

Characterization of blast furnace slag for road projects

Caracterización de una escoria de alto horno para proyectos viales

H. Rondón ^{1*}, W. Fernández ^{*}, D. Patiño ^{*}, J. Ruge ^{**}, H. Vacca ^{***}, F. Reyes ^{***}

* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. COLOMBIA

** Universidad Piloto de Colombia, Bogotá. COLOMBIA

*** Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 07/09/2017

Fecha de Aceptación: 09/03/2018

PAG 83-92

Abstract

The present study evaluated the potential use of Blast Furnace Slag (BFS) as forming material of untreated granular layers in pavement (e.g. base, subbase and subgrade), and as stone aggregate in the manufacture of asphalt mixtures. For that purpose, tests of characterization, X-ray diffractometry (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and imaging in a scanning electron microscope (SEM) were executed on the BFS. As a general conclusion is reported that the BFS can be used in the formation of unbound granular layers of subbase. As granular base material, its use would be recommended on roads with low traffic volumes or with thick asphalt layers and as a selected material, in tertiary roads that support light traffic. In the case of HMA is not recommended to use the coarse fraction of the BFS as a stone aggregate. However, the obtained results indicate that the fine fraction shows good characteristics to be used in the production of the mastic of such mixtures.

Keywords: Blast furnace slag, BFS, granular material, road construction, pavements

Resumen

El presente estudio evaluó el potencial de uso de una escoria de alto horno (BFS) como material de conformación de capas granulares no tratadas en pavimentos (base, subbase y afirmado), y como agregado pétreo en la fabricación de mezclas asfálticas. Para tal fin, fueron ejecutados sobre la BFS, ensayos de caracterización, difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) e imagenología en un microscopio electrónico de barrido (MEB). Como conclusión general se reporta que la BFS puede ser utilizada en la conformación de capas granulares no tratadas de subbase. Como material para base granular se recomendaría su uso en vías con bajos volúmenes de tráfico o con capas asfálticas gruesas, y como material de afirmado, en vías terciarias que soporten tráfico liviano. Para el caso de mezclas asfálticas no se recomienda utilizar como agregado pétreo la fracción gruesa de la BFS. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que la fracción fina presenta buenas características para ser utilizado en la producción del mastic de dichas mezclas.

Palabras clave: Escoria de alto horno, BFS, material granular, construcción vial, pavimentos

1. Introducción

En proyectos de construcción, mantenimiento y rehabilitación vial se emplean grandes cantidades de materiales granulares naturales (MGN). Lo anterior redundando en un impacto ambiental negativo. En las últimas dos décadas ha venido creciendo el interés por reemplazar MGN por materiales alternativos, con el objetivo de conservar los recursos naturales, reducir el espacio que ocupan al final de su vida útil en las escombreras e impedir el deterioro del paisaje (Pasetto y Baldo, 2010). Sin embargo, con respecto al uso de materiales alternativos aún existen diversas inquietudes ligadas a la evaluación del desempeño técnico y ambiental en proyectos viales, las cuales no han sido respondidas de manera satisfactoria (Nouvion et al., 2009).

Uno de los materiales alternativos que pueden ser utilizados como sustitutos de MGN son las escorias de alto horno (BFS por sus siglas en inglés). Este material se forma cuando el mineral de hierro, coque y un fundente (ya sea de piedra caliza o dolomita) se funden juntos en un alto horno (FHWA, 2008); (Marriaga y Claisse, 2011). Importantes cantidades de este material se generan como desecho diariamente en las industrias de acero. De acuerdo con

(Okumura, 1993), (Proctor et al., 2000) y (Airey et al., 2004), la producción anual de BFS en USA, Japón y Reino Unido es de 13, 24.3 y 4 millones de toneladas, respectivamente. Según (Proctor et al., 2000), y (Das et al., 2007), por cada tonelada de hierro producido se genera una cantidad de escoria de alto horno entre 220-370 kg y 340-421 kg, respectivamente. El método convencional de eliminar escorias es transportándolas y depositándolas en escombreras. Lo anterior genera un problema ambiental, ya que ocupan espacios dentro de los rellenos sanitarios, desperdiciando un material que puede ser reutilizado. De acuerdo con Nouvion et al. (2009), al utilizar escorias de alto horno se podría reducir el consumo de energía durante el proceso de extracción de MGN, disminuyendo la liberación de contaminantes en el aire, el agua y el suelo.

