

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.37.2.6241>

Estudio preliminar sobre el aprovechamiento de escoria de fundición de plomo secundario en la obtención de mezclas asfálticas

Preliminary study about use of secondary lead smelting slag in the production of asphalt mixtures

DIANA M. TORRES CASTELBLANCO *

LUISA F. MOSQUERA IDROBO **

JANNETH TORRES AGREDO ***

SULLY F. VALENCIA VIVAS ****

SERGIO GALLEGO RESTREPO *****

FERNANDO ALVAREZ HINCAPIE *****

*Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia. Ingeniera ambiental.
dimtorresca@unal.edu.co

** Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia. Ingeniera ambiental.
lufmosqueraid@unal.edu.co

*** Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Profesora asociada del Departamento de Diseño, Colombia. Ph.D. en Ingeniería. jtorresa@unal.edu.co

**** Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia. Ingeniera ambiental.
sfvalenciav@unal.edu.co

***** Ingeniero Químico. sergio.gallego.restrepo@jci.com

***** MSc. en Química Analítica. fernando.alvarez.hincapie@jci.com

Correspondencia: Janneth Torres Agredo, carrera 32 n.° 12-00, Universidad Nacional de Colombia, Palmira (Colombia). Edificio 25, Oficina 3180. Tel: (57 +2)2868888 Ext. 35723.

Subvenciones: Universidad Nacional de Colombia, Convocatoria Nacional de Proyectos para el Fortalecimiento de la Investigación, Creación e Innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2016-2018.



Resumen

En las últimas décadas se ha presentado un rápido incremento en la producción de residuos industriales. Para la mayoría de los residuos no se encuentra un uso efectivo y causan una crisis de disposición, contribuyendo así a los problemas ambientales. Este trabajo se basa en la valoración de una escoria secundaria de plomo, como agregado en mezclas asfálticas. La escoria proviene de una industria colombiana que se dedica a la producción y comercialización de baterías de plomo-ácido. Se caracteriza por tener una forma amorfa, está compuesta por óxidos de hierro, azufre, sodio, entre otros. El objetivo del trabajo fue realizar un estudio preliminar sobre la viabilidad técnica y ambiental de la aplicación de una escoria de fundición de plomo secundario en mezclas asfálticas, con el propósito de aprovechar y darle un valor agregado a dicho residuo. Se realizó una caracterización del residuo, en cuanto al tamaño de partícula, composición química y mineralógica; además se midieron parámetros de calidad para agregados en mezclas asfálticas, así como también se realizó el ensayo de Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad (TCLP por sus siglas en inglés) para determinar las características tóxicas de la escoria. Se observó que la escoria secundaria de plomo tiene potencial para ser utilizada en mezclas asfálticas, cumpliendo con los estándares límites de toxicidad.

Palabras clave: aprovechamiento, escorias, mezclas asfálticas, plomo, residuos.

Abstract

In the last decades there has been a rapid increase in the production of industrial waste. For most waste there is no effective use and cause a disposal crisis, contributing to environmental problems. This work is based on the evaluation of a secondary slag of lead, as an aggregate in asphalt mixtures. The slag comes from a Colombian industry dedicated to the production and marketing of lead-acid batteries. The slag is characterized by having an amorphous form, it is composed of oxides of iron, sulfur, sodium, and others. The objective of the work was to carry out a preliminary study on the technical and environmental feasibility of the application of a secondary lead smelter slag in asphalt mixtures, in order to take advantage of and add value that residue. A characterization of the residue, as far as the particle size, chemical and mineralogical composition was carried out; in addition, quality parameters for aggregates in asphalt mixtures were measured, as well as TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) tests to determine the toxic characteristics of the slag. It was observed that the secondary slag of lead has potential to be used in asphalt mixtures, complying with the limits of toxicity standards.

Keywords: asphalt mix, lead, slags, use, waste.

