



COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CUANDO SE SUSTITUYE PARCIALMENTE LA FRACCIÓN FINA DEL AGREGADO POR ESCORIA DE ALTO HORNO

Hugo Alexander Rondón-Quintana¹, Juan Carlos Ruge-Cárdenas², Fredy Alberto Reyes-Lizcano³

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia, harondonq@udistrital.edu.co

² Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia, juan.ruge@unimilitar.edu.co

³ Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia, fredy.reyes@javeriana.edu.co

Resumen

En el presente estudio, inicialmente se ejecutó una fase experimental que buscó evaluar el efecto que causa sustituir las fracciones gruesa y fina de agregados pétreos naturales (NGA) por una escoria de alto horno (BFS), sobre la resistencia mecánica bajo carga monotónica de una mezcla de concreto asfáltico. De esta fase se concluyó que el mejor comportamiento se obtiene cuando se sustituye la fracción fina. Por tal motivo, las siguientes fases experimentales evaluaron las propiedades mecánicas de la mezcla cuando se sustituye la fracción fina del NGA por BFS. Fueron realizados ensayos de tracción indirecta, módulo resiliente y deformación permanente. También se evaluó la resistencia al daño por humedad. Sobre el filler del NGA y la BFS fueron realizados ensayos de difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX), así como visualizaciones con microscopio electrónico de barrido (MEB). Como conclusión general se obtuvo, que el mejor comportamiento lo experimenta la mezcla que sustituye las partículas más finas del agregado pétreo del NGA por BFS (tamaño igual e inferior a 0.075 mm o filler). No se recomienda sustituir la fracción gruesa, ya que generó un incremento notable de los vacíos en la mezcla, necesidad de aumentar el contenido de asfalto y disminuyó la resistencia mecánica bajo carga monotónica.

Palabras Clave: escoria de alto horno, mezcla asfáltica, resistencia bajo carga monotónica y cíclica, resistencia al daño por humedad.

1 Introducción

Las escorias pueden ser clasificadas en tres categorías: las ferrosas como las escorias de alto horno, las no ferrosas y las que se producen por incineración [1]. De acuerdo con Das et al. [2] las escorias de alto horno (BFS) son materiales inorgánicos cuya composición típica es: sílice (30-35%), óxido de calcio (28-35%), óxido de magnesio (1-6%), y Al_2O_3/Fe_2O_3 18-25%. En la Tabla 1 se presenta la composición química reportada por Byers et al. [3] y Leon et al. [4]. 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. Cuando el proceso de fundición metalúrgico se completa, la cal en el flujo se ha combinado químicamente con los aluminatos y silicatos de la ceniza de mineral y el coque, formando la escoria de alto horno [5-6]. De acuerdo con la NSA [7], las escorias al salir de los altos hornos son enfriadas lentamente al aire libre (ACBFS, Air-Cooled Blast Furnace Slag) o rápidamente aplicándoles chorros de agua fría (escorias expandidas). Las primeras son utilizadas principalmente en la construcción como agregado pétreo (concreto y materiales de relleno, entre otros), mientras las segundas son más utilizadas en la producción de cemento. Asimismo, las escorias expandidas, debido a su mayor porosidad y reducido peso en comparación con las ACBFS [8], son utilizadas en la fabricación de concretos y mampuestos ligeros.



Tabla 1. Composición química de escorias de alto horno

Componente	Emery [9]	Jones [10]	León et al. [4]
CaO (%)	36-45	40	43.3
SiO ₂ (%)	33-42	36.8	25.5
Al ₂ O ₃ (%)	10-16	16	17
P (%)	-	-	2.3
MgO (%)	3-16	5.4	1.45
Na ₂ O (%)	-	-	1.4
S (%)	1-3	0.4	1
FeO (%)	0.3-0.2	0.2	-
Fe (%)	-	-	0.5
Fe ₂ O ₃ (%)	-	-	0.71
MnO (%)	0.2-1.5	0.5	-
TiO ₂ (%)	-	0.3	-
K ₂ O (%)	-	0.4	0.14

De acuerdo con Okumura [11], Proctor et al. [12] y Airey et al. [13], la producción anual de escoria de alto horno en USA, Japón y Reino Unido es de 13, 24.3 y 4 millones de toneladas, respectivamente. Según Proctor et al. [12], y Das et al. [2], 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. [14], al utilizar escorias de alto horno se podría i) reducir el uso de agregados pétreos naturales, evitando adicionalmente la liberación de contaminantes en el aire, el agua y el suelo durante el procesamiento de dichos materiales, ii) disminuir el consumo de energía durante el proceso de extracción de agregados naturales.

Las BFS han sido utilizadas ampliamente en el mundo desde hace más de un siglo. Algunos usos han sido como fertilizantes [15], en la construcción de carreteras [16], en la recuperación de suelos y en la preparación de materiales tales como vidrio de cerámica, gel de sílice, ladrillos, entre otros [2]. Sin embargo, tal vez su mayor uso es en la producción de cemento [2, 17-19], ya que este tipo de escoria [2]: i) contiene poco hierro, alto contenido de óxido de calcio y composición similar al clinker, ii) es un material que puede ser utilizado de forma segura junto con el clinker y el yeso, iii) debido al bajo contenido de hierro que contienen pueden ser usadas con seguridad en la producción de cemento, iv) ayudan a desarrollar en el cemento propiedades tales como bajo calor de hidratación, buena resistencia a largo plazo y a los ácidos, v) permiten hacer ahorros a las industrias del cemento. Adicional a lo anterior, Shi (2004) menciona, que las BFS exhiben propiedades cementantes. Con respecto al uso de BFS en proyectos de construcción, existen pocas preocupaciones ambientales, ya que los metales y componentes en dichas escorias están fuertemente adheridos a su matriz y no lixivian fácilmente.