Algunos usos de las BFS han sido como fertilizantes (Geiseler, 1996), en la construcción de carreteras (Houben et al., 2010), en la recuperación de suelos y en la preparación de materiales tales como vidrio de cerámica, gel de sílice, ladrillos, entre otros (Das et al., 2007). Sin embargo, tal vez su mayor uso es en la producción de cemento (Shi, 2004); (Das et al., 2007); (Abu-Eishah et al., 2012); (Sorlini et al., 2012).

El grupo de estudio identificó como posibles usos de BFS para sustituir MGN en proyectos viales, la conformación de capas granulares de afirmados, subbase, base, y como agregados pétreos para la fabricación de mezclas asfálticas. Por lo anterior, en el presente estudio se ejecutó una fase experimental para evaluar estos posibles usos. Para tal fin, los ensayos típicos que se realizan sobre las fracciones gruesas y

¹ Autor de correspondencia:

Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
E-mail: harondonq@udistrital.edu.co



finas de MGN para caracterizarlas fueron ejecutados sobre la BFS. A diferencia de otros estudios realizados sobre BFS, en el presente se midió la composición mineralógica, química y micro-estructural del material empleando difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y técnicas de reconocimiento visual del material con microscopio electrónico de barrido (MEB).

2. Metodología

La escoria BFS utilizada fue del tipo Air-Cooled Blast Furnace Slag - ACBFS (al salir de los altos hornos son enfriadas lentamente al aire libre; (NSA, 2016), procedente de la empresa Acerías Paz del Río (Nobsa – Boyacá, Colombia). La Figura 1 muestra las fracciones gruesa y fina de la BFS analizada.



Figura 1. Partículas de escoria (gruesos y finos)

2.1 Caracterización visual

Inicialmente se realizó una fase de caracterización visual para ayudar a identificar los grupos de muestras representativas que serían ensayadas en DRX, FRX y MEB. Lo anterior debido a que las BFS son materiales altamente heterogéneos (formas y tamaños de partículas, composición química, textura, gravedad específica, resistencia al desgaste y porosidad, entre otros), que desarrollan características y propiedades complejas (Akbarnejad et al., 2014). En la Figura 2 se presentan los dos tipos de partículas gruesas que predominan en la BFS, que se utilizó en el presente estudio.

Las partículas de la imagen izquierda son las que se presentan en mayor cantidad dentro del BFS (en promedio aproximadamente un 65% con respecto al número de partículas), su coloración superficial es negra brillante, y cuando se trituran, internamente desarrollan coloración grisácea. Adicionalmente presentan una consistencia rígida, dura y masa similar a la de agregados pétreos naturales (MGN), a pesar que son mucho más porosas. Por el contrario, las partículas de la imagen derecha son fáciles de desgastar por abrasión (incluso con las manos), son livianas, presentan coloración verde claro y flotan en el agua.



Figura 2. Partículas de escoria (tamaño entre 3/4" y 1" de diámetro)

2.2 Caracterización típica por especificaciones

Sobre la BFS se hicieron los mismos ensayos que se especifican para MGN en la construcción de capas granulares no tratadas en pavimentos (base, subbase, afirmados, entre otros) y la fabricación de mezclas asfálticas, como son: gravedad específica y absorción (AASHTO T 84-00, AASHTO T 85-91), desgaste en la máquina de Los Ángeles (AASHTO T 96 – 02), Micro-Deval (AASHTO T327-05), 10% de finos (DNER-ME 096-98), contenido de impurezas (UNE 14613:2000), índice de plasticidad (ASTM D 4318-00), índices de aplanamiento y alargamiento (NLT 354-91), equivalente de

arena (AASHTO T 176-02) y CBR (AASHTO T 193-99). Cada ensayo fue ejecutado cinco veces y no se generó alta dispersión en los resultados. Para realizar el ensayo de CBR, se utilizaron las granulometrías presentadas en la Tabla 1 (BG, SBG y A se refieren a base, subbase y afirmado, respectivamente). Previamente a este ensayo, las muestras fueron compactadas mediante el ensayo Proctor (AASHTO T 180), obteniendo peso unitarios secos máximos y contenidos óptimos de agua de 16 kN/m³ y 6%, 16.6 kN/m³ y 7.1%, y 16.2 kN/m³ y 7.7% para BG, SBG y A, respectivamente.

Tabla 1. Granulometría utilizada para ensayos de compactación y CBR (INVIAS, 2013).

