



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN
DE INGENIEROS EN LA
ERA DIGITAL



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO CON RESIDUOS SIDERÚRGICOS COMO AGREGADOS

Ricardo Ochoa Díaz

**Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Tunja, Colombia**

Resumen

El auge de la construcción de grandes obras de ingeniería ha impulsado la demanda del acero, lo que ha generado un incremento en la producción de residuos siderúrgicos, situación que causa problemas ambientales debido a su acumulación y no disposición adecuada. Igualmente, la explotación de recursos naturales no renovables como los agregados pétreos están generando deterioro en el medio ambiente. Esta investigación analiza la conveniencia técnica del uso de la escoria de horno de arco eléctrico (EAF) como agregado grueso para fabricar mezclas asfálticas en caliente para pavimentos, como una alternativa para mitigar los problemas ambientales derivados de la acumulación de residuos siderúrgicos y de la explotación de materiales no renovables. Los resultados de este estudio confirman el uso de escoria EAF como agregado grueso para reemplazar parcialmente los agregados convencionales, en la fabricación de concretos asfálticos para uso en carreteras. Respecto a las propiedades mecánicas, las mezclas cumplen con los requerimientos del INVIAS para un nivel de tránsito NT-3, como son estabilidad, flujo y propiedades volumétricas. Asimismo, las propiedades de desempeño (susceptibilidad a la humedad, susceptibilidad a la deformación permanente, módulo resiliente y fatiga) presentaron un buen comportamiento

Palabras clave: Escoria EAF, concreto asfáltico

Abstract

The boom in the construction of large engineering works has boosted the demand for steel, which has generated an increase in the production of iron and steel waste, a situation that causes environmental problems due to its accumulation and not adequate disposal. Likewise, the

exploitation of non-renewable natural resources such as stone aggregates are causing deterioration in the environment. This research analyzes the technical convenience of the use of electric arc furnace slag (EAF) as a coarse aggregate to manufacture asphalt hot mixes for pavements, as an alternative to mitigate the environmental problems derived from the accumulation of steel residues and exploitation non-renewable materials. The results of this study confirm the use of EAF slag as coarse aggregate to partially replace conventional aggregates, in the manufacture of asphalt concrete for road use. Regarding the mechanical properties, the mixes meet the INVIAS requirements for a NT-3 transit level, such as stability, flow and volumetric properties. Likewise, the performance properties (susceptibility to humidity, susceptibility to permanent deformation, resilient modulus and fatigue) presented a good performance

Keywords: EAF slag, asphalt concrete

1. Introducción

Durante el proceso de la fabricación de acero se producen diferentes residuos entre los cuales se encuentran las escorias (Parish et al., 2014), (Lobato et al., 2015), (Omran & Fabritius, 2017). Las más conocidas son la escoria de alto horno (BFS), escoria de horno al oxígeno (BOF) y escoria de horno eléctrico (EAF) (Kambole et al., 2017). Otro residuo que se produce durante la fabricación del acero es el polvo de alto horno (BFD) (Gupta et al., 2005).

La escoria EAF es producida durante el proceso de la fabricación de acero a partir de chatarra en el horno eléctrico en las siderúrgicas semi-integradas (Masoudi et al., 2017). Se han realizado investigaciones alrededor del mundo, en la mayoría de ellas han concluido que es factible la utilización de las escorias como árido en la construcción de carreteras (Skaf et al., 2017).

La escoria EAF es producida por la siderúrgica Gerdau-Diaco, en el Departamento de Boyacá, cuya producción es de 60000 toneladas por año aproximadamente (Acosta, 2018). Debido a la poca utilización de estos residuos y a la mala disposición generan un problema para el medio ambiente. Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de buscar un uso alternativo a estos residuos siderúrgicos. Además, la construcción y mantenimiento de carreteras incrementa el uso de agregados naturales no renovables, como piedra caliza y arena, causando otro impacto negativo al medio ambiente con su explotación.

