



<http://siecsa.com/siec-se-convierte-valorizador-escorias-aceria-horno-arco-electrico/>

Estado del Arte sobre las Escorias Negras de Horno de Arco Eléctrico y su Aplicaciones en Pavimentos

Sánchez A. Héctor Mauricio

Estado del Arte sobre las Escorias Negras de Horno de Arco Eléctrico y su Aplicaciones en Pavimentos

SANCHEZ A. Hector Mauricio
Universidad Pedagógica y Tecnológica-Tunja
Hectorsanchezabril@hotmail.com

Resumen: Las escorias negras de horno de arco eléctrico (ENHAE) son desechos de la fabricación del acero, cuya materia prima principal es la chatarra. Dichas escorias en Colombia presentan una alta producción, ya que de cada tonelada producida de acero se generan de 0,1 a 0,3 toneladas de escorias, aproximadamente. Las altas cantidades de ENHAE indican que la producción de estos residuos en el país es importante, por lo cual debe indagarse al respecto para darles un uso técnico y sostenible adecuado, más aún si se tiene en cuenta que la disposición de dichas escorias generan impactos ambientales sobre el suelo y que las necesidades existentes de materiales seleccionados para la construcción de carreteras son altas. Se analizaron más de treinta artículos de investigación y trabajos de tesis de pregrado, maestría y doctorado, en el marco de una investigación que se viene adelantando para optimizar el uso de escorias negras colombianas en pavimentos. Como producto de ello se presenta el estado del arte del estudio de las ENHAE, con fines de uso en la construcción y especialmente en los pavimentos viales.

Palabras clave: escorias negras, pavimentos, estado del arte, reutilización.

Abstract: Electric arc furnace black slag (ENHAE) waste from the manufacture of steel whose main raw material is scrap. These slags have a high production in Colombia, since it is said that for each ton of steel 0.1 to 0.3 ton of slag are generated. The amounts shown above indicate that the production of slag in the country is important, which has been investigating the matter to give adequate technical and sustainable use, given that the provision of such slags generate environmental impacts on soil and selected existing requirements for road building materials are high. Over thirty research articles and theses of undergraduate, master's and doctoral degrees were analyzed in the framework of an investigation that is underway to optimize the use of Colombian black slag in paving and as a result of this state of the art is presented study of black slag of the electric arc furnace for the purpose of use in the construction and especially in road pavements.

Keywords: black slag, pavements, state of the art, reuse.

1. Introducción

El uso de materiales reciclados y subproductos de minería y siderurgia en el mundo ya es un hábito, y en el caso específico de las escorias se plantean tres alternativas viables para su uso: a) la introducción en la industria cementera (uso para el aporte de hierro en la fabricación del clínker), el uso en capas de rodadura (en este aprovechamiento, la escoria forma parte del ligamiento bituminoso de las capas asfálticas de las carreteras) y c) la utilización como terraplenes, bases y subbases de carreteras (este uso corresponde al relleno de terrenos y restauración de espacios degradados).

Europa ha sido testigo de grandes estudios realizados para evaluar el comportamiento de este material de desperdicio siderúrgico; España es uno de los países con mayor número de investigaciones.

2. Relación del Estado del Arte Revisado

En el ámbito internacional:

Amaral (1999) realizó un estudio del comportamiento del material de acería utilizado en concretos hidráulicos, como resultado de su tesis doctoral *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. Se llevaron a cabo ensayos de caracterización de los materiales, estabilidad volumétrica y determinación de la reactividad hidráulica, para lo cual se utilizó la escoria como adición de morteros, resistencia mecánica en pastas de escoria, en morteros con escoria como ligante y morteros con escoria como árido finos.

Los laboratorios de la Universidad Politécnica de Cataluña fueron el centro de investigación de Vázquez y Barra (2011), en su estudio *Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción*. La escoria de acero de horno de arco eléctrico tiene propiedades técnicas adecuadas para su uso como agregados. Por ello se ha venido estudiando su comportamiento y sus reacciones con el agua y con el intemperismo a la hora de usarla con material de construcción. Básicamente, en este estudio se analizó la composición química y su posible expansión al contacto con el agua y las

consecuencias que generarían sus posibles aplicaciones en la ingeniería.

Se encontró que el contenido de óxido de magnesio (MgO) es el principal responsable de las expansiones que afectan un material de diferente manera, dependiendo de la rigidez de las matrices formadas. Estas muestran una hidraulicidad que se traduce en la formación de silicato de calcio hidratado y materia amorfa, la cual actúa como aglomerante.