TAMIZ		Porcentaje que pasa (%)		
		BG-25	SBG-38	A-38
1 1/2"	37.5 mm	-	100	100
1"	25 mm	100	85	-
3/4"	19 mm	85	70	90
3/8"	9.5 mm	65	60	72.5
No. 4	4.75 mm	50	45	52.5
No. 40	2.0 mm	32.5	32.5	40
No. 80	0.425 mm	20	19	21.5
No. 200	0.075 mm	10	8.5	13.5

2.3 Caracterización mineralógica

Para la caracterización mineralógica de la BFS fue llevado a cabo un análisis basado en difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX). En el ensayo DRX, la preparación de la muestra inició con una fase de pulverización y tamizaje para garantizar un tamaño de partícula inferior a 75 μm . Luego, la muestra se vertió sobre un portamuestras de aluminio y con ayuda de una espátula se retiró el excedente, creando así la superficie plana sobre la cual se realiza el análisis (ver detalles del procedimiento en (Moore y Reynolds, 1997); (Chipera y Bish, 2001); (Zhang et al., 2003) y (Reed, 2005)).

Para el caso del ensayo FRX (Beckhoff et al., 2006), las muestras fueron secadas a 105°C por un periodo de 12 horas. Debido a que el tamaño de grano de la muestra es demasiado grueso y su granulometría bien gradada (heterogénea), ésta se redujo con un molino de bolas de ágata. Las muestras fueron homogenizadas por agitación y se prepararon en forma de perlas fundidas con relación muestra:fundente, de 1:10. Como fundente se utilizó una mezcla de Tetraborato de Litio y Metaborato de Litio, y para evitar la adherencia, se añadió Yoduro de Litio. Posteriormente fueron llevadas a un horno de inducción. De este modo se obtuvieron discos de vidrio de 37 mm de diámetro para ser medidos en una aplicación semi-cuantitativa o cuantitativa. El análisis cuantitativo se realizó mediante el software SemiQ, con el cual se realizaron 11 barridos para detectar todos los elementos presentes en la muestra (se excluyen H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos).

2.4 Microestructura

La microestructura de cualquier material que es componente de un sistema que va a funcionar mecánicamente, gobierna parte de su comportamiento, en especial si dicha microestructura es susceptible de ser invadida por un fluido que condicione su respuesta mecánico-hidráulica. La preparación de las muestras de escoria para una prueba de imagenología fue realizada mediante una primera selección de diferentes granos, con el fin de obtener un resultado estadísticamente confiable. Los granos escogidos fueron cinco de coloración verde, tres de coloración negra, y uno de coloración blanca. El último era escaso en la población entregada, por lo que únicamente se seleccionó una única muestra. El ensamble de la muestra consistió en la utilización de resina con endurecedor para obtener una panela que contuviese todos los granos escogidos. Luego se procedió a pulir en espejo (abrasivos en discos y paños), la superficie de interés para después depositar una capa conductora en su superficie. En la Figura 3 se puede observar el resultado final de la metalización previa. Finalmente la muestra fue estudiada utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB) y se tomaron varias fotografías de cada grano individual a diferentes aumentos para ser posteriormente analizadas. Con el fin de comparar los resultados obtenidos sobre la BFS, este ensayo también se ejecutó sobre una muestra de MGN que se utiliza como agregado pétreo de mezclas asfálticas y la cual ha sido ampliamente estudiada y caracterizada por el grupo de investigación (Figura 4).





Figura 3. Muestra ensamblada con granos seleccionados de BFS



Figura 4. Muestra ensamblada con granos seleccionados de MGN

3. Resultados

3.1 Caracterización típica por especificaciones

Los resultados de los ensayos de caracterización realizados sobre la BFS se presentan en la Tabla 2.

Se observa en la Tabla 2, que al disminuir el tamaño de las partículas de BFS, incrementa la gravedad específica y disminuye la absorción. Lo anterior es debido tal vez, a que durante el proceso de fracturación mecánica ejecutado sobre las partículas gruesas para obtener las finas, éstas últimas pierden parte de su porosidad. Adicionalmente, lo anterior es un indicador de incremento de la porosidad con el aumento del tamaño de la partícula. Con base en los resultados de desgaste en Micro-Deval y 10% de finos se reporta, que las BFS presenta una buena resistencia al desgaste por abrasión por fricción entre partículas y al fracturamiento bajo carga monotónica, respectivamente. Sin embargo, tal como se reporta en la literatura de referencia (p.e., (Airey et al., 2004); (FHWA, 2008), las BFS son materiales que experimentan baja resistencia al desgaste por abrasión por impacto en la máquina de Los Ángeles. Asimismo se observa, que dicho material presenta partículas con formas ideales (redondeadas con caras angulares y fracturadas con muy poco contenido de partículas