Con respecto a la utilización de BFS en la producción de mezclas asfálticas muy pocos estudios han sido realizados en comparación con los otros usos reportados con anterioridad. Airey et al. [13] reportan, que al triturarse estos materiales producen un agregado con una textura superficial rugosa de alta porosidad que resulta en buenas características adhesivas con ligantes bituminosos. Sin embargo, estas propiedades contribuyen a necesitar mayores cantidades de bitumen para producir una mezcla asfáltica [5, 13]. De acuerdo con FHWA [5] esta mayor demanda de asfalto se encuentra por encima del 3% con respecto al óptimo cuando se emplean agregados convencionales, resultando en un incremento en el costo. A pesar de lo anterior, 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. Algunas conclusiones obtenidas por la FHWA [5] son: i) las capas de rodadura que utilizan BFS como agregados pétreos demuestran una buena resistencia a la fricción (debido a su forma angular generan un alto ángulo de fricción, entre 40° y 45°; [8]), buena resistencia al fenómeno de stripping, y alta estabilidad. Sin embargo, la resistencia al impacto no es muy alta y el material puede descomponerse en

condiciones de tráfico pesado. Por lo anterior, estos materiales como agregados son más adecuados para aplicaciones de superficie de tratamiento de pavimentos de tráfico bajo. ii) La variabilidad en el proceso de producción de hierro puede dar lugar a una falta de consistencia en las propiedades físicas (gradación, gravedad específica, absorción y angulosidad). iii) Aunque la resistencia al desgaste por abrasión de las escorias de alto horno en la máquina de Los Ángeles no es particularmente favorable (ya que los bordes afilados se rompen), el rendimiento de campo ha sido satisfactoria. Por tal razón, este ensayo ha sido eliminado de algunas especificaciones estándar para caracterizar escorias de alto horno. iv) Tienen buena afinidad con el asfalto, lo que ayuda a desarrollar una buena adherencia. v) 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. Un estado del conocimiento sobre el uso de escorias de alto horno en mezclas asfálticas puede ser consultado en Rondón-Quintana et al. [20].

Existen otros tipos de escorias que no deben ser confundidas con las de altos hornos. Tal vez unas de las más estudiadas sean la de acero (SS, por sus siglas en inglés). En comparación con las escorias BFS, las SS han sido más estudiadas y utilizadas. Lo anterior es debido tal vez a que las SS son más densas y resistentes a la abrasión y a cargas mecánicas que las BFS [13]. Adicionalmente, las SS han demostrado ser un buen reemplazo de agregados convencionales en la fabricación de mezclas asfálticas [19, 21-30]. Sin embargo, las BFS son volumétricamente más estables, ya que las SS contienen óxidos de calcio y magnesio que reaccionan con el agua produciendo expansión [13, 32].

Algunas investigaciones en el mundo se han ejecutado, con el fin de evaluar el uso de BFS en la producción de mezclas asfálticas. Sin embargo, la discusión sobre el tema aún no ha finalizado. Las escorias 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 [33-34]. Para dar un ejemplo, en la Figura 1 se presentan los dos tipos de partículas que predominan en la BFS, que se empleó en el presente estudio. Las partículas de la imagen izquierda son las que se presentan en mayor cantidad dentro del BFS (aproximadamente un 75% con respecto a la masa), 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 (NGA), a pesar que son mucho más porosas (p.e., en promedio, partículas de BFS y NGA de 1" de diámetro presentan en promedio masas de 32 y 35 g, respectivamente). 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 (en promedio cada partícula de 1" de diámetro presenta una masa aproximada de 9 g).



Figura 1. Partículas de escoria (tamaño entre $\frac{3}{4}$ " y 1" de diámetro)

En el presente estudio se intenta ayudar a que se profundice en la discusión de cómo utilizar las BFS como sustitutos de NGA en la fabricación de mezclas asfálticas. Para tal fin, inicialmente se realizó una fase de caracterización de los materiales granulares (BFS y NGA), para luego continuar con la fabricación de mezclas asfálticas sustituyendo parcialmente NGA por BFS. Se evaluó la resistencia bajo carga monotónica (ensayo Marshall – AASHTO T 245 y tracción indirecta – AASHTO T 283) de mezclas donde se sustituyó solamente la fracción gruesa del NGA por BFS (Figura 2, imagen izquierda), y en otras, la fracción fina (Figura 2, imagen derecha). Estas fases fueron ejecutadas con el fin de escoger la mezcla que experimenta mejor comportamiento bajo carga monotónica, y sobre ésta medir propiedades bajo carga cíclica (módulo resiliente - ASTM D7369 y resistencia a la deformación permanente – EN 12697-2000) y daño por humedad (AASHTO T 283). Como ligante para la

fabricación de las mezclas se utilizó cemento asfáltico CA 60-70, y como granulometría de referencia, la del concreto asfáltico MDC-19 [35], debido a que son el asfalto y el tipo de mezcla más utilizados en Colombia para la conformación de capas asfálticas.



Figura 2. Partículas de escoria (gruesos y finos)

2 Metodología

2.1 Caracterización de materiales

En las Tablas 2 y 3 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización ejecutados al agregado pétreo natural (NGA) y al asfalto CA 60-70, respectivamente. Estos materiales cumplen con los requisitos mínimos de calidad que exigen las especificaciones INVIAS [35] para la fabricación de mezclas de concreto asfáltico. La escoria BFS utilizada fue del tipo ACBFS (gruesa y fina), procedente de la empresa Acerías Paz del Río (Nobsa – Boyacá, Colombia). Sobre este material se hicieron los mismos ensayos que se especifican para NGA y los resultados se presentan en la Tabla 4. Adicionalmente para compactar la muestra para obtener el CBR (AASHTO T 193) se realizó previamente el ensayo Proctor (AASHTO T 180), obteniendo un peso unitario seco máximo de 16 kN/m³ y contenido óptimo de agua de 6% (la granulometría utilizada para este ensayo y el de CBR fue la de una subbase tipo SBG-38 de acuerdo a INVIAS [35]).