Frias, Sánchez y Uría (2001) estudiaron químicamente dos escorias negras de horno de arco eléctrico de distintas plantas de acería, y a partir de su análisis determinaron los principales compuestos que causan posibles efectos expansivos, como cal libre, magnesia libre, cloruros y sulfatos. De los análisis químicos realizados, se puede señalar que las concentraciones de los compuestos perjudiciales, presentes en los dos tipos de escorias negras estudiadas, son muy bajas; por ello no generan problema alguno de inestabilidad en presencia de agua cuando se utilicen como agregado en la construcción.

En España se hizo una valoración de las propiedades fisicoquímicas de la escoria de acería para su posible uso en caminos forestales. Esencialmente se evaluaron aspectos ambientales, económicos, sociales y técnicos, sobre los que se dieron algunos conceptos respecto a su uso. En cuanto a su parte técnica, hay dos tipos de escoria de acería: escoria negra y escoria blanca. Ambos presentan distinta composición, pero se comportan muy bien cuando son mezcladas. La escoria negra es un material de gran dureza, con algunos contenidos de metales pesados, a diferencia de la escoria blanca, que es un material más bien blando y posee una alta basicidad debido al porcentaje de cal libre. En la evaluación realizada se concluyó que la escoria de acería es un material apto para el uso en caminos forestales y cumple con todo lo estipulado por la normativa local en cuestión técnica, ambiental y socioeconómica.

La escoria de acero de arco eléctrico, al tener contenidos de MgO más o menos del 5%, y después de ser sometida al ensayo *steam test* (ensayo de vapor que mide la estabilidad volumétrica), muestra una capacidad para usos como material en capas de afirmado de carreteras y para capas de rodadura bituminosa.

Ortega (1999) afirma que es posible usar los subproductos de la industria del acero para obras de ingeniería. El estudio de la tesis doctoral de esta investigadora trata principalmente dos tipos de escoria: negra y blanca. Afirma que la escoria blanca se puede utilizar para cementos tipo *portland* y morteros, mientras que la escoria negra, debido a su elevada dureza y a su granulometría, es de correcto uso en bases y subbases para pavimentos. Concluye que la reutilización de las escorias reduce la explotación de los recursos naturales y ayuda al medioambiente. Además, lo anterior da pie al estudio de las escorias negras para ser usadas en mezclas asfálticas.

Otegi (2012) realizó una investigación en la que se menciona que en España, de acuerdo con la normativa vigente respecto a la valorización de escoria siderúrgica (Decreto 32/2009), y desde el punto de vista ambiental, la posibilidad de valorización de la escoria de acería (blanca y negra) para ser utilizada como único componente en capas granulares no ligadas queda penalizada por la cantidad de liberación de zinc en la escoria negra y de bario en la escoria blanca. Al comparar las concentraciones de estos elementos obtenidas en las primeras fracciones del ensayo de percolación, de acuerdo con la legislación reguladora de vertidos (Decisión 2003/33/CE, la escoria negra se puede considerar *material inerte*.

En la Universidad de Brescia, Italia, Sorlini *et al.* (2010) presentaron los resultados de su estudio, "Reutilización de escorias de acero en mezclas bituminosas para pavimento", en el que se evaluaron las propiedades mecánicas y el ajuste ambiental de escorias de horno de arco eléctrico en mezclas asfálticas. Se efectuaron varias pruebas en muestras de escoria negra para caracterizar las propiedades físicas, geométricas, mecánicas y químicas, como es requerido por las especificaciones de la norma Italiana UNI EN. Se centraron además en la expansión volumétrica asociada con la hidratación de CaO libre y MgO.

Se realizaron cinco mezclas bituminosas con contenidos de hasta 40% de escoria de horno de arco eléctrico, y se ensayaron para determinar la estabilidad Marshall y la resistencia a la tracción indirecta. Además se evaluó el comportamiento de lixiviación de las muestras de escoria y las mezclas bituminosas, según el ensayo de lixiviación UNI EN.

La escoria probada mostró propiedades físicas y mecánicas satisfactorias, así como una liberación de contaminantes, en general, por debajo de los límites establecidos por el código italiano. Las concentraciones de cal libre y de óxido de magnesio, responsables de los fenómenos expansivos, fueron 16-22% y 2-3%, respectivamente.