alargadas y aplanadas) para desarrollar un buen esqueleto granular que ayude en procesos de compactación, así como a resistir cargas estáticas, dinámicas o de impacto. Las partículas finas no presentan contenido de arcilla, materia orgánica o de polvo. Los CBR obtenidos (al 100% de densidad seca máxima y cuatro días de inmersión en agua) fueron de 95.3%, 88,7% y 76.1% para BG, SBC y A, respectivamente. Estas magnitudes son altas e indican, en conjunto con los resultados anteriormente reportados en la Tabla 2 y los requisitos mínimos de calidad que se exigen para BG, SBC y A (Tabla 3), que las BFS pueden ser utilizadas como agregado pétreo para la conformación de capas granulares de subbase y afirmado de pavimentos. Incluso se podría pensar en su empleo como material para base granular de vías con bajos volúmenes de tráfico o con capas asfálticas gruesas, ya que tan solo no cumple la resistencia máxima exigida de 35% de desgaste en la máquina de Los Ángeles. Adicionalmente para el caso de afirmados, se debe tener precaución, ya que este material sería susceptible a fracturarse (por los valores obtenidos de desgaste en la máquina de Los ángeles y la alta porosidad de las partículas gruesas) debido a que estas capas son sometidas a la acción directa del tráfico en vías terciarias.

Tabla 2. Caracterización de la escoria BFS

Ensayo	Método	Valor
Gravedad específica/adsorción (3/4")	AASHTO T 84-00 AASHTO T 85-91	1.81/3.75%
Gravedad específica/adsorción (3/8")		1.97/3.33%
Gravedad específica/adsorción (No. 4)		2.11/2.73%
Gravedad específica/adsorción (No. 40)		2.26/2.65%
Gravedad específica/adsorción (No. 80)		2.36/2.25%
Gravedad específica/adsorción (No. 200)		2.45/1.95%
Resistencia en la máquina de Los Ángeles, 500 revoluciones	AASHTO T 96 – 02	49.2%
Micro-Deval	AASHTO T327-05	29.2%
10% de finos (seco)	DNER-ME 096-98	123 kN
Caras fracturadas: 1 cara	ASTM D 5821-01	92%
Caras fracturadas: 2 caras		88%
Partículas planas y alargadas		1%
Equivalente de arena	AASHTO T 176-02	62%
Contenido de impurezas	UNE 14613 : 2000	0%
Índice de plasticidad	ASTM D 4318-00	No plástico
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	5.62%
Índice de alargamiento		10.62%

Como agregado pétreo grueso para el caso de mezclas de concreto asfáltico (MDC – mezcla densa en caliente), la alta adsorción reportada en la Tabla 2 indica la necesidad de requerir mayores contenidos de asfalto resultando en un incremento en el costo. A pesar de lo anterior, en algunos casos este mayor costo se podría compensar con el mayor rendimiento (volumen por masa) de BFS como agregado debido al menor peso unitario de la mezcla. Por ser un material poroso en comparación con agregados convencionales, puede ser necesario un tiempo de secado más largo en plantas de

producción de mezclas asfálticas. Adicionalmente, al no cumplir la mayor parte de los requisitos mínimos de calidad de agregados para MDC (Tabla 3), las BFS serán más propensas al desgaste por abrasión y fracturamiento de partículas debido a que los vehículos circulan directamente sobre la capa asfáltica en el pavimento. Sin embargo se observa, que la BFS tiene propiedades deseables para ser utilizada como agregado que pueda sustituir la fracción fina del agregado pétreo (equivalente de arena alto, llenante no plástico, contenido de impurezas nulo y disminución de la adsorción).



Tabla 3. Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos para afirmados (A), subbases (SBG), bases (BG) y mezclas asfálticas (MDC) acorde con (INVIAS, 2013). Vías con altos volúmenes de tránsito

Ensayo	Método	A	SBG	BG	MDC
Desgaste Los Ángeles (500 revoluciones), seco	AASHTO T 96-02	50% máx.	50% máx.	35% máx.	25% máx.
Micro-Deval	AASHTO T327-05	NA	30% máx.	30% máx.	20% máx.
10% de finos (seco)	DNER-ME 096-98	NA	NA	90 kN mín.	110 kN mín.
Índice de plasticidad	ASTM D 4318-00	4-9	6% máx.	0	0
Equivalente de arena	AASHTO T 176-02	NA	25% mín.	30% mín.	50% mín.
Contenido de impurezas	UNE 14613 : 2000	2% máx.	2% máx.	2% máx.	0.5% máx.
Caras fracturadas: 1 cara	ASTM D 5821-01	NA	NA	100% mín.	85% mín.
Caras fracturadas: 2 caras	ASTM D 5821-01	NA	NA	70% mín.	70% mín.
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	NA	NA	35% máx.	10% máx.
Índice de alargamiento	NLT 354-91	NA	NA	35% máx.	10% máx.
CBR (al 100% de densidad seca máxima y cuatro días de inmersión en agua)	INV. E-148	15% mín.	30% mín.	95% mín.	NA

Nota: NA: No aplica.

