

## USO Y RECICLAJE DE ESCORIA DE ALTO HORNO EN BASES PARA PAVIMENTOS

M.I. Daphne Espejel García, Dr. Alejandro Villalobos Aragón,  
Dra. Vanessa Verónica Espejel García, Dr. Gilberto Wenglas Lara

### Resumen

La escoria de alto horno (EAH), considerada como material reciclado, es abundante en localidades donde existieron fundidoras de metales y se puede utilizar como agregado en material de base para pavimentos. Típicamente EAH contiene altas concentraciones de metales potencialmente tóxicos. Aunque EAH cristaliza vidrio, minerales silicatados y óxidos, la caracterización del comportamiento de elementos tóxicos durante su lixiviación es esencial para determinar su impacto ambiental. En la comparación de propiedades físicas de EAH con las de agregados naturales, se observa que la escoria presenta valores mayores hasta un 25%, mostrando mayor resistencia a los esfuerzos que será expuesta. Sin embargo, EAH tiene una limitante en el terreno ambiental: la lixiviación y propagación de altas concentraciones de metales pesados. Para la realización de pruebas de lixiviación, se utilizó la prueba de tanque, simulando condiciones reales. La escoria se combinó con material de base natural, en proporciones de 30% y 50%. La proporción 50-50 contribuye mayores concentraciones de As, Pb y Zn, lo que conlleva un riesgo de contaminación de suelos y acuíferos. Sin embargo, se observó que en una proporción de hasta 30% de escoria, las concentraciones son menores y no presentan un riesgo al medio ambiente.

### Palabras clave

Escoria, lixiviación, reciclado, bases, pavimentos.

### 1.Introducción

En la actualidad, las estrategias para construcciones sostenibles deben tomar en cuenta la protección del medio ambiente, minimizando el consumo de los recursos naturales. El uso de materiales de desecho o reciclados, sustituyendo a los materiales naturales, ayuda en la reducción de la extracción, pero su uso indiscriminado sin la debida caracterización química pudiese causar un problema ambiental de mayor magnitud.

Surge la necesidad de estudiar diferentes materiales de desecho, con el fin de eliminar riesgos de contaminación y salud. Tal es el caso de la escoria de alto horno (EAH), que es abundante en localidades donde existen o existieron fundidoras de metales. La escoria se considera un producto no metálico, la cual consiste



principalmente en silicatos y aluminosilicatos de Ca, ya que se desarrolló en condiciones líquidas junto con el hierro en el alto horno [1].

La caracterización de la escoria incluye la descripción de sus propiedades físicas y mecánicas, así como un análisis de lixiviación, donde EAH también esté en combinación con material de base natural. Dichos análisis permiten determinar el comportamiento que adquirirá la escoria durante su vida útil en una base para pavimento. Actualmente, uno de los usos de la escoria es como material pétreo en obras de vías terrestres.

El objetivo del proyecto se encauza en la determinación de las propiedades físicas de EAH, así como el grado de lixiviación de metales potencialmente tóxicos (Pb, Zn, As), con diferentes proporciones de escoria-base. Las pruebas de lixiviación pretendieron simular condiciones reales tales como: lluvia ácida, derrames de combustible, escurrimientos sobre las carreteras, entre otras, cambiando el valor del pH del agua.

Asimismo, se presentan los beneficios que tiene el uso de un material reciclado sobre un material natural, o en combinación entre ambos.

## 2. Materiales y métodos

El interés del uso de materiales de desperdicio o agregados secundarios en la construcción de caminos se ha incrementado, por lo tanto, se ha llegado a la necesidad de mejorar el conocimiento del comportamiento a largo plazo y la compatibilidad que dichos materiales tienen con el ambiente [2].

### 2.1 Materiales de desecho

Los agregados secundarios se conocen como productos residuales de procesos industriales u otras actividades humanas [3]. Entre los materiales de desecho se pueden incluir: escorias de fundición, vidrio de desecho, llantas, plásticos, escombros, ceniza pulverizada de combustible, entre otros. Este estudio solo se enfocó a la caracterización fisicoquímica de las escorias de alto horno (EAH).

#### 2.1.1 Escoria

La escoria es un material residual que se genera en la producción de acero, la cual resulta por altos hornos o en hornos eléctricos. Dicho material se compone generalmente de calcio (Ca), hierro (Fe), aluminio (Al) y silicato de magnesio. La función principal que corresponde a las escorias es atrapar impurezas y separarlas del metal [4].

La explotación de los minerales metálicos conduce a la formación de cantidades abundantes de desperdicios, que incluyen: fragmentos de roca, cenizas y escorias. Estos desperdicios contienen cantidades significativas de metales potencialmente tóxicos como níquel (Ni), cromo (Cr), plomo (Pb), cobre (Cu) y zinc (Zn). Los metales que se encuentran presentes en escorias están generalmente asociados a las fases que se producen cuando son solubles en agua (silicatos y óxidos), pero estudios



recientes demostraron que los elementos lixiviados de las escorias tienen un efecto negativo en el ambiente tanto en suelo como en agua [5].