Tabla 2. Caracterización del agregado pétreo

Ensayo	Método	Resultado
Gravedad específica agregado de 1"/adsorción	AASHTO T 84-00	2.51/1.65%
Gravedad específica agregado de 1/2"/adsorción	AASHTO T 85-91	2.48/1.71%
Gravedad específica arenas y finos/adsorción		2.50/1.5%
Equivalente de arena	AASHTO T 176 – 02	76%
Caras fracturadas a una cara	ASTM D 5821-01	87%
Límites líquido y plástico	ASTM D 4318-00	0%
Índice de alargamiento	NLT 354-91	9.5%
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	9.5%
Ataque en sulfato de magnesio	ASTM C 88-99a	12.9%
Límites líquido y plástico	ASTM D 4318-00	0%
Micro-Deval	AASHTO T327-05	22.3%
10% de finos (resistencia en seco)	DNER-ME 096-98	115 kN
10% de finos (relación húmedo/seco)		83%
Resistencia en Máquina de los Ángeles	AASHTO T 96 – 02	24.6%



Tabla 3. Características generales del CA 60-70

Ensayo	Método	Unidad	Requisito		Valor
			Mínimo	Máximo	
Ensayos sobre el CA original					
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	60	60	62.5
Índice de penetración	NLT 181/88	-	-1.2	+0.6	-0.7
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	° C	48	54	52.5
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1500	-	1750
Gravedad específica	AASHTO T 228-04	-	-	-	1.012
Viscosidad a 135° C	AASHTO T-316	Pa-s	-	-	0.36
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100	-	>105
Ensayos sobre el residuo del CA luego del RTFOT					
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	-	0.8	0.47
Penetración (25°C, 100 g, 5 s), en porcentaje de la penetración original	ASTM D-5	%	50	-	72
Incremento en el punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	° C	-	9	5

Tabla 4. Caracterización de la escoria BFS

Ensayo	Método	Valor
Gravedad específica/absorción (3/4")		1.81/3.75%
Gravedad específica/absorción (3/8")		1.97/3.33%
Gravedad específica/absorción (No. 4)	AASHTO T 84-00	2.11/2.73%
Gravedad específica/absorción (No. 40)	AASHTO T 85-91	2.26/2.65%
Gravedad específica/absorción (No. 80)		2.36/2.25%
Gravedad específica/absorción (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	DNER-ME 096-98	123 kN
Caras fracturadas: 1 cara		92
Caras fracturadas: 2 caras	ASTM D 5821-01	88
Partículas planas y alargadas		1%
Contenido de impurezas	UNE 14613: 2000	0
Índice de plasticidad	ASTM D 4318-00	No plástico
Índice de aplanamiento		5.62%
Índice de alargamiento	NLT 354-91	10.62%
CBR (al 100% de densidad seca máxima y cuatro días de inmersión en agua)	AASHTO T 193-99	95.68%

Se observa en la Tabla 4, 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. 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, 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 de mezclas asfálticas, así como a resistir cargas estáticas, dinámicas o de impacto. Las partículas finas no presentan contenido de arcilla, materia orgánica o de



polvo que generen disminución de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, y disminución de resistencia y durabilidad de la mezcla por exceso de finos o contaminantes. El CBR reportado es alto indicando, en conjunto con los resultados anteriormente descritos, que las BFS pueden ser utilizadas como agregado pétreo para la conformación de bases y subbases granulares de pavimentos. Una mayor descripción de los resultados de caracterización de esta BFS puede ser consultados en Rondón-Quintana et al. [36-37] y Ruiz et al. [38].

2.2 Caracterización mineralógica, química y microestructura del filler

Con el fin de entender con mayor claridad, los resultados obtenidos, fue necesario ejecutar sobre la fracción que pasa el tamiz No. 200 de la BFS, ensayos de análisis basado en difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX). Asimismo, fue necesario ejecutar visualizaciones con microscopio electrónico de barrido (MEB) sobre las partículas de NGA y BFS. La descripción detallada de ejecución de los ensayos puede ser consultada en Zhang et al. [39]. En la Tabla 5 se presenta la composición mineralógica de la muestra de BFS analizada. Se observa, que el mineral predominante es el cuarzo (sílice - SiO_2). Este resultado es coherente con el reportado en el ensayo FRX (Tabla 6) en donde el componente químico predominante es la sílice (SiO_2). Se concluye adicionalmente, que la BFS analizada está compuesta predominantemente por sílice, óxido de calcio (CaO) y óxido de aluminio (86.76%).

Tabla 5. Porcentajes de minerales en la muestra BFS (ensayo DRX)

Mineral	%, en masa
Cuarzo	58.9
Cristobalita	18.1
Boehmita	12.8
Calcita	4.8
Natrolita	5.3

Tabla 6. Resultados de FRX para la muestra analizada de BFS

Elemento y/o compuesto químico	% en peso de la muestra
SiO_2	52.03
CaO	20.83
Al_2O_3	13.90
Fe_2O_3	6.52
MnO	2.26
TiO_2	0.98
K_2O	0.86
MgO	0.82
Na_2O	0.65
SO_3	0.48
Ba	0.21
Cr	0.12
Cl	0.08
P_2O_5	0.06
Ce	0.05
Zr	0.05
Sr	0.04
Cu	0.02

La preparación de las muestras de BFS y NGA para la prueba MEB fue realizada mediante una primera selección de diferentes partículas, con el fin de obtener un resultado estadísticamente confiable.