3.2 Caracterización mineralógica – DRX y FRX

En la Figura 5 se presenta el difractograma (muestra en polvo) obtenido del ensayo DRX. Se puede observar el eje de las ordenadas *counts*, que corresponde a las intensidades de cada pico de mineral difractado, y las abscisas muestran el ángulo 2θ de acuerdo a la ley de Bragg (Ecuación 1).

$$n\lambda = 2d \text{ sen } \theta \quad (1)$$

Donde, n es un entero positivo, λ es la longitud de onda de la onda incidente, d es la distancia interplanar y θ es el ángulo de difracción. Bragg (1910) demostró, que existe una relación entre la distancia interplanar d en la estructura

cristalina de un mineral o minerales, y el seno del ángulo θ . La intensidad de la altura del pico en el eje y depende de la estructura cristalina y la cantidad de cada mineral presente en la muestra.

En otras palabras, los diferentes picos detectados, son las reflexiones de los planos en cada fase mineral, los cuales son comparados con una base de datos (Brucker). La cuantificación es realizada con un software especializado, el cual opera bajo el método RIR. Este método en particular consiste en hacer una relación entre intensidades relativas. La función que modela el difractograma tiene en cuenta los parámetros de escala, los cuales describen el background y las formas de los picos, contribuciones del instrumento y orientaciones preferentes. En la Tabla 4 es posible observar los minerales encontrados en la muestra de BFS analizada.

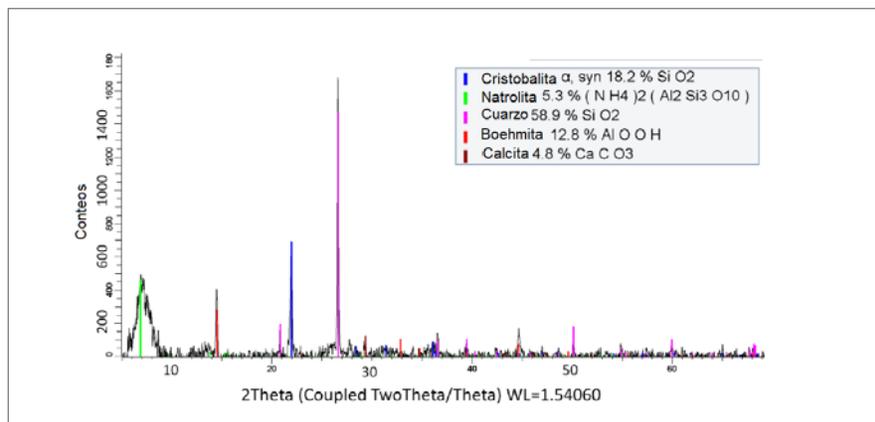


Figura 5. Difractograma de BFS en polvo

Tabla 4. DifractoPorcentajes de minerales en la muestra

Mineral	% En peso
Cuarzo	58.9
Cristobalita	18.1
Boehmita	12.8
Calcita	4.8
Natrolita	5.3

Se observa, que los minerales predominantes (77%) son el cuarzo (sílice - SiO_2) y la cristobalita (fase cubica de alta temperatura del sílice - SiO_2). La sílice es uno de los materiales de óxido más abundantes en la naturaleza, donde puede existir de manera amorfa como sílice de vidrio o en gran variedad de formas cristalinas. Este material posee una buena resistencia a la abrasión (alta dureza), alta estabilidad térmica y en general aceptables propiedades mecánicas (Tabla 5), como reporta (Muniandy et al., 2013). La presencia de sílice en todas sus formas en muestras de BFS puede generar eventualmente altos niveles de interlocking, ya sea entre sus propias partículas o trabajando en combinación con MGN, debido a su textura rugosa y resistencia a la compresión. Los resultados en el DRX son coherentes con los reportados en el ensayo FRX (Tabla 6)

en donde el componente químico predominante es la sílice (SiO_2) en forma de Cuarzo y Cristobalita. Se reporta adicionalmente, que la BFS analizada está compuesta predominantemente por sílice, óxido de calcio (CaO) y óxido de aluminio (86.76%).