Se fabricaron pastas de escoria, pastas de cemento y pastas con 50% de escoria y 50% de cemento. Los resultados obtenidos fueron poco favorables para las que tenían contenidos del desperdicio siderúrgico. En cuanto a los morteros, la escoria fue utilizada como ligante, tras lo cual se obtuvieron resistencias relativamente bajas. Además se estudió el comportamiento de la escoria, como árido fino para morteros: presentó una resistencia a la compresión a los 28 días de 65,5 MPa, contra una resistencia de 43,0 MPa obtenida para la mezcla patrón. La resistencia a la flexotracción también presentó un aumento de la mezcla tradicional con respecto a la mezcla con adición de escoria: mostró valores de 8,1 MPa y 10,8 MPa, respectivamente. Por último, se prepararon mezclas de hormigón con adición de escoria como árido grueso y otras con adición de escoria como árida fina, con lo cual se presentó un aumento en la resistencia con valores aproximados de 10% y 11%, respectivamente, con respecto al hormigón de referencia.

Otra investigación con muy buenos aportes al conocimiento del material es la de Pasetto y Baldo (2010a), que presentan los resultados de un estudio de laboratorio, para comprobar la posibilidad de utilizar dos tipologías particulares de escoria de horno de arco eléctrico, en sustitución de los áridos naturales.

El estudio se realizó en tres fases principales. Como primera medida se hizo una caracterización química, toxicológica y físico-mecánica de las escorias de acero y los agregados naturales. Luego se realizó el diseño de cuatro tipos de mezcla y se variaron progresivamente los contenidos de agregado natural y de escoria; la primera de ellas contenía en su totalidad agregados de origen natural; a la segunda, tercera y cuarta mezclas se les adicionó escoria negra de horno de arco eléctrico, en cantidades de 30%, 60% y 90%, respectivamente. Se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la acumulación de deformaciones permanentes, módulo de rigidez, resistencia a la fatiga y daños por humedad. El

contenido óptimo de asfalto de las mezclas resultó ser ligeramente superior para los asfaltos con escorias, probablemente debido a la mayor porosidad del agregado reciclado en comparación con el agregado de origen natural.

Dado el elevado peso específico de las escorias de horno eléctrico de arco, la densidad aparente de las mezclas se eleva con el aumento de esta; además, la densidad es más alta para la mezcla con el 90% de escoria. Estas, a su vez, presentan mejores resultados que el asfalto con solo áridos naturales, con un incremento neto del cociente Marshall de 36%, 65% y 98%, para las mezclas 1, 2 y 3, respectivamente.

Las escorias estudiadas han mostrado características físico-mecánicas sustancialmente equivalentes a las presentadas por los agregados de piedra naturales. Los resultados son muy satisfactorios para todos los diseños de mezcla con la escoria, con buenos valores de estabilidad y cociente Marshall. La deformación axial realizada conduce a la conclusión de que las mezclas con escoria tienen poca probabilidad de desarrollar excesivas deformaciones permanentes.

En el artículo de investigación “Caracterización del comportamiento ante fatiga de mezclas bituminosas con asfalto reciclado y escoria de acero” se analizan los resultados de una evaluación de laboratorio y un estudio teórico sobre el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas con pavimento asfáltico reciclado y escoria de horno de arco eléctrico, usadas en diferentes proporciones. Se realizó una mezcla patrón y cinco mezclas con diferentes porcentajes de asfalto reciclado y escoria negra de horno de arco eléctrico, en remplazo del agregado tradicional.

Durante la investigación experimental se realizó la prueba de flexión de cuatro puntos, para caracterizar el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas; las probetas prismáticas, con dimensiones de 400 mm × 50 mm × 60 mm, producidas por un rodillo de compactación, se someten periódicamente a flexión, con un movimiento de carga sinusoidal y sin periodos de descanso. Se determinó además, para cada prueba de flexión, el ángulo de fase y la energía disipada. La resistencia a la fatiga ha sido evaluada por tres enfoques diferentes, basados en la reducción del 50% del módulo de rigidez inicial, la energía disipada y la acumulación de daño.