1. INTRODUCCIÓN

Con el pasar del tiempo el mundo ha ido evolucionando, cambiando así los sistemas de producción y de consumo de las sociedades que conlleva a un cambio en el estilo de vida de las personas, lo cual ha provocado un aumento en la generación de residuos y así mismo un incremento de los residuos peligrosos [1]. Según un informe realizado por el Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA) en el año 2015 [2], los residuos sólidos urbanos que se originan en los hogares, el comercio, la industria y la construcción son alrededor de 7 a 10 mil millones de toneladas.

Todas las actividades industriales generan gran cantidad de residuos líquidos y sólidos, incluyendo residuos peligrosos; estos tienen su origen en materiales agotados, productos secundarios, tratamientos y productos químicos comerciales [3]. Los residuos generados en procesos industriales muchas veces no se pueden reciclar o recuperarse porque no se tiene claro cuáles son sus posibilidades para que puedan ser reincorporados en un proceso productivo, o simplemente no existe la tecnología adecuada [4].

Alrededor del mundo, la industria del reciclaje de plomo se ha convertido en una de las principales fuentes de obtención de este metal; el porcentaje de reciclaje es de aproximadamente el 60% [5]. El plomo es recuperado de las baterías de plomo-ácido, tuberías de plomo, pantallas de cristal líquido (LCD) y de las escorias que se generan en los procesos de fundición [6]. El proceso de reciclaje del plomo genera altas cargas contaminantes, en términos de emisiones de gases a la atmósfera y de residuos sólidos. En cuanto a los residuos sólidos, esta industria produce anualmente 200 000 toneladas de escoria secundaria [7]. La escoria de plomo está formada por las impurezas presentes en las materias primas y por los materiales que se agregan al proceso de fundición [8].

Las escorias de plomo secundario son un residuo procedente de las baterías vencidas de plomo metálico que resulta de la transformación del sulfato de plomo ($PbSO_4$) y de óxidos de plomo (PbO y PbO_2), hasta convertirse a plomo metálico [9]. La escoria está compuesta por óxidos de hierro, magnesio, sílice, aluminio, entre otros [5]; esta composición puede variar dependiendo de la materia prima y del proceso de fundición [8]. Diversos autores han investigado el uso de diferentes escorias para materiales de construcción. La escoria secundaria de plomo se ha estudiado como agregado parcial para la producción de bloques de hormigón [9]-[11].

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones sobre el aprovechamiento de escorias de ferrocromo, acero y cobre como agregados en la producción de mezclas asfálticas. Yılmaz et al. [12] encontraron que la escoria de ferrocromo puede ser utilizada para capas granulares de pavimentos flexibles, ya que la escoria presentó mejores propiedades técnicas que los agregados naturales, en cuanto al valor de abrasión de los ángeles, resistencia a la congelación-descongelación y a la relación de rodamiento de

california. Lind et al. [13] estudiaron el impacto ambiental de la escoria de ferrocromo en condiciones de campo; evaluaron la concentración de metales (Cr, Co, Ni, Sn y W) en el suelo y encontraron que el Sn y W estaban por debajo del límite de detección (10 mg/kg) y el resto de los metales presentaron concentraciones bajas.

Por otro lado, Ferreira et al. [14] estudiaron el comportamiento ambiental de la escoria de horno de arco eléctrico para ser utilizada en la construcción de carreteras y determinaron que la escoria de acero puede ser utilizada como agregado grueso para la construcción de pavimentos de mezclas en caliente, disminuyendo así los impactos ambientales generados por la explotación de áridos naturales y por la disposición de escoria en rellenos sanitarios. Chen et al. [15] en su estudio evaluaron la incorporación de agregados finos de escoria de acero en mezclas asfálticas en caliente, teniendo como resultado un material con resistencia a la humedad, deformación y fisura. Behnood et al. [16] evaluaron la posibilidad de utilizar escorias de acero como agregado grueso o fino en mezclas de matriz de asfalto de piedra (SMA por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron que al utilizar la escoria aumentó la resistencia a la tracción indirecta (833 kPa) y el módulo de elasticidad (entre 27 y 31 %) comparado con la mezcla control (piedra caliza). Las mezclas presentaron mejores rendimientos cuando la escoria se reemplaza como agregado grueso.