Para el caso de mezclas asfálticas, el Al_2O_3 en conjunto con el CaO , pueden ser utilizados como mejoradores de adherencia; (Muniandy et al., 2013); (Modarres y Rahmzadeh, 2014); (Nassar et al., 2016). Adicionalmente el SiO_2 y el Al_2O_3 son compuestos puzolánicos, los cuales en tamaños de partículas muy finas pueden desarrollar propiedades auto-cementantes (Misra et al., 2005). Todo lo anterior podría redundar en efectos benéficos sobre la resistencia al ahuellamiento, al daño por humedad y al *stripping*.

Tabla 5. Propiedades físicas del cuarzo

Propiedad	Cuarzo
Densidad (g/cm^3)	2.65
Resistencia a la tracción (MPa)	55
Resistencia a la compresión (MPa)	2070
Módulo de Elasticidad (GPa)	70

Tabla 6. Resultados de FRX para la muestra analizada en base seca

Elemento	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	TiO_2	K_2O	MgO	Na_2O	SO_3	Ba	Cr
% en peso muestra	52.03	20.83	13.90	6.52	2.26	0.979	0.862	0.818	0.653	0.475	0.209	0.124

3.3 Microestructura

La diferenciación entre las tres coloraciones escogidas desde el principio en la BFS, indicó efectivamente tres poblaciones distintas. Inicialmente se calculó la porosidad de las muestras para obtener los resultados indicados en la Tabla 7. Los granos verdes tienen una dispersión considerable

pero tienden a presentar magnitudes por encima de las otras poblaciones en cuanto a porosidad. En los granos blancos, la porosidad es alta pero menor que en el caso de la población verde. Finalmente se destaca la población negra por su menor porosidad y escasa variación.



Tabla 7. Valores de las porosidades calculadas para las poblaciones diferentes de granos

Tipo	Porosidad (%)	Error (%)
Granos verdes	63	13
Granos negros	9	3
Grano blanco	50	4

Con el objeto de entender de manera visual los resultados fue necesario hacer ensayos con MEB. En las Figura 6, Figura 7, y Figura 8 se pueden ver casos específicos y representativos de cada muestra de grano escogida. Es posible evidenciar la diferencia entre las muestras de los granos de coloración negra y demás tipos. En las imágenes mostradas se puede analizar que las poblaciones de granos más frecuentes en la muestra (verdes y blancos), presentan una porosidad similar (63% y 50%) revelada por la presencia de tamaños de grano más gruesos. En contraste, el grano negro presenta una porosidad menor tal como se presenta en la Figura 7. Los valores cuantitativos de las gargantas porales de cada población de granos son consecuentes con la porosidad obtenida, puesto que entre menos porcentaje de vacíos exista en la muestra, también habrá menos posibilidad de interconexión entre los mismos. Adicionalmente, se puede evidenciar en el caso de los granos negros que la baja porosidad presente en la muestra, se traduce en un valor más bajo en la proporción y tamaño de las gargantas (Tabla 8). La distribución de las gargantas porales de la población de granos negros no se encuentra bien definida por la poca porosidad observada en la imagen, en gran parte controlada por el tamaño de grano que tiende a ser menor que la de las otras poblaciones. De otra parte, tanto los granos verdes como los blancos presentan una distribución que es fácilmente definida de manera visual en las imágenes, puesto que se observa de manera nítida la conectividad entre los poros. La Tabla 8 muestra el resumen estadístico para cada población. Nuevamente la variación en los resultados de los granos verdes

es evidente gracias a una desviación considerable, sin embargo revela un promedio más alto en la garganta poral en comparación con los otros granos. Estadísticamente se puede determinar que, para los granos verdes, negros y blancos, el promedio de la garganta poral es 82.6 μm , 27.5 μm y 30.3 μm , respectivamente.

Basándose exclusivamente en la imagenología y el análisis de gargantas porales, es evidente que la población de granos verdes gobierna el comportamiento de la muestra completa, debido a que sus granos presentan coincidencias cercanas al 72% de la población total. Este resultado es contrario al obtenido en la caracterización visual de las partículas gruesas en donde se reporta una mayor cantidad de granos negros y grisáceos. Lo anterior es tal vez debido a que durante el proceso de fracturación mecánica para obtener las partículas finas, es más fácil desgastar y fracturar las partículas gruesas verdes del BFS. Los granos verdes de la BFS presentan una alta porosidad lo que hace presumir *a priori* que, si este material hace parte de una mezcla asfáltica, el material ligante se va a adherir más fácilmente a estos.

Para realizar el ensayo sobre el MGN fueron escogidos siete tipos de granos, los cuales presentaban características litológicas diferentes, no poseían características compartidas y se clasificaron de acuerdo a tamaño de grano, color y esfericidad. La porosidad y garganta poral promedio de los granos escogidos fue de 7% y 12 μm , respectivamente. Estas magnitudes de porosidad y garganta poral son bajas en comparación a las reportadas con anterioridad en la BFS.

