

USO DE UNA ESCORIA DE ALTO HORNO COMO AGREGADO PÉTREO EN UNA MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO

Hugo Alexander Rondón Quintana¹, Juan Carlos Ruge Cárdenas², Márcio Muniz de Farias³

¹Profesor Titular, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Carrera 5 Este N° 15-82, sede El Claustro, Bogotá D.C., Colombia, harondong@udistrital.edu.co,

²Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11 101-80, Bogotá D.C., Colombia,

³Profesor Titular, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília - UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF, CEP 70910-900, Brasil

RESUMEN

En proyectos de construcción, mantenimiento y rehabilitación de vías donde se emplean grandes cantidades de agregados de origen natural, un material alternativo que puede ser utilizado como sustituto de dichos agregados en la fabricación de mezclas de concreto asfáltico son las escorias de alto horno (EAH). Su empleo entonces, puede ser visto como una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable. En el presente estudio se ejecutó una fase experimental que estudió el efecto que causa, sobre la resistencia bajo carga monotónica y dinámica de una mezcla de concreto asfáltico, sustituir en volumen la fracción gruesa de un agregado pétreo natural calcáreo por una EAH. Como ligante asfáltico para la fabricación de la mezcla de control se empleó cemento asfáltico CA 50/70 y la granulometría empleada fue acorde a la especificada por la norma brasileira DNIT [1] (mezcla tipo C y tamaño máximo de partícula de 19,5 mm). Para medir la resistencia bajo carga monotónica se ejecutaron ensayos Marshall y tracción indirecta, y bajo carga dinámica se realizaron ensayos de módulo resiliente y deformación permanente. Con los resultados obtenidos se concluye, que la mezcla fabricada con EAH experimentó una mejor respuesta en los ensayos realizados en comparación con la mezcla de control.

Palabras claves: escoria de alto horno, concreto asfáltico, resistencia bajo carga monotónica, módulo resiliente, deformación permanente.

USE OF BLAST FURNACE SLAG AS A STONE AGGREGATE IN AN ASPHALT CONCRETE MIX

ABSTRACT

In road construction, maintenance and rehabilitation projects where large amounts of aggregates of natural origin are used, an alternative material that can be used as a substitute for said aggregates in the manufacture of asphalt concrete mixtures is blast furnace slag (BFS). Its use, then, can be seen as a technically, economically and environmentally viable alternative. In the present study, an experimental phase was carried out that studied the effect that, on the resistance under monotonic and dynamic load of an asphalt concrete mixture, replacing in volume the coarse fraction of a calcareous natural stone aggregate by an BFS. Asphalt binder for the manufacture of the control mixture was used asphalt cement CA 50/70 and the granulometry used was according to that specified by the Brazilian standard DNIT (mixture type C and maximum particle size of 19.5 mm). For resistance under monotonic Marshall tests and indirect measurement were performed, and under dynamic load tests of resilient modulus and permanent deformation were performed. With the results obtained, it is concluded that the mixture made with BFS experienced a better response in the tests carried out compared to the control mixture.

Keywords: blast furnace slag, asphalt concrete, resistance under monotonic load, resilient modulus, permanent set.

Nota Editorial: Recibido: noviembre 2019; Aceptado: marzo 2020

1. INTRODUCCIÓN

Las escorias pueden ser ferrosas como las de alto horno (EAH), no ferrosas y producidas por incineración [2]. En la Tabla 1 se presenta la composición química típica de EAH [3]. Este material se forma cuando el hierro, el coque y un fundente tipo piedra caliza o dolomita se combinan en un alto horno [4, 5]. Las EAH pueden ser enfriadas lentamente al aire libre (ACBFS, Air-Cooled Blast Furnace Slag, utilizadas principalmente en la construcción como

agregado pétreo) o rápidamente aplicándoles chorros de agua fría (denominadas escorias expandidas, usadas principalmente en la producción de cemento) [6].