Raposeiras et al. [17] investigaron el uso de la escoria de cobre como agregado en mezclas asfálticas que contenían pavimento asfáltico recuperado; encontraron que el uso de la escoria mejoraba el rendimiento de las mezclas asfálticas, con porcentajes de adición del 35 % de escoria de cobre y 20 % de pavimentos asfáltico recuperado. Hassan et al. [18] utilizaron escoria de cobre granulada como agregado fino en mezclas asfálticas en caliente; las mezclas contenían porcentajes de escoria de 5, 10, 15, 20, 30 y 40 %. Los autores encontraron que mezclas con un porcentaje de adición de hasta un 10 % de escoria puede resultar satisfactorio, además de presentar mejor resistencia a la tracción que las mezclas con agregado convencional.

Mithun et al. [19] presentan un estudio que incorpora la escoria de cobre como agregado fino en mezclas de concreto activado con álcali; la escoria en la mezcla se adicionó con porcentajes de 25, 50, 75 y 100 % como sustitución de la arena. Realizaron ensayos de resistencia a la compresión, flexión y al ataque de sulfato (soluciones de sulfato de sodio al 10 % y sulfato de magnesio 10 %). En cuanto a las resistencias no encontraron cambios significativos entre la arena y la escoria; las mezclas con arena y escoria presentaron una alta resistencia en un medio de sulfato de sodio, pero presentaron una reducción cuando se sometieron a un medio de sulfato de magnesio.

Este trabajo tiene como objetivo realizar un estudio preliminar sobre la viabilidad técnica y ambiental de la aplicación de una escoria de fundición de plomo secundario en mezclas asfálticas, con el propósito de aprovechar y darle un valor agregado a dicho residuo. Con esto se pretende reducir la disposición de escoria secundaria de

plomo en rellenos sanitarios y disminuir la presión que genera la construcción de carreteras sobre los áridos naturales.

2. METODOLOGÍA

Toma de muestras

Se evaluaron dos escorias de fundición de plomo secundario (ES1 y ES2), las cuales se obtuvieron de una empresa colombiana que realiza el proceso de fundición de plomo secundario. Las dos muestras de escoria se tomaron en diferentes tiempos de producción, pasaron previamente por un proceso de trituración para la reducción de tamaño de partícula y por un proceso de apagado que consiste en la adición de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que permite oxidar y bajar el pH de la escoria.

Composición química de las escorias

La composición química se llevó a cabo mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX), se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagisPro PW- 2440 Philips equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. La composición química para E1 y E2 se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS ESCORIAS

Características (%)	ES1	ES2	Características (%)	ES1	ES2
SO ₃	34,57	38,47	K ₂ O	0,09	0,04
Fe ₂ O ₃	32,76	28,45	P ₂ O ₅	0,08	0,06
Na ₂ O	23,6	24,79	Cu	0,08	0,22
SiO ₂	4,67	3,40	TiO ₂	0,07	0,03
Pb	1,43	2,27	Cr	0,07	0,07
CaO	0,70	0,61	Co	0,05	0,03
Al ₂ O ₃	0,53	0,36	Zn	0,03	0,04
Sn	0,41	0,38	As	0,03	0,03
Ba	0,31	0,25	Sr	69 ppm	-
Cl	0,14	0,10	Mo	52 ppm	50 ppm
MnO	0,14	0,13	Br	-	79 ppm
Sb	0,12	0,16	Ce	-	0,02
MgO	0,10	0,09			

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla 1, los principales elementos son el azufre (S), hierro (Fe) y sodio (Na), que junto con sus óxidos representan aproximadamente el 90 % de las escorias. Andrade et al. [5], Smaniotto et al. [7], Gomes et al. [8] y Penpolcharoen [9] presentan composiciones químicas de escorias secundarias de plomo similares a las obtenidas en este trabajo.

