kapur, S. (2007). Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as Wall materials. *Construction and Building Materials*. 21(4): 901-906.

Brunelli, K. & Dabalá, M. (2015). Ultrasound effects on zinc recovery from EAF dust by sulfuric acid leaching. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 22(4): 353-362.

Das, B., Prakash, S., Reddy, P., Biswal, S., Mohapatra, B. & Misra, V. (2002). Effective utilization of blast furnace flue dust of integrated steel plants. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*. 2(2): 61-68.

De la Torre, C., Guevara, A. & Espinoza, C. (2013). Valorización de polvos de acería, mediante recuperación de zinc por lixiviación y electrólisis. *Revista Politécnica*. 32(1): 51-56.

Díaz, J., Izquierdo, S., Mejía, R. & Gordillo, M. (2013). Mezcla ternaria de cemento Portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad. *Revista de la construcción*. 12(3): 53-60.

Ding, L., Ning, W., Wang, Q., Shi, D. & Luo, L. (2015). Preparation and characterization of glass-ceramic foams from blast furnace slag and waste glass. *Materials letters*. 141: 327-329.

Dutra, A., Paiva, P. & Tavares, L. (2006). Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Minerals Engineering*. 19(5): 478-485.

Dvorak, P. & Vu, H. (2017). Zinc recovery from flue dust. *Journal of the polish mineral engineering society*. 18: 195-198.

Ebrahimi, M., Raeisi, R., Seyyed, S. & Masoudpanah, S. (2014). Magnetic Properties of Zinc Ferrite Nanoparticles Synthesized by Coprecipitation Method. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 27(6): 1587-1592.

El-Hussiny, N. & Shalabi, M. (2010). Effect of recycling blast furnace flue dust as pellets on the sintering performance. *Science of sintering*. 42(3): 269-281.

El-Mahllawy, M. (2008). Characteristics of acid resisting bricks made from quarry residues and waste steel slag. *Construction and Building Materials*. 22(8): 1887-1896.

El-Nouhy, H. (2014). Effect of high temperature on properties of bricks using granulated blast furnace slag as aggregate replacement. *Key Engineering Materials*. 600: 227-239.

Havlik, T., Vidor, B., Moura, A., Homrich, Ivo & Miskufova, A. (2006). Hydrometallurgical processing of carbon Steel EAF dust. *Journal of Hazardous Materials*. 135(1-3): 311-318.

Hernández, L., Daza, I., Amaral, G., Beneduce, F. & Lenz, G. (2018). Microstructural, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process. *Matéria*. 23(2): e12006.

Koplík, J., Kalina, L., Másilko, J. & Šoukal, F. (2016). The characterization of fixation of Ba, Pb, and Cu in alkali-activated fly ash/blast furnace slag matrix. *Materials*. 9(7): 533.

Lizarazo, J. & Claisse, P. (2011). Influencia de la adición de escoria de alto horno en la penetración de cloruros en el concreto. *Ingeniería e Investigación*. 31(2): 39-47.

Madías, J. (2009). Reciclado de polvos de horno eléctrico. *Acero Latinoamericano*. 23: 38-47.

Murariu, V. (2013). Simulating a low intensity magnetic separator model (LIMS) using DEM, CFD and FEM magnetic design software. In The 4th International Computational Modelling Symposium, Cornwall. *Minerals Engineering International*. 301- 314.

Orhan, G. (2005). Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Hydrometallurgy*. 78(3): 236-245.

Oustadakis, P., Tsakiridis, P., Katsiapi, A. & Agatzini, 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.

Palimaka, P., Pietrzyk, S., Stepień, M., Ciecko, K. & Nejman, I. (2018). Zinc recovery from steelmaking dust by hydrometallurgical methods. *Metals*. 8(7), 547.

Rondón, H., Ruge, J., Patiño, D., Vacca, H., Reyes, F. & Muniz, M. (2018). Blast furnace slag as a substitute for the fine fraction of aggregates in an asphalt mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 30(10): 04018244.

Seigneur, N., Gauthier, A., Bulteel, D., Buatier, M., Recourt, P., Damidot, D. & Potdevin, J. (2007). Effect of Pb-rich and Fe rich entities during alteration of a partially vitrified metallurgical waste. *Journal of Hazardous Materials*. 149(2): 418-431.

Shawabkeh, R. (2010). Hydrometallurgical extraction of zinc from Jordanian electric arc furnace dust. *Hydrometallurgy*. 104(1): 61-65.

Vereš, J., Jakabský, Š. & Lovás, M. (2011). Zinc recovery from iron and steel making wastes by conventional and microwave assisted leaching. *Acta Montanistica Slovaca*. 16(3): 185-191.

Yehia, A. & El-Rehiem F. (2005). Recovery and utilization of iron and carbon values from blast furnace flue dust. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*. 5(2): 184-189.

Yin, X., Zhang, C., Cai, Y., Zhao, C., Yang, J. & Li, B. (2017). Molten slag bath reduction: Carbon-thermal reduction of blast furnace dust in molten blast furnace slag. *IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering*. 230: 012027.

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(1-3): 223-240.