Con respecto a la mezcla de referencia, los cinco asfaltos con materiales marginales demostraron mayor resistencia a la fatiga. En particular, el uso de agregado con 30% de escoria y 20% de asfalto reciclado aumentó claramente dicha resistencia. Otra investigación llevada a cabo por Pasetto y Baldo (2010b), en torno a la evaluación experimental del comportamiento de las capas de base de alto rendimiento y de bases de carreteras con escorias de acero de horno de arco eléctrico, estuvo basada en cuatro diseños de mezcla para asfaltos, de los cuales dos se usaron como referencia, con 100% agregados de origen natural y dos con escoria como reemplazo del agregado tradicional. Para estas últimas se utilizaron dos tipos diferentes de escoria: tipo P y tipo B, con porcentajes de participación para cada dosificación de 32% y 19%, respectivamente, para un total de 51% del peso total de reemplazo de escoria negra por agregado tradicional.

El porcentaje en peso de asfalto para cada una de las dosificaciones se varió desde 4% hasta un máximo de 6%, con intervalos de 0,5%, cada una de estas con un total de cuatro briquetas. Las dos mezclas con escoria de acero obtuvieron mejores resultados en el ensayo Marshall que las que tenían 100% de agregado tradicional. Los contenidos de cemento asfáltico estuvieron en un intervalo de 4,46% y 4,68%. Se realizaron además pruebas para conocer la resistencia a daños por humedad y deformaciones permanentes con resultados satisfactorios para las briquetas con contenido de escoria.

Otra investigación interesante, titulada “uso de escoria de arco eléctrico en superficies antideslizantes”, es el resultado de una cooperación entre la compañía de carreteras Egnatia Odos S.A. y la principal productora de agregados de escoria de horno de arco eléctrico, Aeiforos S.A. La investigación se llevó a cabo durante y después de la construcción de la autopista Egnatia Odos, de Grecia. Se estudió un tramo total de 15 km de carretera, de los cuales los primeros 12 km fueron construidos con escoria de horno de arco eléctrico como agregado, en agosto de 2008, mientras que los últimos 3 km fueron construidos con agregado natural entre mayo y junio de 2007. Se realizaron algunos ensayos de laboratorio, entre los que se encuentran la caracterización de los materiales, el diseño de mezcla y el ensayo de resistencia Marshall. Durante el segundo periodo, comprendido entre

enero y febrero del 2011, se realizaron múltiples medidas de campo para identificar el desgaste producido por los factores ambientales y el tráfico de las superficies construidas anteriormente. Ambos tramos poseen las mismas condiciones de tráfico y de clima, lo que permite la comparación.

Luego de un mes bajo condiciones normales de tráfico, se encontró que la superficie que fue pavimentada con agregado de escoria continuaba recubierta con su capa de pavimento, mientras que en el tramo pavimentado con agregados naturales, la superficie había quedado totalmente expuesta. Se concluyó así que el material de revestimiento cumple con todas las propiedades requeridas; además, la permeabilidad de la superficie con escoria negra de horno de arco eléctrico fue significativamente más alta, comparada con la que tenía agregados de origen natural.

Turquía se une a la larga lista de países que se han interesado por conocer el comportamiento de los materiales de desecho en construcción; por ejemplo, los ingenieros Ahmedzade y Sengoz (2008), en su investigación "Evaluación de la escoria de acero como agregado grueso en mezclas densas en caliente", prepararon cuatro tipos de mezclas incorporando escoria en diferentes cantidades. En las dos primeras se utilizó un tipo de cemento asfáltico denominado AC-10, con una gravedad específica de 1,036 g/cm³ a 25 °C; una de ellas con agregados 100% de origen natural y la otra con agregado fino y llenante mineral de origen natural y escoria en remplazo del agregado grueso. Para las dos últimas se utilizó la misma combinación de materiales, pero con un cemento asfáltico de diferentes características, denominado AC-5, con una gravedad específica de 1,035 g/cm³ a 25°C. Para hallar el contenido óptimo de asfalto, se varió su porcentaje en peso desde 4% hasta un máximo de 6%, con aumentos de 0,5%, compactando tres especímenes para cada uno de ellos.

El contenido óptimo para las mezclas con agregado natural y para las dos mezclas con asfalto fue de 5,0%, 4,85%, 5,8%, y 5,2%. Las mezclas patrón tuvieron una estabilidad Marshall de 17,46 KN y de 16,50 KN, con flujos de 2,97 y 2,86 mm, mientras que las mezclas con contenido de escoria negra obtuvieron valores de estabilidad de 20,19 KN y 19,54 KN, con flujos de 2,32 mm y 2,29mm. Así, el coeficiente Marshall para las dos briquetas con

escoria fue considerablemente más alto que el de las mezclas patrón. Se realizaron también algunas pruebas químicas y de conductividad eléctrica, con muy buenos resultados para las mezclas con contenidos de escoria.