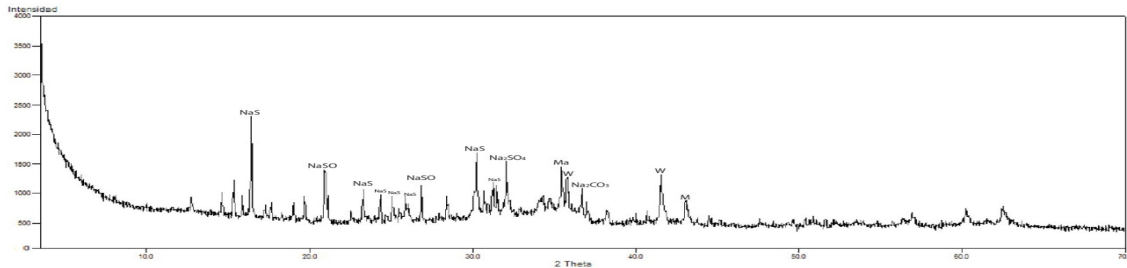
Según Gomes et al. [8], la escoria presenta generalmente gran cantidad de óxidos de hierro, pero la composición química puede variar dependiendo del proceso y de la materia prima que se utilice. El PbSO_4 es uno de los compuestos de las baterías de plomo-ácido [9], por lo tanto, es de esperar encontrar azufre en la escoria. Elementos como Fe y Na están presentes en las escorias ya que estos se añaden en el proceso de fundición, en forma de limadura de hierro y en forma de carbonato de sodio, respectivamente.

Composición mineralógica de las escorias

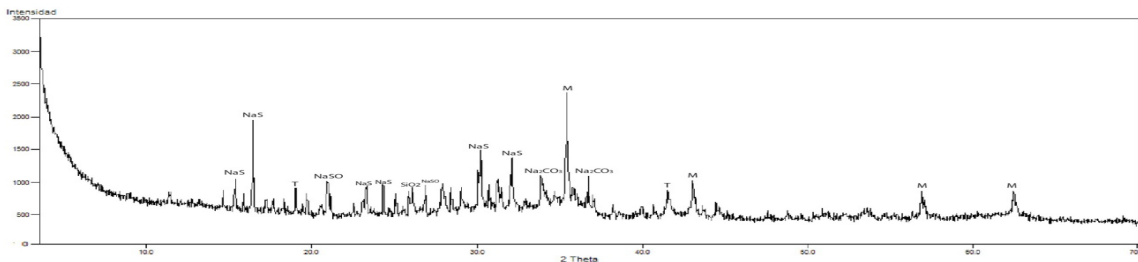
La composición mineralógica se determinó mediante la técnica de Difracción de rayos X (DRX), en un difractómetro de polvo con geometría DaVinci; las muestras no recibieron tratamiento térmico ni químico. El análisis de las fases presentes en ES1 y ES2, se realizó mediante comparación de los perfiles observados con los perfiles de la base de datos PDF-2, del Centro Internacional para Datos de Difracción (ICDD por sus siglas en inglés). En ambas muestras (ES1 y ES2) se observaron intensidades que no pudieron ser asignadas a alguna fase presente en la base de datos PDF-2.

En la figura 1, se presenta la composición mineralógica de las escorias. Se presentaron fases cristalinas como Sulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$), wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4), sulfato de sodio (Na_2SO_4), magnetita alta ($\text{Fe}_{2.929}\text{O}_4$), carbonato de sodio (Na_2CO_3), disodiotiosulfato pentahidratado ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})_5$), thenardita (Na_2SO_4), cuarzo alto (SiO_2). La composición mineralógica es similar a lo encontrado por Andrade et al. [5], De Angelis et al. [20] y Kim et al. [21].