Tabla 1: Composición química de escorias de alto horno

Componente	[7]	[8]	[9]	[10]
CaO [%]	36-45	40	43,3	20,8
SiO ₂ [%]	33-42	36,8	25,5	52,0
Al ₂ O ₃ [%]	10-16	16	17	13,9
P [%]	-	-	2,3	-
MgO [%]	3-16	5,4	1,45	0,8
Na ₂ O [%]	-	-	1.4	0.7
S [%]	1-3	0,4	1	-
FeO [%]	0,3-0,2	0,2	-	-
Fe [%]	-	-	0,5	-
Fe ₂ O ₃ [%]	-	-	0,71	6,5
MnO [%]	0,2-1,5	0,5	-	2,3
TiO ₂ [%]	-	0,3	-	1,0
K ₂ O [%]	-	0,4	0,14	0,9
SO ₃ [%]	-	-	-	0,5

Anualmente, se producen cerca de 13, 24,3 y 4 millones de toneladas de EAH en USA, Japón y Reino Unido, respectivamente [11-13]. Tradicionalmente este material de desecho es eliminado en escombreras, generando un problema ambiental (ocupan espacios en los rellenos sanitarios y liberan contaminantes al medio ambiente) [14]. Estos materiales han sido utilizados por muchos años como fertilizantes [15], en la construcción de carreteras [16], en la fabricación de vidrio para cerámica, ladrillos, entre otros [17] y en la producción de cemento [17-20].

Algunas ventajas reportadas en la literatura de referencia con respecto al empleo de EAH son [4, 12, 20]: i) generan agregados con textura superficial rugosa que proporcionan buenas propiedades adhesivas con asfaltos; ii) poseen alta fricción debido a su forma angular; iii) con estos materiales se pueden producir mezclas con buena resistencia al daño por humedad; iv) presenta buena afinidad con el asfalto. A pesar de lo anterior, también se reportan algunas desventajas: i) por su alta porosidad consumen mayores cantidades de asfalto y puede ser necesario un tiempo de secado más largo en plantas de producción de mezclas asfálticas, incrementado el costo; ii) generalmente, la resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles es baja; iii) es un material de alta heterogeneidad en sus propiedades físicas.

Las EAH no deben ser confundidas con otros tipos como las de acero o las de cobre. Para el caso de mezclas asfálticas, las más utilizadas y estudiadas han sido las de acero. Lo anterior es debido a que estas últimas son más densas y resistentes a la abrasión y a cargas mecánicas [20, 22-23]. Sin embargo, una limitación de las escorias de acero es su alto contenido de óxidos de calcio y magnesio que reaccionan con el agua produciendo expansión [24]. Un estado del conocimiento sobre el uso de escorias EAH y de acero en mezclas asfálticas es reportado en [25].

Múltiples estudios a nivel mundial han sido realizados con el objeto de evaluar el uso de EAH en mezclas asfálticas. Sin embargo, estos materiales son altamente heterogéneos (formas y tamaños de partículas, composición química, textura, gravedad específica (peso específico), resistencia al desgaste y porosidad, entre otros) y por tal razón desarrollan propiedades complejas [26]. En el presente estudio se profundiza en la discusión de cómo emplear las EAH como sustitutos en volumen de agregado pétreos naturales para la fabricación de mezclas asfálticas. Tradicionalmente la sustitución se realiza por masa, ya que es más simple y práctico. Sin embargo, la baja gravedad específica de las EAH hace que el tratamiento y estudio del empleo de estos materiales como sustitutos de agregados naturales deba ejecutarse por volumen. Por tal motivo, inicialmente se realizó una fase de caracterización de los materiales empleados (asfalto, agregado y EAH), para luego continuar con la fabricación de mezclas asfálticas sustituyendo parcial (fracción gruesa) y totalmente en volumen los pétreos naturales de origen calcáreo por EAH. Sobre estas mezclas, se evaluó la resistencia bajo carga monotónica (ensayo Marshall – AASHTO T 245 y tracción indirecta – AASHTO T 283) y dinámica (módulo resiliente - ASTM D 4123 y deformación permanente mediante ensayo de creep estático - NCHRP 465:02). Como ligante se utilizó cemento asfáltico CA 50-70, y como granulometría de referencia, la del concreto asfáltico tipo C de acuerdo con la especificación brasileña del Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes – DNIT [1].