Airey, Collop y Thom (2004), estudiantes de la Universidad de Nottingham, en Reino Unido, estudiaron el uso de la escoria de horno básico de oxígeno, la escoria de alto horno y el desperdicio de vidrio como remplazo de agregados tradicionales de origen natural. Se realizaron seis mezclas diferentes, de las cuales dos fueron con agregados tradicionales, dos con desperdicio de vidrio y dos más con escoria. De estas últimas, la primera tenía un 54% de escoria de horno básico de oxígeno como agregado grueso, 43% de escoria de alto horno como agregado fino y 3% de llenante mineral tradicional; la segunda estaba compuesta por 71% de escoria de horno básico de oxígeno, 21% de escoria de alto horno y 8% de llenante mineral tradicional.

Se observó un aumento de la densidad, la deformación permanente y el módulo de rigidez para las mezclas con escoria, en comparación con las mezclas patrón. El aumento de la rigidez se debe, en parte, a las propiedades superficiales químicas y físicas del agregado de escoria. El efecto del uso de escoria como agregado se tradujo en un aumento de más del 20% en la rigidez, en comparación con las mezclas de control.

Para esta investigación se quiso utilizar la escoria negra de horno de arco eléctrico como agregado en mezclas asfálticas, con la necesidad de mejorar la calidad de pavimento y reducir la explotación de los recursos naturales. Hacia el sur de Alemania, en la planta de Hamburger Stahlwerke se producía la escoria negra a la que se le realizaron estudios para determinar si era adecuada en el uso de las mezclas asfálticas. De acuerdo con los ensayos realizados, se obtuvo que la escoria en las mezclas asfálticas mejoraba notoriamente las propiedades mecánicas (estabilidad, resistencia a la deformación, resistencia al deslizamiento y afinidad con el bitumen) y el coeficiente de pulido. Por lo anterior, en Alemania, en la región del Ruhr, ya se implementa la escoria negra de acería para las mezclas asfálticas. De hecho, se han producido alrededor de 5.000.000 de toneladas de asfalto con escoria negra como agregado.

En China, debido a su gran capacidad industrial, se generan impactos negativos al medioambiente; la producción de acero fue una de las actividades más contaminantes, ya que de este metal se forma la escoria de acería, que es vertida a sitios de acopio, con lo cual se alteran las características fisicoquímicas de la atmósfera o de las aguas superficiales. Por lo anterior, surge la necesidad de la reutilización de este subproducto (escoria de acería) industrial.

En el artículo “Utilización de escoria de acero en forma de agregados de piedra, en mezclas asfálticas”, se valora la viabilidad de la utilización de la escoria de acería como agregado fino y grueso en las mezclas asfálticas. Se le realizaron pruebas como difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y porosimetría de intrusión de mercurio. Se compararon las propiedades de la escoria con el basalto, utilizándolos como agregados; se determinó así que la escoria cumple con la normativa estipulada y que los resultados de expansión no superan el 1% después de los siete días de inmersión. Además posee más resistencia al agrietamiento y a las altas temperaturas que el basalto, y se han mejorado sus propiedades mediante el uso de escoria de acero como agregado en la vida útil del pavimento. También es importante mencionar que, según los análisis, este material presentó un excelente coeficiente de pulido.

En este estudio se evaluó el efecto que produce la escoria de acería en las propiedades mecánicas de los pavimentos. Se realizaron mezclas con caliza triturada, que es utilizada tradicionalmente para base y subbase en los pavimentos en Egipto. Igualmente se realizaron algunas pruebas de laboratorio, en las que se observó el comportamiento de la escoria ante deformaciones verticales, tensiones radiales y tensiones verticales, en las que el pavimento se somete a cargas críticas que reducen su vida útil. Con lo anterior se concluyó que al adicionarle escoria al material de base, se aumentan las propiedades mecánicas del pavimento, como la densidad máxima seca, el CBR (California Bearing Ratio, o ensayo de relación de soporte) y el módulo resiliente, por lo que se destaca que la condición de mezcla óptima, en cuanto a costos de construcción, fue 70% de escoria y 30% de piedra caliza triturada.

En las mezclas que tenían escoria de acería como material granular, se observó una reducción de

patologías como el ahuellamiento y se redujo la deformación a cargas impuestas por el tránsito en 60 cm a partir del punto de impacto. Con los resultados obtenidos, es conveniente pensar en el empleo de escoria como material granular para base y subbase, ya que cumple con todos los requerimientos mecánicos exigidos para el uso en pavimentos.