(a)



(b)

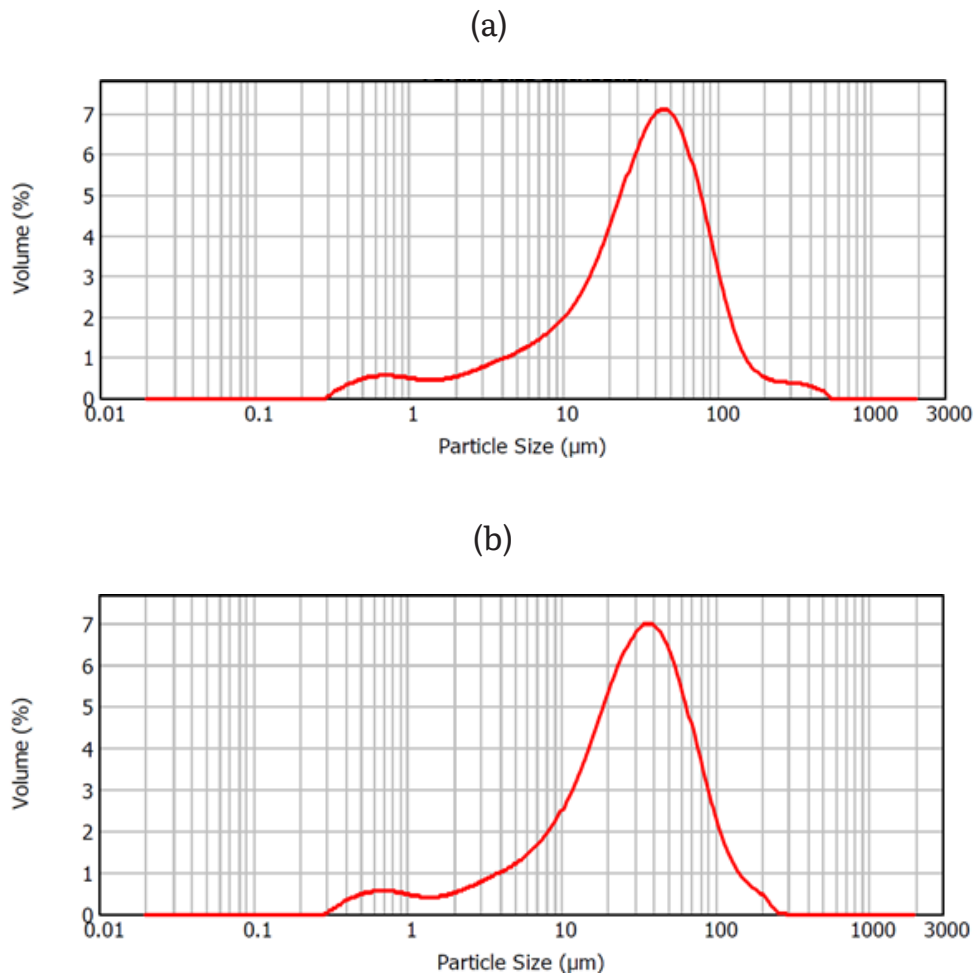


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 1. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X PARA LA ESCORIA (A) ES1 Y (B) ES2.
NaSO: SULFATO DE SODIO ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$), **W:** WUSTITA, **M:** MAGNETITA, Na_2SO_4 :
SULFATO DE SODIO, **MA:** MAGNETITA ALTA, Na_2CO_3 : CARBONATO DE SODIO, **NaS:**
DISODIOTIOSULFATOPENTAHIDRATADO, **T:** THENARDITA, SiO_2 : CUARZO ALTO

Tamaño de partícula

El tamaño de partícula se determinó a partir de la técnica de Granulometría Láser, MasterSizer 2000, entre un rango de 0,02 a 2000 μm . En la figura 2 se muestra la distribución de partícula en volumen (%) para las escorias. El tamaño medio de partícula para ES1 y ES2 es de 47, 613 μm y 38, 019 μm , respectivamente.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA: (A) ES1, (B) ES2

Para medir los parámetros ambientales de las escorias se realizó el test de lixiviación Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad (TCLP por sus siglas en inglés) según el método 1311 de la EPA, con el fin de medir metales lixiviables como plomo (Pb), arsénico (As) y selenio (Se). Los resultados fueron comparados con la norma colombiana de residuos peligrosos (Decreto 4741 de 2005).