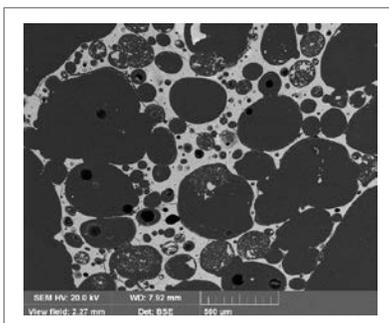


Figura 6. Grano representativo de la población de granos verdes

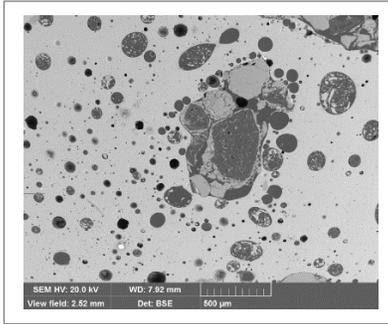


Figura 7. Grano representativo de la población de granos negros

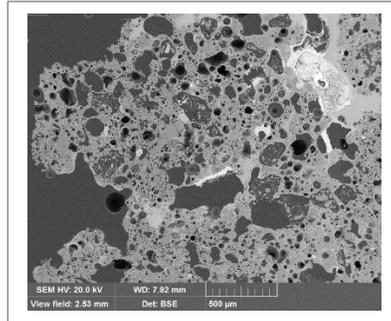


Figura 8. Grano representativo de la población de granos blancos

Tabla 8. Datos estadísticos para cada una de las poblaciones de granos

Parámetro	Granos Verdes	Granos Negros	Granos Blancos
Promedio (μm)	82.6	27.5	30.3
Desviación (μm)	71.0	25.0	25.4
Mediana (μm)	60	17.65	20.5
Rango (μm)	575.9	99.3	112.7
Máximo (μm)	585.9	104.0	116.6
Mínimo (μm)	10.0	4.7	3.9
Cuentas	255	39	60

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir, para el caso de uso de BFS como material en la conformación de capas granulares, lo siguiente:

La BFS analizada, al constituirse principalmente por cuarzo (sílice), el cual es un material de alta dureza, presenta buena resistencia al desgaste por abrasión por fricción y al fracturamiento bajo carga monotónica. Adicionalmente, presenta otras características deseables en proyectos viales como son i) partículas predominantemente redondeadas con caras angulares, fracturadas y escaso contenido de partículas alargadas y aplanadas (indicadores de un esqueleto granular más compacto y menos deformable bajo carga mecánica), ii)

equivalente de arena alto (indicador de un material que no tendrá exceso de finos), iii) las partículas finas no presentan contenido de arcilla o materia orgánica (estos dos materiales tienden a disminuir la respuesta mecánica de materiales granulares en proyectos viales), v) alta resistencia al corte bajo condiciones de humedad y densidad controlada. Sin embargo, la alta porosidad de las partículas puede inducir fracturamiento bajo una carga mecánica. Por las anteriores propiedades mencionadas, la BFS puede ser utilizada con confianza en la conformación de capas granulares de subbase en pavimentos (debido a que los esfuerzos del tráfico se han disipado cuando actúan sobre esta capa), como material para base granular de vías con bajos volúmenes de tráfico o con capas asfálticas gruesas y como material de afirmado en vías terciarias que soporten tráfico liviano (no se recomienda para tráfico pesado,

ya que esta capa por lo general en vías terciarias soportan de manera directa el tráfico).

Para el caso de mezclas asfálticas se puede concluir, que la fracción gruesa de la BFS no puede ser utilizada, ya que no reúne los requisitos mínimos de calidad que se exigen para la fabricación de estos materiales según especificaciones técnicas. Adicionalmente las partículas gruesas presentan alta porosidad y por ende alta adsorción. Lo anterior es indicador de: i) probabilidad de fracturamiento de partículas por impacto o bajo la acción de tráfico pesado y carga cíclica, ii) necesidad de mayores contenidos de asfalto, resultando en un incremento en el costo, iii) mayores requerimientos de tiempos de secado de las partículas de BFS en las plantas de producción

de mezclas. A pesar de lo anterior, la fracción fina reporta buenas características para ser utilizado en la producción del mastic de mezclas asfálticas: i) equivalente de arena alto, ii) contenido nulo de arcilla o materia orgánica, iii) por estar compuestas principalmente por materiales puzolánicos, CaO y Al₂O₃ pueden desarrollar propiedades auto-cementantes incrementando la resistencia al daño por humedad y al stripping, mejorar la adhesión superficial asfalto-agregado, la cohesión interna del mastic, y la resistencia al ahuellamiento de la mezcla, iv) el alto contenido de cuarzo identificado revela que se puede desarrollar una alta resistencia mecánica e interlocking en el esqueleto del conjunto de materiales.