La escoria es atractiva como material de construcción debido a sus excelentes propiedades técnicas (Tabla 1). Sin embargo, en el terreno ambiental se ha propagado la preocupación acerca del contenido y lixiviación de metales pesados, especialmente aquellos que son nocivos para la salud [6].

Tabla 1. Propiedades técnicas de las escorias de alto horno comparadas con agregados naturales [7].

Propiedades	Escoria	Granito	Grava (pedernal)
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	>3.2	2.5	2.6
Forma- piezas delgadas y alargadas (%)	<10	<10	<10
Valor de impacto (%/wt.)	18-22	12	21
Valor de trituración (%/wt.)	14	17	21
Absorción de agua (%/wt.)	<1.0	<0.5	<0.5
Resistencia a las heladas (%/wt.)	<0.5	<0.5	<1.0
Aglutinante a la adhesión (%)	>90	>90	>85

Según la ASTM C125 (1998), escoria se define como “producto no metálico que consiste esencialmente en silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, desarrollado en condiciones líquidas junto con el hierro en altos hornos” [8]. La composición química de las escorias de altos hornos se expresa en un 95% en óxidos de silicio (Si), aluminio (Al), calcio (Ca) y magnesio (Mg), mientras que el 5% restante lo comprenden elementos como el Fe, Pb, Zn, entre otros [4]. Estudios físicos realizados con anterioridad a escorias enfriadas al aire presentan densidades que varían de 2000 a 2500 kg/m<sup>3</sup> [7]. Para este estudio, el material de escoria fue sometido a pruebas físicas de peso volumétrico, densidad relativa, absorción y de abrasión.

## 2.2 Pruebas de lixiviación

La lixiviación se define como un proceso químico de remoción o extracción de compuestos solubles de desechos sólidos que están expuestos al intemperismo [9]. Las pruebas de lixiviación en equilibrio se realizan en materiales triturados, con el fin de medir la liberación de contaminantes en ciertas condiciones químicas, así como evaluar el efecto de pH [2].

La liberación de contaminantes de materiales residuales está influenciada por parámetros físicos (tamaño de partícula, temperatura, contacto con el agua, porosidad), y químicos (pH, redox, sorción, reacciones cinemáticas, entre otros) [10]. Las pruebas de lixiviación se clasifican en [6]:



- Las que buscan condiciones de equilibrio al final de la lixiviación, refiriendo a las pruebas realizadas por lotes de material.
- Las que se enfocan en los aspectos dinámicos donde el tiempo es una variable importante.

La liberación de contaminantes de materiales de desecho se puede evaluar mediante pruebas de tanque ("Tank test"), donde el material se encuentra saturado durante diferentes periodos de tiempo [2]. Las pruebas de tanque están regidas por la norma EA NEN 7375 2004 (normativa de los Países Bajos), donde se expone el propósito de simular la lixiviación de componentes inorgánicos de materiales moldeados y monolíticos, bajo condiciones aeróbicas en función de un periodo de tiempo de hasta 64 días [11]. La prueba determina la naturaleza y propiedades del material mediante la saturación completa de la muestra, así como la reposición del líquido en un tiempo especificado. Las pruebas determinan la liberación de los componentes a través del tiempo, incluyendo el alcance de la superficie y el coeficiente de difusión efectiva que se puede utilizar para estimar la lixiviación durante periodos más largos [11].

Para la realización de la prueba "Tank Test", se usaron cilindros de PVC, los cuales se distribuyeron de dos maneras: 1) combinación de 70% de material base natural aprobado por la normativa SCT (N-CMT-4-02-002/04), con 30% de material grueso de escoria de alto horno que se retiene hasta la malla no. 4 con abertura de 4.75 mm; 2) el mismo material en proporción 50-50%. Las dimensiones del cilindro son de 10.16 cm de diámetro y 30 cm de altura, utilizando su respectivo cople y tapa de PVC.

Una vez los tanques llenos de material combinado, se saturaron con agua a dos diferentes valores de pH. Se seleccionó valor de pH 5 que representa lluvia ácida y arrastre de combustible, y valor de pH 8 que simula situaciones alcalinas.

Las muestras de agua de los cilindros fueron tomadas a diferentes tiempos, para observar el comportamiento del material en presencia del agua y medir su lixiviación. Los tiempos fueron: 6 horas, 24 horas, 7 días y 15 días. Se utilizaron un total de 8 cilindros que representaban cada combinación de material, a cada valor de pH a cada periodo de tiempo. Posteriormente, las muestras de agua fueron analizadas bajo los estándares normativos de un laboratorio.