Los ensayos de calidad de la escoria para mezclas asfálticas se realizaron solo para ES2, ya que ES1 y ES2 presentan características químicas, morfológicas y mineralógicas similares. Se realizaron ensayos de análisis granulométrico de los agregados (I.N.V. E – 213 – 13), para determinar el tamaño de agregados finos y gruesos de la escoria; determinación de cantidad de agregado fino que pasa el tamiz n.º 200 (75 µm) por lavado (I.N.V. E – 214 – 13); densidad de Bulk (peso unitario) y porcentaje de vacío de los agregados

compactados (I.N.V. E – 217 – 13); humedad natural (I.N.V. E – 122 – 13); gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos finos y llenante mineral (I.N.V. E – 128 – 13).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Caracterización ambiental de las escorias

En la tabla 2 se presenta el promedio de los resultados obtenidos del test de lixiviación TCLP y corrosividad para E1 y E2. Los metales lixiviables evaluados se encuentran por debajo del nivel máximo permisible establecidos en el Decreto 4741 de 2005. Ettler et al. [22], evaluaron la capacidad de lixiviación a largo plazo de una escoria secundaria de plomo; encontraron que la escoria lixiviaba cantidades pequeñas de metales como Pb, Zn, Cu, As y Sb, y concluyeron que este residuo presenta un gran potencial para ser aprovechado en la ingeniería civil. Gomes et al. [8] evaluaron la capacidad de lixiviación de tres muestras de escoria procedentes de una planta de reciclaje de baterías plomo-ácido; la cantidad de plomo lixiviado por cada una de las muestras se encontró por debajo de 1mg/L, valor admisible según la norma de residuos peligrosos brasileña, lugar donde se llevó a cabo el estudio.

TABLA 2. TEST DE LIXIVIACIÓN TCLP DE LAS ESCORIAS

	Corrosividad (pH)	Plomo (mg/L)	Arsénico (mg/L)	Selenio (mg/L)
TCLP	10,82	3,04	< 0,2	< 0,1
Nivel máximo permisible	> 2 < 12.5	5	5	1

Fuente: elaboración propia.

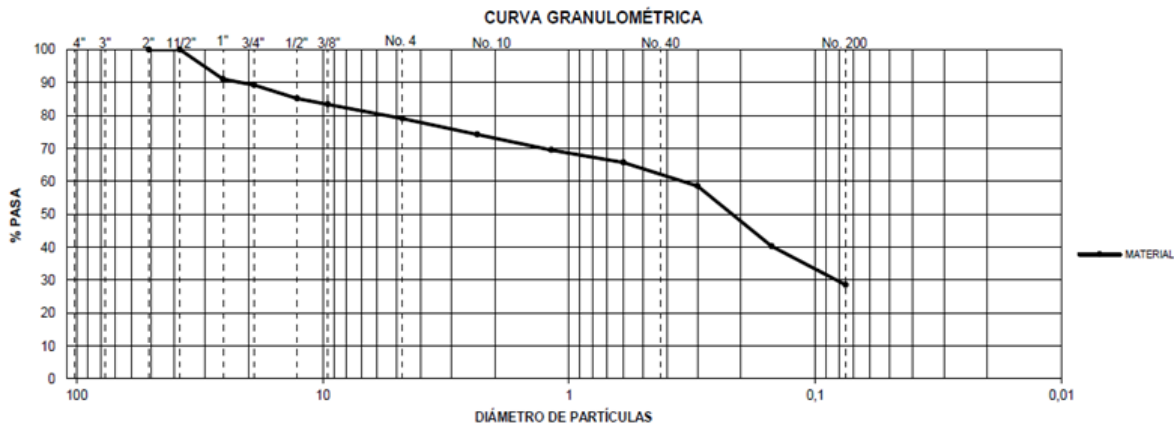
De acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de lixiviación TCLP, la escoria de plomo es un residuo no peligroso, por lo cual lo convierte en un residuo con un gran potencial para ser aprovechado.

Ensayos de calidad de la escoria para mezclas asfálticas.