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el agregado de origen calcáreo y la EAH del tipo ACBFS utilizados (proveniente de ArcelorMittal en Brasil). En las Tablas 2-4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización ejecutados sobre los materiales utilizados. Todos los materiales cumplen los requisitos mínimos de calidad que exige la especificación [1] para la fabricación de mezclas de concreto asfáltico.

El material calcáreo presenta una superficie de baja adsorción (con textura visual y táctil lisa), una alta resistencia al desgaste por abrasión y forma laminar con alta presencia de partículas alargadas y/o aplanadas.

La EAH presenta una buena resistencia al desgaste por abrasión. 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 genere 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. Por último, se observa que, al disminuir el tamaño de las partículas, incrementa la gravedad específica, y es un material que presenta una alta absorción debido principalmente a su alta porosidad superficial la cual puede observarse visualmente (ver Figura 1b).

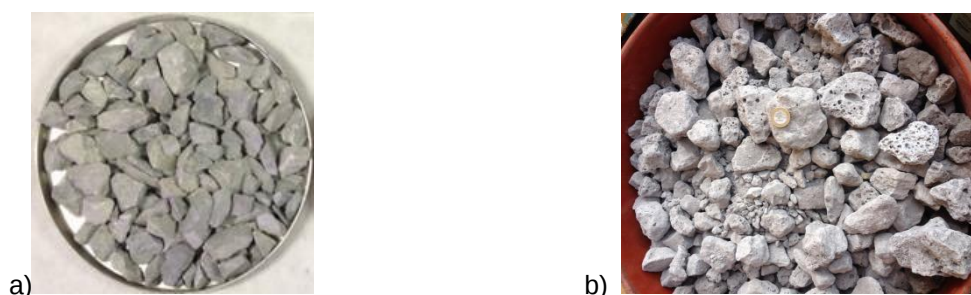


Figura 1: Partículas de a) agregado calcáreo, b) EAH

Tabla 2: Caracterización del agregado pétreo natural de origen calcáreo

Ensayo	Método	Resultado
Gravedad específica agregado grueso//adsorción	AASHTO T 84-00	2,679//0,80%
Gravedad específica arenas y finos//adsorción	AASHTO T 85-91	2,757//0,71%
Caras fracturadas a una cara	ASTM D 5821-01	82%
Índice de plasticidad	ASTM D 4318-00	No plástico
Partículas planas y alargadas	ASTM D 4791-99	17,6%
Resistencia en máquina de Los Ángeles	AASHTO T 96-02	15,4%

Tabla 3: Características generales del CA 50-70

Ensayo	Método	Unidad	Valor
Ensayos sobre el CA original			
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	60,6
Índice de penetración	NLT 181/88	-	-0,18
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	° C	52,3
Gravedad específica	AASHTO T 228-04	-	1,022
Viscosidad a 135° C	AASHTO T-316	cP	337
Viscosidad a 150° C	AASHTO T-316	cP	177
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>100
Punto de inflamación	AASHTO T 48-04	° C	338
Ensayos sobre el residuo del CA luego del RTFOT			
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0,042
Penetración (25°C, 100 g, 5 s), en porcentaje de la penetración original	ASTM D-5	%	81
Incremento en el punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	° C	8

Tabla 4: Caracterización de la EAH

Ensayo	Método	Valor
Gravedad específica/absorción (1/2")	AASHTO T 84-00 AASHTO T 85-91	2,274/4,84%
Gravedad específica/absorción (3/8")		2,346/4,67%
Gravedad específica/absorción (No. 4)		2,389/5,57%
Gravedad específica/absorción (No. 40)		2,640/4,18%
Gravedad específica/absorción (No. 80)		2,633/4,33%
Gravedad específica/absorción (No. 200)		2,643/4,38%
Resistencia en la máquina de Los Ángeles, 500 revoluciones	AASHTO T 96-02	25,4%
Caras fracturadas: 1 cara	ASTM D 5821-01	94%
Índice de plasticidad	ASTM D 4318-00	No plástico
Partículas planas y alargadas	ASTM D 4791-99	4,2%