Para el caso de las BFS, las partículas escogidas fueron 5 de coloración verde, 3 de coloración negra, y 1 de coloración blanca (este último era escaso en la población analizada por lo que se seleccionó una única muestra). Las partículas de NGA fueron escogidas en siete grupos, las cuales presentaban características litológicas diferentes y no poseían características compartidas de tamaño, color y/o esfericidad. En la Tabla 7 se presenta la porosidad y la magnitud promedio de las gargantas porales (longitud del diámetro de los poros) medidas en las muestras. Se observa, que las partículas de BFS analizadas desarrollan mayor porosidad y abertura de poros que las de NGA, lo que hace que las primeras absorban mayor cantidad de asfalto. Adicionalmente, la relación entre el tamaño de las partículas de BFS y la absorción de asfalto debe ser directamente proporcional, ya que la mayor porosidad y garganta poral reportada en los ensayos generará un agregado pétreo grueso con menor gravedad específica, mayor absorción (tal como se reporta en la Tabla 4) y probabilidad de fracturarse bajo una carga mecánica.

Tabla 7. Valores de las porosidades calculadas

Tipo de partícula	Porosidad (%)	Garganta poral (μm)
NGA		
G1	0.6	6.0
G2	20.8	27.1
G3	13.9	10.4
G4	6.5	36.4
G5	2.3	11.0
G6	0.98	7.9
G7	0.86	7.8
BFS		
Verde	63	82.6
Negra	9	27.5
Blanca	50	30.3

2.3 Resistencia bajo carga monotónica de mezclas asfálticas

Luego de realizar los ensayos a los materiales, se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para porcentajes de asfalto de 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, empleando la granulometría que se presenta en la Tabla 8 y utilizando como agregado pétreo, material natural (NGA). La temperatura de compactación y de mezcla en el laboratorio de las muestras fue de 140° C y 150° C, respectivamente. Estos valores fueron obtenidos con base en el criterio establecido por la especificación ASTM D6925, en donde la viscosidad requerida para obtener las temperaturas de fabricación y de compactación de mezclas asfálticas en caliente del tipo denso son de 85±15 SSF (170 cP) y 140±15 SSF (280 cP), respectivamente. Sobre estas muestras (mezclas asfálticas de referencia, BFS/NGA=0%), se ejecutó el ensayo Marshall (AASHTO T 245). Este ensayo fue ejecutado adicionalmente, sobre muestras fabricadas con porcentajes de asfalto de 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5% y empleando BFS de la siguiente forma:

1. Sustitución (con respecto a la masa de los agregados) de la fracción gruesa.
 - a. BFS/NGA=12.5%. Se sustituyó el tamiz de ½”.
 - b. BFS/NGA=21%. Se sustituyeron los tamices ½” y 3/8”.
 - c. BFS/NGA=43%. Se sustituyeron los tamices ½”, 3/8” y No. 4.

2. Sustitución (con respecto a la masa de los agregados) de la fracción fina.
 - a. BFS/NGA=12.5%. Se sustituyó el fondo y el tamiz No. 200.
 - b. BFS/NGA=19.5%. Se sustituyó el fondo y los tamices No. 80 y No. 200.



- c. BFS/NGA=31%. Se sustituyeron los tamices No. 40, No. 80 y No. 200.
- d. BFS/NGA=37.5%. Se sustituyó el fondo y los tamices No. 40, No. 80 y No. 200.

Tabla 8. Granulometría mezcla tipo MDC-19 [35]

TAMIZ	TAMIZ [mm]	% PASA	% RETENIDO
3/4"	19.0	100.0	0.0
1/2"	12.5	87.5	12.5
3/8"	9.5	79.0	8.5
4	4.75	57.0	22.0
10	2.0	37.0	20.0
40	0.43	19.5	17.5
80	0.18	12.5	7.0
200	0.075	6.0	6.5
FONDO	-	0.0	6.0

Sobre la mezcla asfáltica de referencia (BFS/NGA=0%) y aquella con sustitución de NGA por BFS que desarrolló mejor comportamiento en el ensayo Marshall, se ejecutaron ensayos de tracción indirecta (AASHTO T 283). Tres muestras de cada mezcla fueron ensayadas bajo condición seca (D) y las otras tres en condición húmeda (W), con porcentajes de vacíos oscilando entre $7\pm 1\%$ como lo recomienda la especificación AASHTO T 283. Con los resultados del ensayo se calculó la resistencia al daño por humedad TSR mediante la relación W/D.

2.4 Caracterización dinámica de mezclas

Sobre la mezcla asfáltica de referencia (BFS/NGA=0%) y aquella con sustitución de NGA por BFS que desarrolló mejor comportamiento en el ensayo Marshall se ejecutaron ensayos de i) módulo resiliente (ASTM D 4123 – 82) bajo tres temperaturas (10, 20 y 30°C) y frecuencias de carga (2.5, 5.0 y 10.0 Hz) utilizando un equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT), ii) resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida bajo un esfuerzo de 100 kPa, temperatura de ensayo de 40° C y 3600 ciclos de carga siguiendo el procedimiento normalizado por EN 12697-22 (CEN, 2005).

3 Resultados y análisis

3.1 Resistencia bajo carga monotonica

En la Figura 3 se reportan los resultados del ensayo Marshall ejecutado sobre la mezcla asfáltica de referencia (BFS/NGA=0%) y las mezclas donde se sustituyó parte de la fracción gruesa del NGA por BFS. En términos generales se observa que:

1. Al sustituir la fracción gruesa del NGA por BFS incrementan los vacíos en la mezcla, y estos incrementos son mayores cuando aumenta el contenido de BFS. Lo anterior es debido a la alta porosidad y absorción que presentan las partículas gruesas de la BFS.
2. Para alcanzar una resistencia bajo carga monotonica (expresada a través de la relación entre la estabilidad - S y el flujo - F) similar con respecto a la de referencia (BFS/NGA=0%), las mezclas fabricadas mediante la sustitución de NGA por BFS deben ser fabricadas con un 0.5% más de asfalto, generando un incremento en el costo.
3. A pesar del incremento en el contenido de asfalto de 0.5%, las mezclas que emplean BFS aún experimentan altos contenido de vacíos (superiores a 8.5%).
4. No existe una tendencia clara del efecto de la sustitución de NGA por BFS en la relación S/F.