Análisis granulométrico

De acuerdo con los resultados del análisis granulométrico sin lavado (I.N.V.E -213-13) presentados en la curva granulométrica (figura 3) y a las especificaciones generales presentadas en el capítulo 4 para pavimentos asfálticos de INVIAS [23], el 36 y 64 %

de la muestra es grava y arena, respectivamente, predominando el agregado fino y el llenante mineral. Por otro lado, en el análisis granulométrico con lavado (I.N.V.E -214-13), el porcentaje que pasa el tamiz n.º 200 fue de 86,9 %. Debido al alto porcentaje de partículas que pasa el tamiz n.º 200, la escoria no puede considerarse como un agregado pétreo, sino como un llenante mineral. Uzun et al. [24] realizaron el análisis granulométrico con lavado según la norma ASTM C117-90 para residuos de andesita con el fin de utilizarlo como llenante mineral en mezclas asfálticas y encontraron que el porcentaje que pasa por el tamiz n.º 200 fue de 94.33, valor similar a lo encontrado en este trabajo. Ahmed et al. [25] utilizaron el polvo de cemento residual como relleno mineral, siendo el porcentaje de polvo de cemento residual taje que pasó por el tamiz n.º 200 fue del 85 %.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN TAMAÑO DE PARTÍCULA, SEGÚN ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SIN LAVADO

Gravedad específica, densidad de Bulk y humedad natural

La gravedad específica y la densidad que presenta la escoria es de 4,59 g/cm³ y 1,104 g/cm³, respectivamente; estos valores son superiores a lo reportado por otros autores. Yilmaz et al. [12]; presentaron una gravedad específica y una densidad del agregado fino de la escoria de ferrocromo de 3,15 g/cm³ y 1,88 g/cm³, respectivamente. Para escorias de acero, Oluwasola et al. [26] en su estudio muestran una gravedad específica de agregado fino de 3,051 g/cm³, y Devi et al. [27] muestran una gravedad específica de 3 g/cm³. Agregados con valores bajos de gravedad específica indican que es un material poroso, absorbente y débil, mientras que valores altos indican que el agregado es de buena calidad, los valores de gravedad específica altos son mayores a 3 [28].

La escoria presenta una humedad natural de 8.8 %, valor similar a la humedad óptima de la escoria de horno básico de oxígeno (BOF por sus siglas en inglés) que se encuentra entre el 8 y 12 % [28]

4. CONCLUSIONES

La escoria de fundición de plomo secundario posiblemente puede ser utilizada como llenante mineral en mezclas asfálticas, debido a su composición granulométrica. Por otro lado, la escoria presentó características mineralógicas, químicas y físicas similares a lo reportado por diferentes autores que emplearon diferentes tipos de escorias en mezclas asfálticas y escorias secundarias de plomo en materiales de construcción.

En cuanto a sus características ambientales, la escoria es considerada como un residuo no peligroso, ya que cumple con los niveles máximos permisibles establecidos por la normatividad colombiana de residuos peligrosos para metales lixiviables.

La escoria de fundición de plomo secundario presenta un gran potencial para ser aprovechado, el cual permitirá disponer en rellenos sanitarios una cantidad mínima de este residuo y disminuir la presión en la explotación de áridos naturales.

Es necesario realizar otros ensayos de calidad a la escoria, con el fin de que sea utilizada como llenante mineral en mezclas asfálticas.

REFERENCIAS

- [1] J. Martínez et al., “Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos – Fundamentos”, 2005. Disponible en: http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion_ro1_fundamentos.pdf.
- [2] Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Asociación Internacional de Residuos Sólidos, “Global Waste Management Outlook”, 2015. Disponible en: <http://www.greenreport.it/wp-content/uploads/2015/09/Global-Waste-Management-Outlook-2015.pdf>
- [3] M. La Grega, P. Buckingham y J. Evans, *Gestión de Residuos Tóxicos*, Madrid: McGraw-Hill, 1996.
- [4] X. Elias, *Reciclaje de Residuos Industriales: Residuos Sólidos Urbanos y Fangos de Depuradora*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2009.
- [5] M. De Andrade, W. Costa y A. Andrade, “Caracterização e estudo da lixiviação de metais de escórias provenientes da reciclagem de baterias de chumbo-ácido”, *HOLOS*, vol. 5, pp. 361-371, 2014. doi: <https://doi.org/10.15628/holos.2014.2042>