Resistencia bajo carga monotónica de mezclas asfálticas

Ensayos Marshall y Tracción Indirecta

Para obtener el contenido óptimo de asfalto de la mezcla de control (EAH=0%), se fabricaron cinco briquetas Marshall (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 4,0%, 4,5%, 5,0% y 5,5%, empleando la granulometría que se presenta en las Tablas 5, y utilizando como agregado pétreo el calcáreo. La temperatura de compactación y de mezcla en el laboratorio de las muestras fue de $145 \pm 5^\circ \text{C}$ y $150 \pm 5^\circ \text{C}$, 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 $85 \pm 15 \text{ sSF}$ (170 cP) y $140 \pm 15 \text{ sSF}$ (280 cP), respectivamente. Sobre estas muestras (mezclas asfálticas de control, EAH=0%), se ejecutó el ensayo Marshall (AASHTO T 245). Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 6. Con base en los resultados, el contenido óptimo de asfalto fue de 4,5%.

Tabla 5: Granulometría mezcla tipo C (DNIT 031/2006)

Tamiz	Tamiz (mm)	%Pasa	%Retenido
3/4"	19,0	100	0,0
1/2"	12,5	90	10
3/8"	9,5	80	10
4	4,75	58	22
10	2,0	36	22
40	0,43	17	19
80	0,18	10	7
200	0,075	4	6
Fondo	-	0	4

Tabla 6: Resultados del diseño Marshall mezcla de control (EAH=0%)

CA (%)	Densidad bulk (g/cm ³)	Vacíos con aire (%)	Vacíos en agregados (%)	Estabilidad - E (kN)	Flujo - F (mm)	E/F (kN/mm)
4,0	2,410	5,23	14,70	13,73	3,58	3,84
4,5	2,424	4,22	14,90	14,82	3,43	4,32
5,0	2,433	2,86	14,81	12,98	3,80	3,42
5,5	2,428	1,75	14,94	11,83	4,30	2,75

Luego de obtener el óptimo de asfalto se ejecutó nuevamente el ensayo Marshall sobre muestras fabricadas con dicho porcentaje (4,5%), y sustituyendo la fracción gruesa del material calcáreo por EAH. Tal como se mencionó con anterioridad, la sustitución se realizó por volumen. Por lo anterior, teniendo en cuenta las gravedades específicas de ambos materiales, se realizó la sustitución de la siguiente forma (ver Tabla 7):

- EAH=8,6%. Se sustituyó el material retenido en el tamiz de $\frac{1}{2}$ " y pasando el tamiz de $\frac{3}{4}$ ".

- b. EAH=17,74%. Se sustituyeron los materiales retenidos en los tamices ½" y 3/8".
- c. EAH=38,86%. Se sustituyeron los materiales retenidos en los tamices ½", 3/8" y No. 4.
- d. EAH=61,66%. Se sustituyeron los materiales retenidos en los tamices ½", 3/8", No. 4 y No. 10.
- e. Sustitución total del calcáreo por EAH (EAH=100%).

Es importante resaltar, que a pesar que la dosificación fue realizada por volumen, para facilitar la interpretación de los resultados, los porcentajes que se reportan de EAH están denotados con respecto a la masa de los agregados (ver Tabla 7).