En Brasil también se han adelantado importantes investigaciones para evaluar el comportamiento de las escorias en construcción, especialmente en la pavimentación de vías. En Río de Janeiro, por ejemplo, fueron seleccionados tres tramos de 1,3 km, 1,7 km y 4,5 km de una avenida con altos volúmenes de tránsito, en el parque industrial de Santa Cruz. En las capas de base granular y carpeta asfáltica se utilizó agregado natural y escoria de horno de arco eléctrico; esta última presentó buenas características, como coeficiente de desgaste inferior al 20% y un índice CBR superior al 100%. El desecho de acería, que provenía de la empresa siderúrgica Gerdau Aços Longos S.A. y fue procesada por Multiserv Ltda., se sometió a un proceso de separación granulométrica y de curado en patio, con el fin de garantizar su potencial de expansión. Los porcentajes de uso para la capa Binder fueron de 56,9% de escoria, 37,9% de agregado natural y 5,2% de cemento asfáltico, y para la carpeta asfáltica se usó 42,4% de escoria, 51,9% de agregado natural y 5,7% de cemento asfáltico.

Se estudió el comportamiento de bloques huecos de hormigón con escoria, adoquines con escoria y bloques con polvo de acería. La inclusión del material de reemplazo aumentó la resistencia a la compresión, tanto en los adoquines como en los bloques huecos de hormigón, con lo cual se logró una disminución de cemento con respecto a los bloques comunes, lo que conllevó también una reducción en los costos de producción. Además, los polvos de acería utilizados en pequeñas cantidades en la fabricación de bloques aumentan o mantienen su resistencia a la compresión. Se realizaron además estudios para el control ambiental, de los cuales se concluye que, debido a los altos contenidos de metales pesados, no debe usarse la escoria en la fabricación de adoquines, por estar estos en contacto con el suelo.

Otro de los países latinoamericanos que han incursionado en la investigación de este material con resultados satisfactorios es Chile. Allí se realizó un estudio en el cual se analizó la escoria de acería de

horno de arco eléctrico como elemento ingenieril, en obras viales que tienen que ver con base, subbase y rodados granulares para pavimentos. Se evidenció que cuando el material se pone y se compacta en obra, presenta una serie de reacciones de cementación e hidratación que son favorables para las capas de rodado granular, pero que también muestran las fisuras y deformaciones tempranas de las estructuras de pavimentos.

En la caracterización geomecánica realizada a la escoria de acería se muestran resultados que son apropiados para su uso en pavimentos. Así, se encuentran características como estas: no presenta índice de plasticidad, presenta un peso específico de 3,65, y en la clasificación de suelos, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), es una grava mal gradada (GP). Además tiene una densidad máxima de compactación de 2,62 kg/cm³, una humedad óptima de 7,9% y un CBR de 134%, lo que se puede interpretar como apto para el uso en obras de carreteras.

También se realizaron estudios químicos a la escoria, mediante ensayos superficiales como la espectroscopia de fotoelectrón de rayos X (XPS), en la que se determina la concentración de compuestos y elementos superficiales del material. Se encontró en su superficie compuestos como carbonatos e hidróxidos de calcio y magnesio.

Se le realizó análisis XPS sobre una superficie fresca y limpia, la cual no reacciona ante ácidos, y se observa la presencia de C, O, Si y Ca como elementos principales, y Mg, Fe, Mn, V y Cl como elementos secundarios. La escoria de acería tiene altos porcentajes de silicatos insolubles y térmicamente estables. En ensayos de bulto o convencionales, se pudo observar que los elementos causantes de los cambios volumétricos de expansión son los carbonatos de calcio (CaCO₃) y concentraciones de óxidos de calcio (óxidos de calcio en altas concentraciones). De este estudio se pudo concluir que la escoria de acería tiene características mecánicas aptas para el uso en obras viales, donde sea posible la expansión o cementación. En caso de que no sea posible, se debe pensar en una estabilización volumétrica.