- [6] W. Zhang et al., “A critical review on secondary lead recycling technology and its prospect”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 108-122, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.046>
- [7] A. Smaniotto et al., “Qualitative lead extraction from recycled lead–acid batteries slag”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 172, n.º 2-3, pp. 1677-1680, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.026>
- [8] G.M. Gomes, T. F. Mendes & K. Wada, “Reduction in toxicity and generation of slag in secondary lead process”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, n.º 9-10, pp. 1096-1103, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.01.006>
- [9] M. Penpolcharoen, “Utilization of secondary lead slag as construction material”, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1050-1055, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.001>
- [10] M. Knežević et al., “Possibility of secondary lead slag stabilization in concrete with presence of selected additives”, *Metalurgija*, vol. 16, n.º 3, pp. 195-204, 2010.
- [11] R. Cioffi, M. Lavorgna & L. Santoro, “Reuse of secondary lead smelter slag in the manufacture of concrete blocks”, *Waste Management Series*, vol. 1, pp. 741-749, 2000. doi: [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(00\)80084-7](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(00)80084-7)
- [12] A. Yılmaz & M. Karaşahin, “Mechanical properties of ferrochromium slag in granular layers of flexible pavements”, *Materials and Structures*, vol. 43, no. 3, pp. 309-317, 2009. doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9490-2>
- [13] B. Lind, A. Fällman & L. Larsson, “Environmental impact of ferrochrome slag in road construction”, *Waste Management*, vol. 21, n.º 3, pp. 255-264, 2001. doi: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00098-2](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00098-2)
- [14] V. Ferreira et al., “Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 130, pp. 175-186, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.094>
- [15] Z. Chen et al., “Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture”, *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 911-918, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.070>
- [16] A. Behnood & M. Ameri, “Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag”, *Scientia Iranica*, vol. 19, n.º 5, pp. 1214-1219, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.007>
- [17] A.C. Raposeiras et al., “Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement”, *Construction and Building Materials*, vol. 119, pp. 268-276, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.081>

- [18] H. Hassan & K. Al-Jabri, "Laboratory Evaluation of Hot-Mix Asphalt Concrete Containing Copper Slag Aggregate", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, n.º 6, pp. 879-885, 2011. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000246)
- [19] B. Mithun y M. Narasimhan, "Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate", *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 837-844, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.026>
- [20] G. De Angelis et al., "Reuse of residues arising from lead batteries recycle: a feasibility study", *Waste Management*, vol. 22, n.º 8, pp. 925-930, 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00082-X)
- [21] E. Kim et al., "Selective leaching of Pb, Cu, Ni and Zn from secondary lead smelting residues", *Hydrometallurgy*, vol. 169, pp. 372-381, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.027>
- [22] V. Ettlér & Z. Johan, "12 years of leaching of contaminants from Pb smelter slags: Geochemical/mineralogical controls and slag recycling potential", *Applied Geochemistry*, vol. 40, pp. 97-103, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.11.001>
- [23] Instituto Nacional de Vías (INVIAS), "Especificaciones generales de construcción de carreteras". Bogotá, D.C., Colombia, 2013.
- [24] I. Uzun & S. Terzi, "Evaluation of andesite waste as mineral filler in asphaltic concrete mixture", *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 284-288, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.093>
- [25] H. Ahmed, A. Othman & A. Mahmoud, "Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt", *Ass. Univ. Bull. Environ. Res*, vol. 9, n.º 1, pp. 51- 59, 2006.
- [26] E. A. Oluwasola, M. R. Hainin & M. M. Aziz, "Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction", *Transportation Geotechnics*, vol. 2, pp. 47-55, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
- [27] V. S. Devi & B.K. Gnanavel, "Properties of concrete manufactured using steel slag, Procedia Engineering", *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 95-104, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.229>
- [28] C. Kambole et al., "Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilization in southern Africa", *Construction and Building Materials*, vol. 148, pp. 618-631, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>