Tabla 7: Sustitución de material calcáreo por EAH

Tamiz (mm)	%Pasa	%Retenido	EAH=0%	EAH=8,6%	EAH=17,74%	EAH=38,86%	EAH=61,66%	EAH=100%
1/2" (12,5)	90	10	114,6	97,3	97,3	97,3	97,3	97,3
3/8" (9,5)	80	10	114,6	114,6	100,4	100,4	100,4	100,4
4 (4,75)	58	22	252,1	252,1	252,1	224,9	224,9	224,9
10 (2,0)	36	22	252,1	252,1	252,1	252,1	241,0	241,0
40 (0,425)	17	19	217,7	217,7	217,7	217,7	217,7	208,1
80 (0,18)	10	7	80,2	80,2	80,2	80,2	80,2	76,7
200 (0,075)	4	6	68,8	68,8	68,8	68,8	68,8	65,7
Fondo	0	4	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	43,8

Sobre las anteriores mezclas denotadas se ejecutó adicionalmente el ensayo de tracción indirecta siguiendo los lineamientos establecidos por la AASHTO T 283. Tres muestras de cada mezcla fueron ensayadas bajo condición seca (S) y las otras tres en condición húmeda (H) o sumergida en agua. Para humedecer e intentar saturar las muestras, las mismas fueron sometidas a un baño de María bajo una temperatura de 25 °C durante un mes. Con los resultados del ensayo se calculó la resistencia al daño por humedad TSR (Tensile Strength Ratio) mediante la relación S/H.

Caracterización dinámica

Módulo resiliente y deformación permanente

El ensayo de módulo resiliente fue ejecutado siguiendo los lineamientos establecidos por la ASTM D4123. Las muestras empleadas fueron del tipo Marshall, la temperatura de ensayo fue de 25°C y se aplicó una frecuencia de carga de 1 Hz (onda tipo haversine con tiempo de aplicación de carga de 0,1 s y reposo de 0,9 s). El ensayo de deformación permanente fue del tipo creep estático y se siguieron los lineamientos establecidos en la especificación NCHRP 465:02. La magnitud de carga utilizada fue de 100 kPa, y al igual que el ensayo de módulo resiliente, se utilizó una frecuencia de 1 Hz y temperatura de 25°C. Tanto el módulo resiliente como la acumulación de la deformación permanente fueron calculados tomando el promedio obtenido de ensayar tres muestras por cada mezcla evaluada y empleando un equipo triaxial.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Ensayo Marshall

En la Figura 2 se reportan los resultados del ensayo Marshall. En términos generales se observa que:

Al sustituir las fracciones gruesas del material calcáreo por EAH incrementan los vacíos en la mezcla, y estos incrementos son mayores cuando aumenta el contenido de EAH (ver Figura 2a). Lo anterior es debido a la mayor porosidad y absorción que presentan las partículas de EAH.

A pesar de lo anterior, la mayor resistencia bajo carga monotónica en el ensayo Marshall (expresada a través de la relación entre la estabilidad - E y el flujo - F) se obtiene cuando se sustituye la totalidad del agregado calcáreo por EAH (EAH=100%). En este caso, la relación E/F es 2,46 veces mayor con respecto a la mezcla de referencia (EAH=0%) (ver Figura 2b).

La relación E/F incrementa ostensiblemente a medida que aumenta la sustitución de agregado calcáreo por EAH. Para EAH=8,6, 17,74, 38,86 y 61,66%, la relación E/F incrementa en 12,4; 34,3; 64,7 y 94,3% respectivamente, con respecto a la mezcla de referencia (EAH=0%). Esto es tal vez debido a la mayor textura rugosa superficial y mejor forma de las partículas de las EAH en comparación con el agregado calcáreo. Adicionalmente pudo ser

debido a una mejor interacción con el asfalto, sin embargo, este argumento no se puede validar hasta no realizar ensayos de adherencia y evaluar la composición química y micro-estructural de los pétreos (calcáreo y EAH).