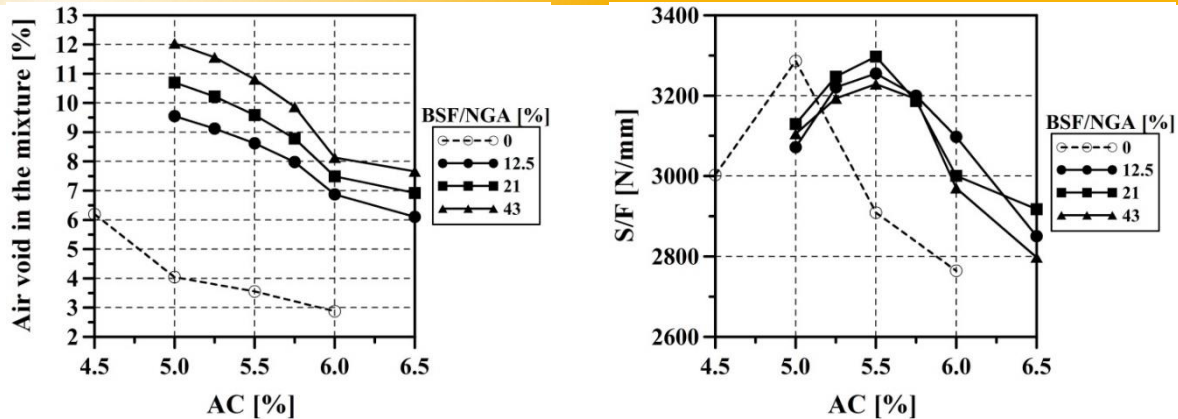


Figura 3. Ensayo Marshall. Reemplazo de la fracción gruesa de NGA por BFS

Para el caso de las mezclas donde se sustituyó la fracción fina del NGA por BFS, los resultados se presentan en la Figura 4. En términos generales se observa que:

1. Al igual que en la fracción gruesa, al sustituir la fracción fina del NGA por BFS incrementan los vacíos en la mezcla, y estos incrementos son mayores cuando aumenta el contenido de BFS. Sin embargo, los contenidos de vacíos que desarrollan las mezclas fabricadas con agregados finos de BFS son menores en comparación a aquellas fabricadas con la fracción gruesa, debido tal vez a que éstas últimas son más porosas y adsorben mayor cantidad de asfalto (presentan mayor absorción).
2. Cuando se sustituyen las partículas más finas de NGA por BFS en proporciones BFS/NGA=12.5% y 19.5%, la magnitud de la relación S/F es similar a la máxima alcanzada por la mezcla de referencia BFS/NGA=0% (contenido de asfalto de 5%). Lo anterior se logra, a pesar que la mezcla con BFS presenta mayor contenido de vacíos (aproximadamente entre 3% y 4% superior, respectivamente). Si se incrementa el contenido de asfalto en 0.25% y 0.5% (contenidos de asfalto de 5.25% y 5.5%), la resistencia bajo carga monotónica incrementa en 9.7% (320 N/mm) y 22.1% (726.3 N/mm), respectivamente, cuando se sustituye la fracción fina de la NGA en una proporción de BFS/NGA=12.5%. Para el caso de sustitución en una proporción de BFS/NGA=19.5% este incremento es de 8.9% (292.5 N/mm) y 15.2% (498.4 N/mm), respectivamente.
3. En síntesis, el mejor comportamiento de sustitución de NGA por BFS se alcanza cuando se sustituyen las partículas con tamaño igual o inferior a 0.075 mm (denominado filler [40]).

Por lo anterior, y teniendo en cuenta los resultados presentados en las Figuras 3 y 4 se escogieron, para la realización de los ensayos de tracción indirecta y caracterización dinámica, las mezclas que sustituyen la fracción fina de la NGA por BFS en proporciones de BFS/NGA=12.5% (filler) y 19.5%. Asimismo, se escoge un contenido de asfalto para ambas mezclas de 5.25% (no se escogió un contenido de asfalto más alto con el fin de no elevar ostensiblemente el costo de la mezcla). Para comparar, la mezcla de referencia (BFS/NGA=0%) en estos ensayos será aquella fabricada con un contenido de asfalto de 5%.

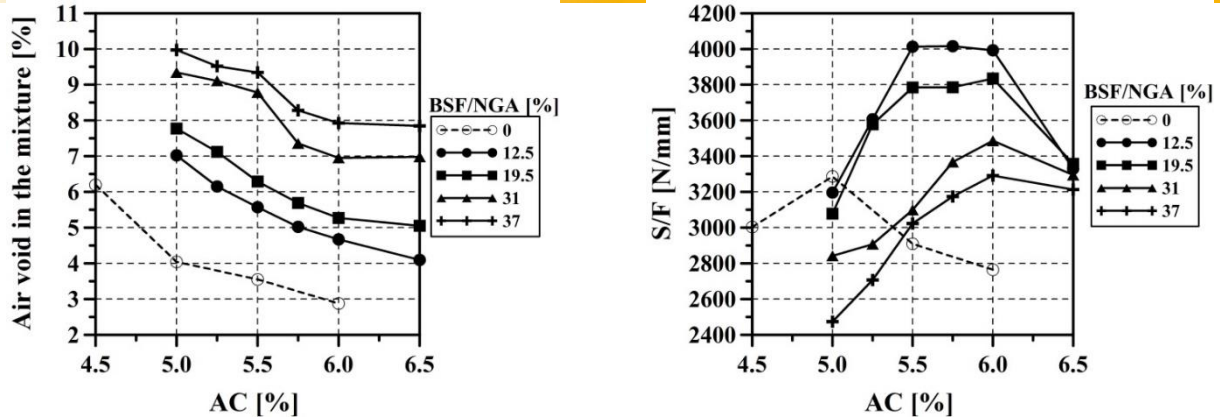


Figura 4. Ensayo Marshall. Reemplazo de la fracción fina de NGA por BFS

En la Tabla 9 se presentan los resultados del ensayo de tracción indirecta. Se observa, que las mezclas BFS/NGA=12.5% y 19.5% (CA=5.25%) desarrollan mayor resistencia a tracción indirecta (bajo condición seca y húmeda) y al daño por humedad (mayor TSR) con respecto a la de referencia (BFS/NGA=0%, CA=5%).