### 3. Resultados

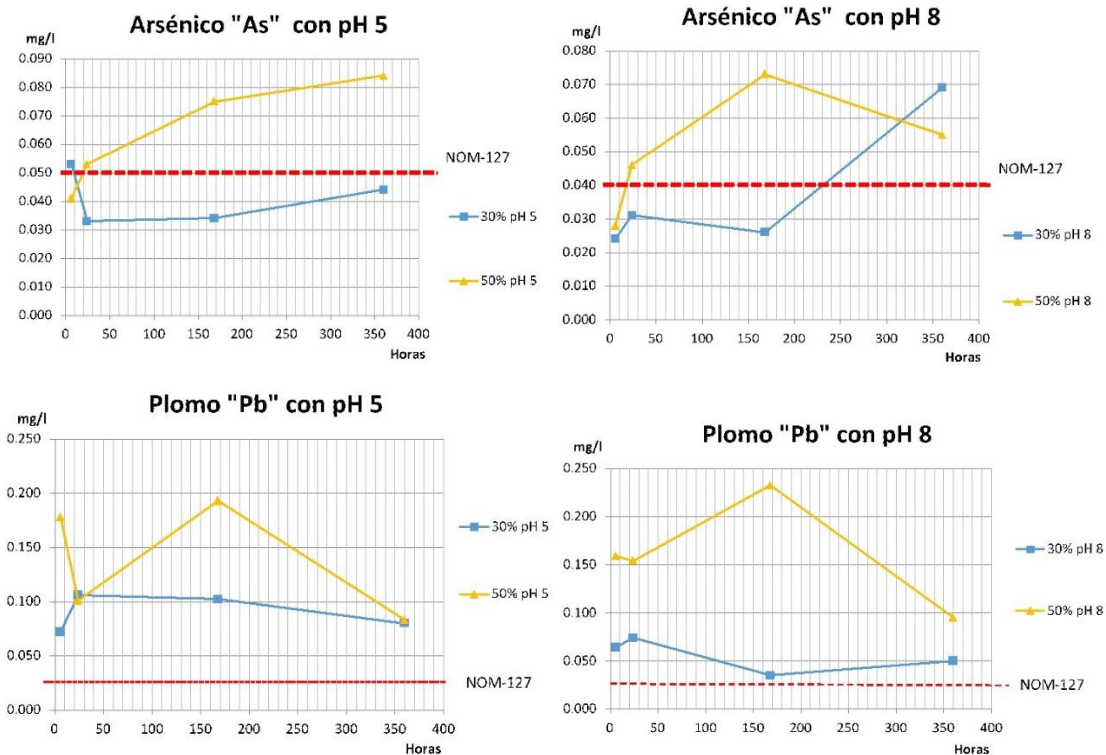
La comparación de los resultados obtenidos de propiedades físicas en el material de base natural y la escoria se presentan en la Tabla 2. El peso volumétrico seco varillado, es el promedio del peso volumétrico seco suelto y el peso volumétrico máximo. Para la escoria, el resultado es de 2091.30 kg/m<sup>3</sup>, observándose un valor por encima de la base natural en casi un 25%, lo cual es factible para mayor resistencia a los esfuerzos a los que será expuesto en caso de ser utilizado como material sustituto de base. La densidad relativa de la escoria tiene valores superiores en un 30% al de la base natural. Por ser material grueso, la escoria disminuye en absorción un 50% debido a la carencia de finos. En la prueba de abrasión (desgaste de Los Ángeles), la escoria presenta un valor de 13%.



Tabla 2. Comparación de los valores obtenidos en el material base y valores obtenidos de la escoria.

Característica	Valores de Base	Valores de escoria
Peso Volumétrico seco varillado (kg/m <sup>3</sup> )	1677.50	2091.30
Densidad relativa Dr	2.62	3.46
Absorción Abs (%)	0.71	0.37
Desgaste de Los Ángeles (%)	13.0	13.11

Los análisis del agua lixiviada se realizaron para concentraciones de analitos de interés (Pb, Zn, As), para ambos tipos de experimentos (30% y 50% de escoria). En la Figura 1 se presentan los resultados a diferentes tiempos, comparándolos con los valores máximos permitidos por la norma NOM-127-SSA1-1994 para agua potable. Para As, los experimentos en combinación de 50% muestran mayor lixiviación de los analitos en ambos valores de pH, y se encuentran por encima de la norma. Para Pb, ambas proporciones liberan concentraciones mayores a la establecida por la norma, pero la combinación del 50% es mayor. Para Zn, el comportamiento es similar a los anteriores, con la diferencia de que ambas proporciones están por debajo de los valores máximos de la norma.