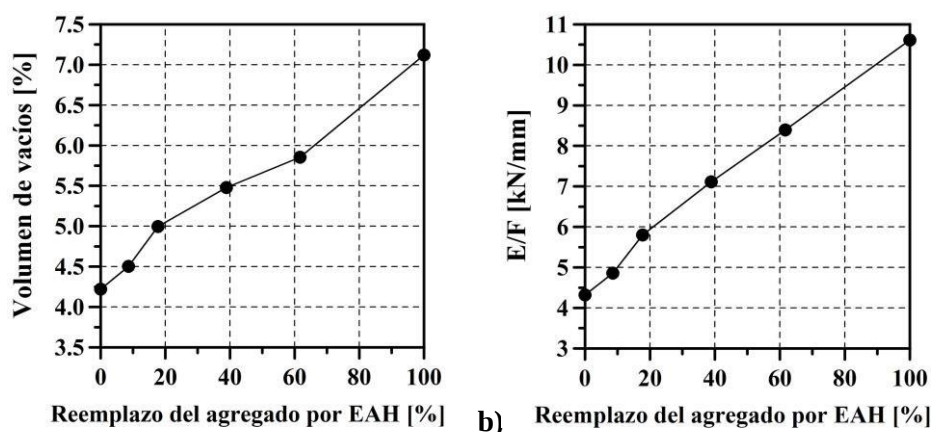


Figura 2: Resultados del ensayo Marshall, a) Volumen de vacíos con aire, b) relación E/F

Tracción indirecta

En la Tabla 8 se presentan los resultados del ensayo de tracción indirecta. Se observa, que la resistencia a tracción indirecta aumenta cuando se sustituye el agregado calcáreo por EAH, y es mayor cuando se reemplaza un 61,66%. En este porcentaje de sustitución, la resistencia de las muestras en seco y sumergidas en agua incrementan respectivamente en 23,9 y 19,9% con respecto a la mezcla de referencia (EAH=0%). Para el caso de 100% de sustitución del material calcáreo por EAH se reporta un incremento en la resistencia de las muestras en seco y saturadas de 6,8 y 13,4% respectivamente, así como una magnitud TSR alta y superior a la de la mezcla de referencia. Tanto la mezcla de control como aquellas fabricadas con EAH presentan una magnitud TSR superior a 80% (normalmente las especificaciones internacionales reportan un valor mínimo recomendado de referencia que oscila entre 75 y 80%).

Tabla 8: Resultados del ensayo de tracción indirecta

EAH (%)	S (kPa)	H (kPa)	TSR (%)
0	1479,7	1234,0	83,4
8,6	1505,4	1244,5	82,7
17,74	1623,2	1325,7	81,7
38,86	1749,4	1411,8	80,7
61,66	1833,5	1479,4	80,7
100	1580,8	1399,7	88,5

Módulo resiliente

Las Figuras 3 y 4 presentan los resultados del ensayo de módulo resiliente y creep estático, respectivamente. En la Fig. 3 se observa que al sustituir en 17,74, 38,86 y 61,66% el agregado calcáreo por EAH, se obtiene un incremento en el módulo de 14, 17,2 y 17%, respectivamente. Este incremento es consistente con los resultados reportados en la Figura 4 donde se observa, que las mayores resistencias a la deformación permanente se generan cuando se sustituye entre 38,86 y 61,66% el agregado natural por EAH. Para el caso de 100% de sustitución, el módulo resiliente obtenido es similar al de la mezcla de control y la resistencia a la deformación permanente es menor.

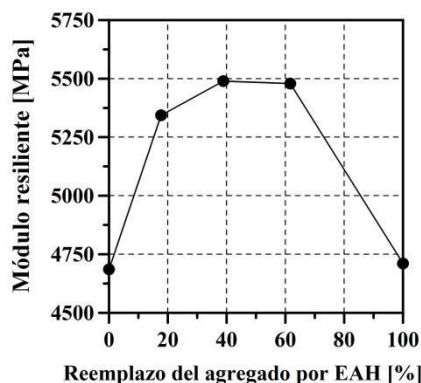


Figura 3: Resultados del ensayo de módulo resiliente

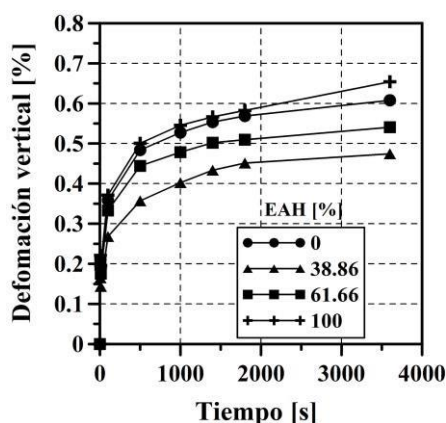


Figura 4: Resultados del ensayo de deformación permanente

4. CONCLUSIONES

El presente documento reporta los resultados de un estudio realizado para evaluar el posible uso de una EAH como material alternativo para sustituir por volumen, totalmente o parcialmente (fracción gruesa), un material de origen calcáreo en mezclas de concreto asfáltico. Con base en los resultados obtenidos se puede concluir:

1. En el ensayo Marshall, para cualquier porcentaje de sustitución de la fracción gruesa y total del agregado calcáreo por EAH, la mezcla experimenta un incremento en la resistencia bajo carga monotónica. Los incrementos más apreciables en dicha resistencia se observan cuando se sustituye el 61,66% de la fracción gruesa (partículas que son retenidas desde el tamiz No. 10 hasta el de $\frac{1}{2}$ ") y el 100%. Lo anterior ocurre a pesar que la mezcla desarrolla un ligero incremento en los vacíos con aire. Adicionalmente, a diferencia de otros estudios, no se necesitó incrementar el contenido de asfalto para aumentar la resistencia Marshall, debido tal vez, a que la EAH estaba sustituyendo un agregado con superficie lisa, baja porosidad y adsorción (inferior al 1%). Estos resultados del ensayo Marshall pueden llegar a ser vistos como indicadores de una mayor resistencia al ahuellamiento en climas de alta temperatura cuando se emplean EAH como sustitutos del agregado pétreo en la mezcla analizada, y esto se confirma con base en los resultados de los ensayos de módulo resiliente y creep estático para el caso de sustitución entre 38,86 y 61,66%. Sin embargo, para el caso de la sustitución total del agregado por EAH, estos últimos dos ensayos reportan la menor resistencia al fenómeno de ahuellamiento debido tal vez al mayor contenido de vacíos.
2. Al igual que en el ensayo Marshall, la resistencia a tracción bajo condición seca y húmeda de la mezcla aumenta para cualquier porcentaje de sustitución de la fracción gruesa y de la totalidad del agregado calcáreo por EAH. La mayor resistencia a tracción la desarrolla la mezcla que sustituye el 61,66% de la fracción gruesa (partículas que son retenidas desde el tamiz No. 10 hasta el de $\frac{1}{2}$ ").

3. Teniendo en cuenta las magnitudes obtenidas de TSR se puede concluir, que la resistencia al daño por humedad es buena cuando se sustituye el agregado calcáreo por EAH en la mezcla asfáltica analizada (magnitudes de TSR superiores a 80%).
4. En términos generales se reporta, con base en la revisión bibliográfica y en los ensayos de caracterización efectuados, que la EAH analizada tiene propiedades interesantes (buena resistencia al desgaste por abrasión, partículas porosas con formas rugosas e ideales, ninguna presencia de material contaminante, bajo peso específico, buena compatibilidad con el asfalto, composición química similar al clinker) para ser utilizada en la fabricación de mezclas de concreto asfáltico. Adicionalmente, con base en los resultados obtenidos se puede afirmar, que la EAH ayudó a generar un mejor comportamiento bajo carga monotónica (ensayo Marshall y tracción indirecta) y resistencia a las deformaciones permanentes en comparación con la mezcla de control, cuando sustituye la fracción gruesa del agregado pétreo. Las futuras fases del proyecto evaluarán las propiedades reológicas de la mezcla y su respuesta al fenómeno de agrietamiento por fatiga. Asimismo, se realizará una fase donde se evaluará el efecto de la composición química de la EAH y el agregado calcáreo usado sobre la respuesta físico-mecánica de la mezcla.