El objetivo de este trabajo es evaluar la factibilidad de reemplazar parcial o totalmente los agregados naturales (arena y grava) por escorias EAF y BOF como agregado grueso y BFD como agregado fino, respectivamente, en concretos asfálticos, cumpliendo con los requisitos técnicos y ambientales.

De acuerdo con lo anterior, la investigación incluyó tres etapas. En primer lugar, conocer las características físicas y químicas de la escoria EAF y los agregados naturales, se caracterizaron por fluorescencia de rayos X (XRF), en el microscopio electrónico de barrido (SEM) y se obtuvieron los elementos químicos presentes y la microtopografía. La caracterización física y mecánica se realizó de acuerdo con las normas ASTM (ASTM, 2005a), (ASTM, 2005b) e INVIAS (INVIAS,

2013c) teniendo en cuenta los ensayos para agregados pétreos a utilizar en mezclas asfálticas. En segundo lugar, se diseñaron y fabricaron tres (3) tipos de mezclas con la metodología Ramcodes (Sánchez et al., 2002): Una mezcla de control preparada con agregados naturales (grava y arena) y dos mezclas en las cuales se reemplazaran parcial y totalmente el agregado natural por escoria EAF. Se realizaron ensayos de verificación de vacíos y análisis de estabilidad y flujo para comprobar el cumplimiento de las especificaciones (INVIAS, 2013b). Luego se efectuaron las pruebas de desempeño de las mezclas asfálticas como susceptibilidad a la humedad y resistencia a la deformación permanente. Por último, los resultados se analizaron y se utilizaron para determinar la viabilidad del uso de la escoria EAF en la fabricación de concreto asfáltico para su uso en la construcción de carreteras.

2. Materiales y metodología

Materiales

Para el correcto desarrollo de la investigación y de los ensayos de laboratorio es necesario obtener materiales adecuados. Es decir, que provengan de fuentes confiables para obtener resultados adecuados.

La procedencia de cada uno de los materiales utilizados en esta investigación es: Grava, arena natural y llenante mineral, obtenidas de la cantera La Roca de la ciudad de Moniquirá (Boyacá), ubicada 56 kilómetros de la ciudad de Tunja. La escoria de horno de arco eléctrico (EAF). Obtenida en la empresa Gerdau-Diaco S.A., localizada en el departamento de Boyacá, a 25 kilómetros de Tunja.

En la figura 1 se muestra la característica visual de cada material utilizado. La figura 1(a) es la grava, la figura 1(b) es escoria de horno de arco eléctrico (EAF) suministrada por Gerdau-Diaco, y la figura 1(c) es arena natural obtenida de la cantera la Roca.

Figura 1. Caracterización visual de los materiales



Fuente: El autor

Cada material tiene características y propiedades diferentes, es por esto que se evaluaron de forma individual, con el fin de establecer si son propicios para formar parte de una mezcla asfáltica. En Colombia, el Instituto nacional de Vías establece, en el artículo 450 de 2013 (INVIAS, 2013a), los requisitos que evalúan la calidad del material tanto en las características de consenso como en las

de origen. En la tabla 1 se muestra los resultados de los ensayos.

Tabla 1. Propiedades físicas básicas de los agregados utilizados

Propiedades	Agregado EAF	grueso		Especificación	Norma
		Caliza	fino Arena		
Desgaste (los ángeles) (%)	17.8	19.5	N/A	<25	ASTM C 131
Degradación (Micro-Deval) (%)	19.8	19.8	N/A	<20	ASTM D 6928
Pérdidas ensayo de solidez (%)	2.0	1.6	3.21	<18	ASTM C 88
Caras fracturadas (%)	94.1	94	N/A	>85	ASTM D 5821
Índice de plasticidad (%)	N/A	N/A	NP	NP	ASTM D 4318
Equivalente de arena (%)	N/A	N/A	68.5	>50	ASTM D 2919
Gsb	3.470	2.668	2.722	-	
Gss	3.508	2.700	2.743	-	
Gsa	3.606	2.757	2.779	-	ASTM C 127/128
Absorción (%)	1.09	0.47	0.76	-	