5. Referencias

- Abu-Eishah S. I., El-Dieb A. S., Bedir M. S. (2012)**, Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*, 34:249-256, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012>.
- Airey G. D., Collop A. C., Thom N. H. (2004)**, (12-16 of September). Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates. In *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*. Sun City, North West Province, South Africa.
- Akbarnejad S., Houben L.J.M., Molenaar A.A.A. (2014)**, Application of aging methods to evaluate the long-term performance of road bases containing blast furnace slag materials. *Road Materials and Pavement Design*, 15(3):488-506, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2014.907196>.
- Beckhoff, B., Kanngießner B., Langhoff N., Wedell R., Wolff H. (2006)**, *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*, 863 p., Springer.
- Chipera S., Bish D. (2001)**. Baseline studies of the clay minerals society source clays: powder x-ray diffraction analysis. *Clays and Clay Minerals*, 49(5):398-409, DOI: 10.1346/CCMN.2001.0490507.
- Das B., Prakash S., Reddy P. S. R., Misra V. N. (2007)**, An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1):40-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008>.
- FHWA (2008)**, Federal Highway Administration Research and Technology. Coordinating, Developing, and Delivering Highway Transportation Innovations. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Report Publication Number: FHWA-RD-97-148.
- Geiseler J. (1996)**, Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management*, 16(1-3):59-63. doi:10.1016/S0956-053X(96)00070-0.
- Houben L. J. M., Akbarnejad S., Molenaar A. A. A. (2010)**, (3-5 of June). Performance of pavements with blast furnace base courses. In *GeoShanghai 2010 - International Conference, Paving Materials and Pavement Analysis, Geotechnical Special Publication No. 203* (pp. 476-483). Shanghai, China.
- INVIAS (2013)**, Instituto Nacional de Vías –Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C., Colombia.
- Marriaga J. L., Claisse P. (2011)**, The influence of the blast furnace slag replacement on chloride penetration in concrete. *Ingeniería e Investigación*, 31(2):38-47.
- Misra A., Biswas D., Upadhyaya S. (2005)**, Physico-mechanical behavior of selfcementing class C fly ash–clay mixtures. *Fuel*, 84(11):1410–1422, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.018>.
- Modarres A., Rahmanzadeh M. (2014)**, Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 66:476–483, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002>.
- Moore D., Reynolds R. (1997)**, X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals, p. 378, New York: Oxford University Press, Second Edition.
- Muniandy R., Aburkaba E., Mahdi L. (2013)**, Effect of mineral filler type and particle size on asphalt-filler mastic and stone mastic asphalt laboratory measured properties. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(11):475-787.
- Nassar A. I., Mohammedb M. K., Thom N., Parry T. (2016)**, Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. *Construction and Building Materials*, 114:352–363, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.112>.
- Nouvion S., Jullien A., Sommier M., Basuyau V. (2009)**, Environmental modeling of blast furnace slag aggregate production. *Road Materials and Pavement Design*, 10(4):715-745, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2009.9690224>
- NSA (2016)**, National Slag Association. <http://nationalslag.org/blast-furnace-slag>, consulted in april of 2016.
- Okumura H. (1993)**, Recycling of iron-and steelmaking slags in Japan. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Processing Materials for Properties*, Sponsored by: TMS; MMIJ Publ by Minerals, Metals & Materials Soc (TMS) (pp. 803-806).
- Pasetto M., Baldo N. (2010)**, Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3):938–948, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.104>.
- Proctor D. M., Fehling K. A., Shay E. C., Wittenborn J. L., Avent C., Bigham R. D., Connolly M., Lee B., Shepker T. O., Zak M. A. (2000)**, Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental Science and Technology*, 34(8):1576-1582, DOI: 10.1021/es9906002.
- Reed S. J. B. (2005)**, *Electron Microprobe analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*, 190 p., New York: Cambridge University Press.
- Shi C. (2004)**, Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3):230-236, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(230\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)).
- Sorlini S., Sanzeni A., Rondi L. (2012)**, Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 209–210:84-91, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.066>.
- Zhang G., Germaine J., Torrence M., Whittle A. (2003)**, A simple sample-mounting method for random powder X-RAY diffraction. *Clays and Clay Mineral*, 51(2):218-255, DOI: 10.1346/CCMN.2003.0510212.