5. REFERENCIAS

- [1] DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 031/2006 – ES. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico, Especificação de serviço. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [2] Shen, H.; Forssberg, E. "An overview of recovery of metals from slags". *Waste Management*, vol. 23, no. 10, pp. 933-949, 2003.
- [3] Byers, C.C.; Saleh, M.F.; Pidwerbesky, B.D. "Evaluation of melter slag as a base course material", *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 5, núm. 4, pp. 193-199, 2004.
- [4] FHWA - 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, Washington, DC, 2008.
- [5] Marriaga, J.L.; Claisse, P. "The influence of the blast furnace slag replacement on chloride penetration in concrete", *Ingeniería e Investigación*, vol. 31, núm. 2, pp. 38-47, 2011.
- [6] NSA, National Slag Association. Blast Furnace Slag [en línea]. [ref. consulted in april of 2018]. Disponible en Web: <http://nationalslag.org/blast-furnace-slag>, 2018.
- [7] Emery, J.J. "Slag utilization in pavement construction, extending aggregate resources". ASTM Special Technical Publication 774, *American Society for Testing and Materials*, pp. 95-118, 1982.
- [8] Jones, D.E. "Application of steel plant by-products to roadworks". Proceedings - Conference of the Australian Road Research Board, 11th ARRB Conference, vol. 11, núm. PT6, pp. 106-119, 1982.
- [9] León, N.A.; Rojas, N.R.; Suárez, B.U.; Bustamante, O. "Experimental evaluation of silicon - calcareous units from blast furnace slag and hydraulic lime for masonry". *Dyna*, vol. 76, núm. 160, pp. 247-254, 2009.
- [10] Rondón, H.A.; Fernández, W.D.; Ruge, J.C.; Patiño, D.; Vacca, H.; Reyes, F.A. "Characterization of blast furnace slag for road projects", *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, vol. 33, núm. 1, 83-92, 2018.
- [11] Okumura, H. "Recycling of iron-and steelmaking slags in Japan". 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, 1993.
- [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. "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags". *Environmental Science and Technology*, vol. 34, núm. 8, pp. 1576-1582, 2000.
- [13] Airey, G.D.; Collop, A.C.; Thom, N.H. "Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates". Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), 2004.

- [14] Nouvion, S.; Jullien A.; Sommier, M.; Basuyau, V. "Environmental modeling of blast furnace slag aggregate production", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 10, núm. 4, pp. 715-745, 2009.
- [15] Geiseler, J. "Use of steelworks slag in Europe", *Waste Management*, vol. 16, núm. (1-3), pp. 5963, 1996.
- [16] Houben, L.J.M.; Akbarnejad, S.; Molenaar, A.A.A. "Performance of pavements with blast furnace base courses". GeoShanghai 2010 International Conference, Paving Materials and Pavement Analysis, Geotechnical Special Publication, núm. 203, pp. 476-483, 2010.
- [17] Das, B.; Prakash, S.; Reddy, P.S.R.; Misra, V.N. "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50, núm. 1, pp. 40-57, 2007.
- [18] Shi, C. "Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, núm. 3, pp. 230-236, 2004.
- [19] Abu-Eishah, S.I.; El-Dieb, A.S.; Bedir, M.S. "Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region", *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 249–256, 2012.
- [20] Sorlini, S.; Sanzeni, A.; Rondi, L. "Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 209–210, pp. 84-91, 2012.
- [21] Van Oss, H.G. "Slag-Iron and Steel", U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 69.1-69.7, 2003.
- [22] Oluwasola, E.A.; Hainin, M.R.; Aziz, M.M.A. "Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction", *Transportation Geotechnics*, vol. 2, pp. 47–55, 2015.
- [23] Ameri, M.; Behnood, A. "Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 26, pp. 475-480, 2012.
- [24] Wang, G.; Wang, Y.; Gao, Z. "Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 184, pp. 555-560, 2010.
- [25] Rondón, H.A.; Reyes, F.A.; De Farias, M. "Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión", *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 17, núm. 33, pp 71-97 2018.
- [26] Akbarnejad, S.; Houben, L.J.M.; Molenaar, A.A.A. "Application of aging methods to evaluate the long-term performance of road bases containing blast furnace slag materials", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 15, núm. 3, pp. 488-506, 2014.