Tabla 9. Ensayo de tracción indirecta

Mezcla	Vacíos en la mezcla (%)	Método	Condición de la muestra		TSR (W/S) (%)
			Seca - S (kPa)	Sumergida - W (kPa)	
MDC-19 (BFS/NGA=0%)	7.2	AASHTO T 283-03	3184	2388	75.0%
MDC-19 (BFS/NGA=12.5%)	7.3		3301	2657	80.5%
MDC-19 (BFS/NGA=19.5%)	6.9		3220	2492	77.4%

3.2 Módulo resiliente y deformación permanente

Los resultados de los ensayos de módulo resiliente se presentan en la Figura 5. Se observa, que las mezclas BFS/NGA=12.5% y 19.5% tienden a experimentar mayor rigidez bajo carga cíclica que la de referencia BFS/NGA=0%. La mayor rigidez la desarrolla la mezcla que sustituye la fracción fina de NGA en una proporción de BFS/NGA=12.5% (partículas con tamaño igual o inferior a 0.075 mm). Esta mezcla experimenta en promedio una rigidez superior, con respecto a la de referencia, de 24, 25 y 75% para temperaturas de ensayo de 10, 20 y 30° C, respectivamente. Para el caso de la mezcla BFS/NGA=19.5% este incremento promedio en rigidez varía en 16, 3 y 31%, respectivamente.

Los resultados de deformación permanente se presentan en la Figura 6. Se observa, que la mayor resistencia a la deformación permanente bajo carga cíclica la experimenta la mezcla que sustituye la fracción fina de NGA en una proporción de BFS/NGA=12.5%. Este resultado es coherente con aquellos obtenidos en la Figura 5 para el caso del módulo resiliente. Sin embargo, para el caso de la mezcla BFS/NGA=19.5% la acumulación de la deformación permanente es similar con respecto a la de referencia.

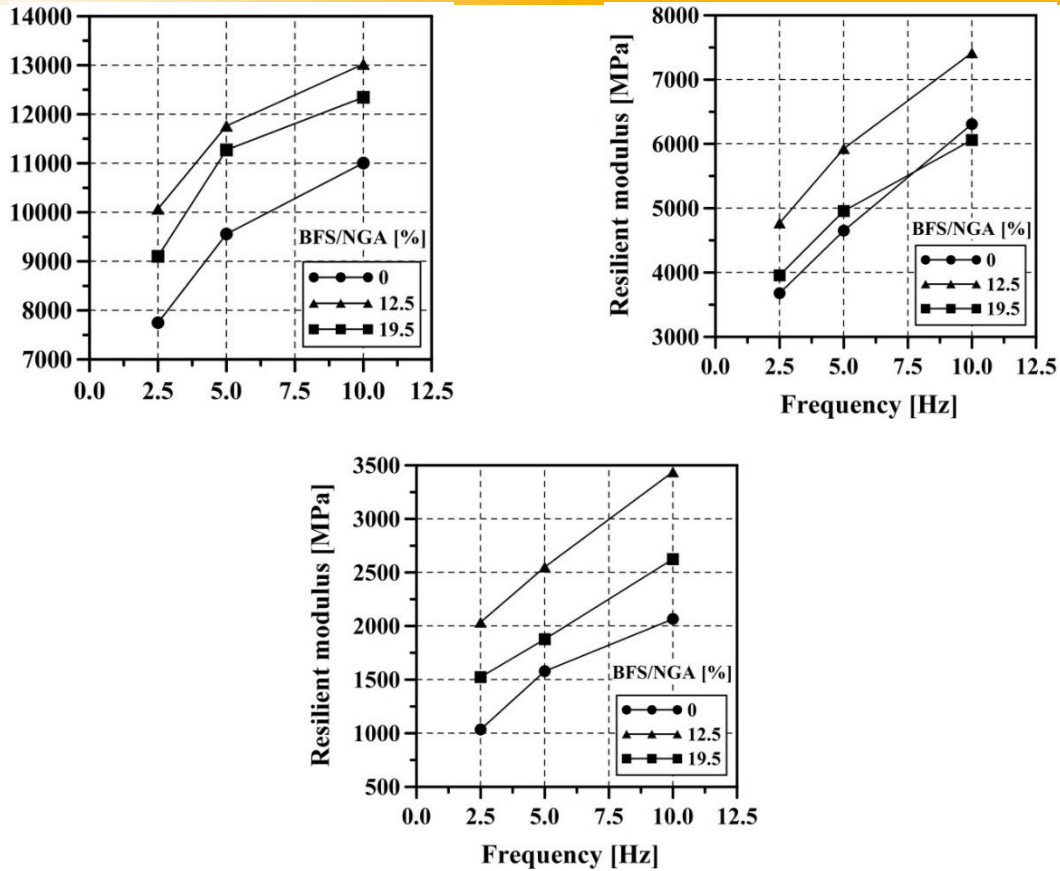


Figura 5. Módulo resiliente mezcla MDC-19. a) 10° C, b) 20° C, c) 30° C

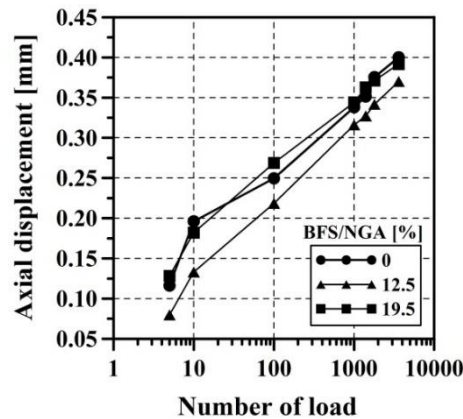


Figura 6. Deformación permanente.