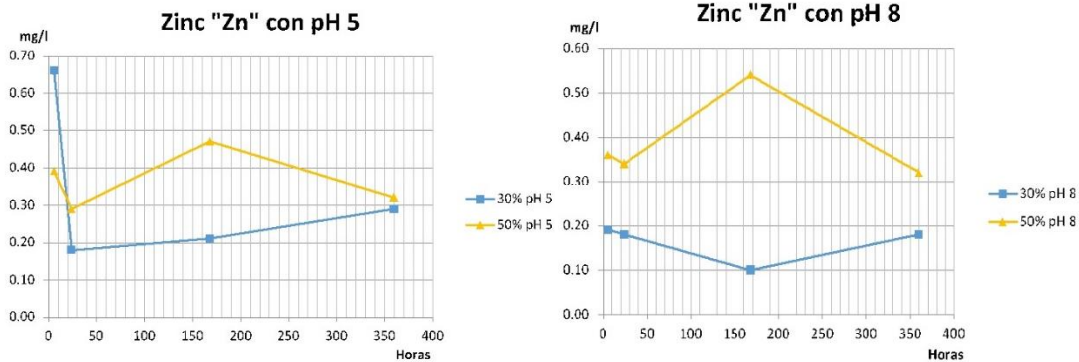


Figura 1. Concentraciones de analitos (As, Pb y Zn) para cada una de las muestras obtenidas de los experimentos de prueba de tanque. Para las gráficas de Zn, la relación con la norma no aparece por quedar fuera del rango de la gráfica (Zn = 5 mg/l).

En la Tabla 3, se muestra la comparación de los resultados con distintas normas seleccionadas para este fin: a) TXDOT DMS 11000 para evaluación y uso de materiales reciclables no peligrosos en Texas, EE. UU., b) NOM-001-ECOL-1996 para límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales y c) NOM-127-SSA1-1994 para calidad de agua potable.

Tabla 3. Normas utilizadas para comparación con los resultados experimentales obtenidos.

Analito	TXDOT	NOM-001-	NOM-127-	Resultados pH 5 al 30%	Resultados pH 8 al 30%
	DMS 11000	ECOL- 1996	SSA1- 1994		
As	0.01	0.40	0.05	0.032-0.052	0.023-0.07
Pb	0.047	10	0.025	0.07-0.11	0.04-0.07
Zn	7.30	20	5	0.19-0.65	0.10-0.20

#### 4. Conclusiones

La escoria de alto horno puede ser utilizada como sustituto del material natural porque, de acuerdo con sus propiedades físicas, aseguran una mayor resistencia a las cargas vehiculares que va a soportar.

Se encontró que el factor principal para la lixiviación de metales pesados no era el pH sino la proporción escoria-base natural, ya que se apreció que la proporción 50-50 contribuía con concentraciones más altas de As, Pb y Zn, que incluso pueden llegar a ser mayores a los regulados en la norma NOM-127-SSA1-1994, lo que conllevaría un riesgo de contaminación de suelos y acuíferos. Sin embargo, se observó que en una proporción de hasta el 30% de escoria, las concentraciones disminuyen y no presentan un riesgo severo al medio ambiente.



## 5. Referencias

- [1] American Society for Testing and Materials (1999). "Standard terminology relating to concrete and concrete materials." West Conshohocken, PA. 4p.
- [2] Barna, R., Moszkowicz, P., and Gervais, C. (2004). "Leaching assessment of road materials containing primary lead and zinc slags." *Waste Management*, 24, 945-955.
- [3] Huang, Y., Bird, R. N., and Heidrich, O. (2007). "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements." *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 58-73.
- [4] Amaral, L. (1999). "Hormigones con escorias de horno electrico como aridos: Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental." Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, España.
- [5] Kierczak, J., and Neel, C. (2005). "Mineralogical and chemical characteristics of slag from former Ni - smelter in Szklary (lower Silesia, SW Poland)." *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne - Prace specjalne mineralogical society of Poland*, Special papers 26(189-192).
- [6] Lind, B. B., Fallman, A.-M., and Larsson, L. B. (2001). "Environmental impact of ferrochrome slag in road construction." *Waste Management*, 21, 255-264.
- [7] Motz, H., and Geiseler, J. (2001). "Products of steel slags an opportunity to save natural resources." *Waste Management*, 21, 285-293.
- [8] Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Larsson, M. L., and Bjorkman, B. (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." *Waste Management*, 27, 1335-1344.
- [9] Jackson, J. A. (1997). "Leaching." Glossary of Geology, J. A. Jackson, ed., American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 362.
- [10] Van der Sloot, H. A. (1996). "Developments in evaluating environmental impact from utilization of bulk inert wastes using laboratory leaching tests and field verification." *Waste Management*, 16, 65-81.
- [11] EA NEN 7375. (2004). "Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials: determination of leaching of inorganic components with the diffusion test "The tank test". N. N. I. Standard, ed.