En el artículo "Utilización de las escorias de acería como material de construcción", Boza (2011) realizó una recopilación de investigaciones anteriores en

todo el mundo, donde se describen las características físico-químicas de las escorias de horno de arco eléctrico y su uso como material de construcción. Se estudió el posible empleo de la escoria de la planta de Aceros Inoxidables (Acinox) de la provincia Las Tunas, donde se realizaron diversos estudios como espectroscopía de absorción infrarroja. Se identificó la existencia de la reacción hidráulica; con lo anterior se evaluó el comportamiento de la escoria como adición, determinando tiempo de fraguado, estabilidad volumétrica y resistencia mecánica. Con fundamento en estos resultados, se concluye que las escorias de horno de arco eléctrico son útiles en material para subbase, base y mezclas asfálticas.

En los documentos bibliográficos obtenidos en el trabajo en mención se señala que las escorias de acería cumplen con los requerimientos exigidos para utilizarla en la ingeniería, como adición de cemento, agregado fino en el hormigón y en el asfalto.

En Colombia:

Reyes y Camacho (2003) estudiaron el efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares. Su investigación se realizó utilizando escoria de alto horno de la siderúrgica del departamento de Boyacá. Como primera medida se efectuó una caracterización del material granular y se determinaron las propiedades mecánicas y físicas de material que sería utilizado como reemplazo. En general, para los valores de CBR, se presentaron aumentos en la resistencia de las bases y subbases granulares entre 0,8% y 8,7%; con la adición de escoria en las diferentes dosificaciones para subbase se presentaron incrementos significativos en cada una de ellas. Así, se encontró como óptimo un 18% de escoria retenida en el tamiz 10. Para BG-1, igualmente todos los porcentajes obtuvieron incrementos de la resistencia; el valor de 8% es el ideal con material de reemplazo que pasa el tamiz 200.

Con las adiciones de escoria para base granular BG-1 se tuvieron resultados negativos, ya que no se presentaron incrementos significativos en la resistencia; incluso llegaron o a disminuir para las sustituciones de material que pasa los tamices 10 y 200. Para los diferentes niveles de compactación de BG-2, se observa que sin importar el porcentaje de escoria que se reemplace, la densidad presenta incrementos entre 0,22% y 3,6%; sin embargo, para

los resultados de CBR se encontraron incrementos en los especímenes compactados a 12 y 26 golpes, pero para aquellos con una compactación de 55 golpes y contenidos de escoria de 8% se presenta disminución del CBR en un 23%. Se realizaron además especímenes con reemplazo del material de desperdicio, con respecto al peso total de base granular tipo BG-2. Se obtuvieron así aumentos significativos entre 1,5% y 8% en densidad y resistencia, sin importar el nivel de compactación ni el porcentaje.

En el ámbito regional este tema de las escoria no ha sido muy explorado; por el contrario, son muy pocas las investigaciones que se han hecho para este material. De los pocos artículos o trabajos de grado existentes, la mayoría estudian el comportamiento de la escoria de alto horno en concreto hidráulico. Parra y Sánchez (2010) estudian principalmente el aprovechamiento de las escorias negras de horno de arco eléctrico como agregado en el concreto, generadas por la siderúrgica Diaco S.A., localizada en el municipio de Tuta. Allí hacen una evaluación técnica, financiera y comercial para evaluar la factibilidad de su uso.

Básicamente, se hizo el diseño de mezclas para diferentes dosificaciones de agregado para concreto de 0%, 25%, 50%, 75% y 100%, y se evaluó la resistencia a los 7 y 28 días. Se concluyó que utilizar escorias negras de acería en el concreto, como agregado grueso, mejora considerablemente las propiedades mecánicas, ya que, a diferencia del agregado convencional, tiene mayor resistencia al desgaste, mayor peso específico y dureza, lo que da como resultado una elevada resistencia a la compresión.

Adicionalmente, el autor de esta ponencia tuvo la oportunidad de dirigir tres trabajos de grado, en los que se evaluaron de manera experimental las posibilidades de uso de las escorias negras de horno de arco eléctrico en bases y subbases granulares, mezclas asfálticas en caliente (para unas cuantas dosificaciones) y mezclas asfálticas en frío. Se obtuvieron resultados favorables en muchos casos.

3. Conclusiones

Las escorias negras vienen siendo usadas en carreteras desde 1956, en casos específicos, sin haber profundizado en dicha época más allá del uso

particular que le dieron en su estudio técnico. Muchas de estas escorias negras pueden tener algo de potencial expansivo, lo que debe llevar, a quienes las usen, a generar procesos para su control; e no hacerlo, esto sería desfavorable para el caso de la estabilidad de suelos y estructuras de pavimentos.