4 Discusión

El mejor comportamiento lo experimenta la mezcla que sustituye el filler de NGA por BFS. El filler de BFS se compone principalmente de SiO_2 , CaO y Al_2O_3 . El SiO_2 y el Al_2O_3 son compuestos puzolánicos, los cuales en tamaños de partículas muy finas pueden desarrollar propiedades auto-cementantes (no necesitan ser activadas con agua o cal) [41]. Esta propiedad puzolánica puede incrementar la resistencia al daño por humedad de mezclas asfálticas [42]. Asimismo, estos dos materiales pueden mejorar la adhesión superficial asfalto-agregado y la cohesión interna del asfalto



[43]. De acuerdo con Anderson y Goetz [44], Muniandy et al. [45], Modarres y Rahmanzadeh [43], el CaO es una composición alcalina que contribuye a aumentar la adhesión agregado-asfalto, y mejora la resistencia de las mezclas al daño por humedad y stripping. Muniandy et al. (2013) reporta, que el SiO₂ es un material de alta dureza y resistencia mecánica, y el Al₂O₃ puede mejorar la adherencia entre el agregado y el asfalto, incrementando la resistencia de las mezclas al ahuellamiento.

Es decir, la tendencia del uso de BFS como filler es proveer mayor cohesión (asociado principalmente a la resistencia a la fractura [46] y al corte [47]) y adhesión (asociado a la capacidad de permanecer unidos el ligante y el agregado pétreo [48]), cuando se mezcla con el asfalto, generando un mastic [49] que ayuda a incrementar la rigidez de la mezcla asfáltica. Sin embargo, para poder aseverar con mayor argumentación esta posición se debe ejecutar a futuro otra fase experimental, ya que el comportamiento de este mastic es dependiente de las propiedades físicas, geométricas, mineralógicas y químicas del filler [50], y esta dependencia no es lo suficientemente clara aún en el presente estudio. Adicionalmente, el filler o el mastic influyen de manera directa sobre la compactabilidad y trabajabilidad de las mezclas, su rigidez, resistencia a fractura, a las deformaciones permanentes, al envejecimiento, al daño por humedad [42-43, 51-52], y también influye en la respuesta reológica [53]. Es importante resaltar, que en la literatura consultada no se reportan estudios donde se evalúe el efecto del uso de BFS como filler sobre las propiedades del mastic.

5 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir:

La mayor resistencia bajo carga monótonica, cíclica y al daño por humedad, la desarrolla la mezcla que sustituye el filler de NGA por BFS. Lo anterior tal vez es debido a que el asfalto que se adhiere al filler (compuesto por BFS) genera un mastic con mejores propiedades de cohesión y adherencia, en comparación a aquel filler compuesto por NGA. Para obtener estas mayores resistencias, se debe aumentar en tan solo 0.25% el contenido de asfalto en la mezcla, logrando un incremento en la relación S/F de 320 N/mm y en la resistencia a tracción indirecta seca y húmeda de 117 y 269 kPa, respectivamente, con respecto a la mezcla de referencia (sin sustitución de filler por BFS). Asimismo, se alcanza un aumento del módulo resiliente de 24, 25 y 75% para temperaturas de ensayo de 10, 20 y 30° C, lo que redundará en un incremento en la resistencia a la deformación permanente.

Entre mayor sea el tamaño de las partículas que se sustituyan de NGA por BFS: i) la mezcla incrementa en vacíos con aire, ii) hay necesidad de incrementar el contenido de asfalto (incluso en el caso de las más gruesas sin generar mejoras en la resistencia de la mezcla), iii) disminuye la resistencia mecánica bajo carga monótonica. Lo anterior debido a que entre mayor sea el tamaño de las partículas de la BFS, mayor es su porosidad y adsorción. Adicionalmente, en comparación con las NGA, la fracción gruesa de las BFS desarrolla mayor porosidad, menor resistencia al desgaste por abrasión y por impacto, lo que genera un agregado pétreo más propenso al fracturamiento.

6 Referencias

- [1] Shen, H. & Forsberg, E. (2003). An overview of recovery of metals from slags. *Waste Management*, 23, 933-949.
- [2] 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, 40-57.
- [3] Byers, C.C., Saleh, M.F. & Pidwerbesky, B.D. (2004). Evaluation of melter slag as a base course material. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(4), 193-199.
- [4] León, N.A., Rojas, N.R., Suárez, B.U. & Bustamante, O. (2009). Experimental evaluation of silicon - calcareous units from blast furnace slag and hydraulic lime for masonry. *Dyna*, 76(160), 247-254.
- [5] FHWA - Federal Highway Administration Research and Technology. (2008). *Coordinating, Developing, and Delivering Highway Transportation Innovations*. "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction". Report Publication Number: FHWA-RD-97-148.
- [6] 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.



- [7] NSA, National Slag Association. <http://nationalslag.org/blast-furnace-slag>, consulted in april of 2016.
- [8] Van Oss, H.G. (2003). *Slag-Iron and Steel*. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 69.1-69.7.
- [9] Emery, J.J. (1982). *Slag Utilization in pavement construction*. In: Extending aggregate resources: a symposium sponsored by ASTM Committee D-4 on Road and Paving Materials, Orlando, USA.
- [10] Jones, D.E. (1982). *Application of Steel Plant By-Products to Roadworks*. Proceedings — Conference of the Australian Road Research Board, 11, 11th ARRB Conference.
- [11] 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), 803-806.
- [12] 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.
- [13] Airey, G.D., Collop, A.C. & Thom, N.H. (2004). *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).
- [14] 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.
- [15] Geiseler, J. (1996). Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management*, 16(1-3), 59-63.
- [16] Houben, L.J.M., Akbarnejad, S. & Molenaar, A.A.A. (2010). *Performance of pavements with blast furnace base courses*. In: GeoShanghai 2010 International Conference, Paving Materials and Pavement Analysis, Geotechnical Special Publication No. 203, 476-483.
- [17] Shi, C. (2004). Steel slag—Its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236.
- [18] 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.
- [19] Sorlini, S., Sanzeni, A. & Rondi, L. (2012). Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 209–210, 84-91.
- [20] Rondón-Quintana, H.A., Reyes, F.A. & Muniz de Farias, M. (2018). Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(33), 71-97.
- [21] Wen, H., Wu, E. & Bhusal, S. (2014). *Evaluation of steel slag as hot mix asphalt aggregate*. Final report, Edw. C. Levy Co. and Nucor Steel Seattle, Inc., Seattle, WA.
- [22] Wu, S., Xue, Y., Ye, Q. & Chen, Y. (2007). Utilization of steel slag as an aggregate for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environmental*, 42, 2580–2585.
- [23] Xue, Y., Wu, S., Hou, H. & Zha, J. (2006). Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. *Journal of Hazardous Materials*, B138, 261–268.
- [24] Asi, I.M., Qasrawi, H.Y. & Shalabi, F.I. (2007). Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34, 902–911.
- [25] Ameri, M. & Behnood, A. (2012). Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates. *Construction and Building Materials*, 26, 475–480.
- [26] Ahmedzade, P. & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165, 300–305.
- [27] Chen, S.-H., Lin, J.-D., Huang, D. & Hung, C.-T. (2014). Performance of replacing traditional natural aggregates in dense grade asphalt concrete with basic oxygen furnace slag. *Advanced Characterization of Asphalt and Concrete Materials GSP*, ASCE, 107-114.
- [28] Kök, B.V. & Kuloğlu, N. (2008). Effects of steel slag usage as aggregate on indirect tensile and creep modulus of hot mix asphalt. *G. U. Journal of Science*, 21(3), 97-103.
- [29] Oluwasola, E.A., Hainin, M.R. & Aziz, M.M.A. (2015). Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*, 2, 47–55.



- [30] 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, 938–948.
- [31] Pasetto, M. & Baldo, N. (2011). Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25, 3458–3468.
- [32] Wang, G., Wang, Y. & Gao, Z. (2010). Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. *Journal of Hazardous Materials*, 184, 555–560.
- [33] 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.
- [34] Rondón-Quintana, H.A., Ruge, J.C. & Muniz de Farias, M. (2019). Behavior of a hot mix asphalt containing blast furnace slag as aggregate: Evaluation by mass and volume substitution. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 04018364.
- [35] Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2022). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C., Colombia.
- [36] Rondón-Quintana, H.A., Ruge, J.C., Patiño, D., Vacca, H., Reyes, F.A. & Muniz De Farias, M. (2018a). Blast furnace slag as a substitute for the fine fraction of aggregates in an asphalt mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018244.
- [37] Rondón-Quintana, H.A., Fernández, W.D., Ruge, J.C., Patiño, D., Vacca, H. & Reyes, F.A. (2018b). Characterization of blast furnace slag for road projects. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, 33(1), 83–92.
- [38] Ruiz, J.F., Rondón-Quintana, H.A. & Chavez, S. (2020). Behavior of a warm mix asphalt containing a blast furnace slag. *International Journal of Civil Engineering*, 18, 325–334.
- [39] 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.
- [40] Bastidas, J., Rondón-Quintana, H.A. & Muniz de Farias, M. (2021). Behavior of asphalt mastics containing different materials as Filler. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48, 347– 355.
- [41] Misra, A., Biswas, D. & Upadhyaya, S. (2005). Physico-mechanical behavior of selfcementing class C fly ash–clay mixtures. *Fuel*, 84(11), 1410–22.
- [42] Nassar, A.I., Mohammedb, M.K., Thom, N. and 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.
- [43] Modarres, A. & Rahmzadeh, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 66, 476–483.
- [44] Anderson, D.A. & Goetz, W.H. (1973). Mechanical behavior and reinforcement of mineral filler-asphalt mixtures. *Proc Assoc Asphalt Pav Technol.*, 42, 37–66.
- [45] 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.
- [46] Veytskin, Y., Bobko, C., Castorena, C. & Kim, R. (2015). Nanoindentation investigation of asphalt binder and mastic cohesion. *Construction and Building Materials*, 100, 163–171.
- [47] Liao, M.C. & Chen, J.S. (2011). Zero shear viscosity of bitumen-filler mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12), 1672–1680.
- [48] Dan, L., Chuanfeng, Z., Yong, Q., Heng, B., Keyao, L. & Junfei, H. (2014). Analysing the effects of the mesoscopic characteristics of mineral powder fillers on the cohesive strength of asphalt mortars at low temperatures. *Construction and Building Materials*, 65, 330–337.
- [49] Tenza-Abril, A.J., Saval, J.M. & Cuenca, A. (2015). Using sewage-sludge ash as filler in bituminous mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 04014141.
- [50] Cheng, Y., Tao, J., Jiao, Y., Tan, G., Guo, Q., Wang, S. & Ni, P. (2016). Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 118, 268–275.
- [51] Davis, C. & Castorena, C. (2015). Implications of physico–chemical interactions in asphalt mastics on asphalt microstructure. *Construction and Building Materials*, 94, 83–89.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.



XII CONSEJO DIRECTIVO
AMAAC
LA FUERZA DE LA UNIÓN

- [52] Kuity, A. & Das, A. (2015). Homogeneity of filler distribution within asphalt mix – A microscopic study. *Construction and Building Materials*, 95, 497–505.
- [53] Yiqiu, T., Xiaolin, L. & Jiantao, W. (2012). Internal influence factors of asphalt-aggregate filler interactions based on rheological characteristics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(12), 1520-1528.