En la mayoría de los estudios revisados se pudo observar que las escorias negras poseen buenas propiedades de resistencia al desgaste por abrasión (inferior al 35%) y CBR superiores al 100%. La posibilidad de uso de escorias negras de horno de arco eléctrico se da para incluirlas en capas granulares mezclado, solo en algunos casos, y para capas asfálticas e inclusive mezclas de concreto hidráulico para pavimentos.

En algunos estudios revisados se pudo evidenciar que la escoria cumple con la normativa estipulada para usarlas en mezclas asfálticas y que los resultados de expansión no superan el 1% después de los 7 días de inmersión. Según el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos (UCSC), la escoria negra se puede considerar normalmente como una GP, es decir, grava mal gradada. Países como Brasil, España y Chile han sido, en el ámbito de los países hispanohablantes, algunos de los que más han estudiado y usado las escorias negras de horno de arco eléctrico.

4. Referencias

- Ahmedzade, P. y Sengoz, B (2008). *Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete*. Bornova: Universidad de Egeo.
- Airey, G. D., Collop, A. C. y Thom, N. H. (2004). *Mechanical Performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates*. Nottingham: Universidad de Nottingham.
- Amaral, L. (1999). *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental* (tesis doctoral). Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ansorena, J. et al. (2001). *Valorización de escorias de acería en la construcción de pistas forestales*. Madrid: Departamento de Agricultura y Medio Ambiente.
- Badillo, J. (2000). *Mecánica de suelos*. Ciudad de México: Limusa.

- Boza, M. (2011). *Utilización de las escorias de acería como material de construcción*. Cuba: Universidad de Holguín.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (s. f.). Catálogo de residuos utilizables en construcción. Recuperado de <http://www.cedexmateriales.es/>
- Correia, A. et al. (2008). *Agregados siderúrgicos inertes para a construção: um novo material de construção*. Curia, Portugal: Associação Plataforma para a Construção Sustentável.
- Ebrahim, A. y Behiry, E. (2012). *Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement*. Egipto: Minufiya.
- Elías, X. (2009). *Reciclaje de Residuos Industriales. Residuos Sólidos Urbanos y fangos de depurador*. Madrid: Díaz de Santos.
- Frias, M., Sánchez, I. y Uría, A. (2001). *Estudio de la inestabilidad en escorias negras de horno de arco eléctrico*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja.
- Liapis, L. y Likydis, S. (2012) *Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing*. Grecia: Transport Research Arena.
- Machado, F. et al. (2009). *Empleo de agregado siderúrgico (escoria de acería) en base y revestimiento de pavimento en calles de la municipalidad de la ciudad de Río de Janeiro*. Bello Horizonte, Brasil: Universidad de Bello Horizonte.
- De Vicente, M. M. (s. f.). *Los residuos-su uso ecológico en la construcción*. Recuperado de <http://goo.gl/sRmsh9>
- Montejo Fonseca, A. (2006). *Ingeniería de pavimentos*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Nicolalde, S. (2008). *Utilización de escorias y polvos de acería en la producción de bloques y adoquines*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Ortega, V. (1999). *Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos* (tesis doctoral). Burgos: Universidad de Burgos.
- Otegi, K. (2012). *Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Parra, A. L. y Sánchez G. D. (2010). *Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco municipio de Tuta Boyacá* (tesis pregrado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Pasetto, M. y Baldo, N (2010a). *Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag*. Padua: Universidad de Padua.
- Pasetto, M. y Baldo, N (2010b). *Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags*. Padua: Universidad de Padua.
- Pasetto, M. y Baldo, N (2012). *Fatigue behavior characterization of bituminous mixtures made with reclaimed asphalt pavement and steel slag*. Padua: Universidad de Padua.
- Reyes, O. y Camacho, J. (2003 julio). Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 25-30.
- Sorlini, S., Sanzeni, A., Rondi, L y Baldo, N. (2010). *Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag*. Padua: Universidad de Padua.
- Valenzuela, M. et al. (s. f.). *Análisis geomecánico de escorias de acería. posibilidades de uso en obras viales*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Vázquez, R. y Barra, M. (2001). *Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción* (tesis de grado). Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Winkelmann, G. y Storimpex, B. (2011). *Steel Slag. Conversion of an industrial waste material into a value adding asphalt ingredient*. Recuperado de <http://goo.gl/HkwKru>
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q. y Chen, Y. (2006). *utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (sma) mixtures*. Wuhan: Universidad de Tecnología Wuhan.