Fuente: El autor

El cemento asfáltico utilizado fue de penetración 60/70, procedente de IncoAsfaltos S.A.S., en Colombia. Los resultados de los ensayos de caracterización están dentro de los límites de la especificación y se muestran en la tabla 2. La mezcla asfáltica elegida para el desarrollo de la investigación fue una MDC-19, de acuerdo con las especificaciones INV E-450-13, para un nivel de tránsito NT3 (ESALs>5.0x10⁶)

Metodología

Los ensayos de caracterización química fueron: Composición química, se utilizó la fluorescencia de rayos X para determinar cuantitativamente los elementos en la escoria EAF. Información topográfica, se utilizó la microscopía electrónica de barrido (SEM) para determinar la morfología de la escoria EAF. Se obtuvieron las imágenes topográficas digitales de las muestras.

Tabla 2. Resultados caracterización cemento asfáltico AC 60-70

Propiedades	Valores medidos	Especificación	Norma
Penetración a 25°C (0.1 mm)	61.2	60 - 70	ASTM D 5-97
Ductilidad, 5 cm/min, 25°C (cm)	106	>100	ASTM D 113
Punto de ablandamiento (°C)	49	>45	ASTM D 36
Punto de inflamación (°C)	248	>230	ASTM D 92
Viscosidad a 60°C (P)	2336	>1000	ASTM D 2171

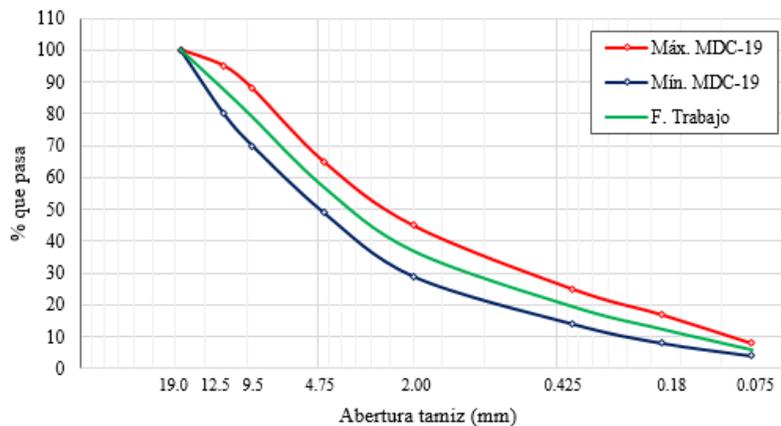
Fuente: El autor

Para el diseño de la mezcla, la gradación escogida presenta un tamaño máximo nominal de 19 mm y se diseñó siguiendo el método de diseño Ramcodes (Sánchez-Leal et al., 2002), Esta metodología ha sido aplicada exitosamente en el diseño y control de calidad de suelos compactados para rellenos estructurales y carreteras, así como para el diseño y control de producción de mezclas asfálticas. En el caso particular de las mezclas asfálticas, Ramcodes cuenta con dos herramientas de análisis muy poderosas, como son la carta de gradación (Sánchez-Leal, 2007) y el polígono de vacíos (Sánchez-Leal et al., 2011). La carta de gradación es un ambiente

analítico en el que se pueden representar de forma simultánea una o más granulometrías de mezclas asfálticas, a las cuales se les pueden asociar respuestas mecánicas o hidráulicas, o costos de producción, lo que permite de forma notoria la optimización del uso de la materia prima en la producción de mezcla asfáltica. Por otro lado, el polígono de vacíos es una construcción gráfica completamente automatizada que permite obtener un contenido óptimo de cemento asfáltico basado en las especificaciones de vacíos y en las gravedades específicas de los agregados y del cemento asfáltico. Luego se verifica apenas con la elaboración y ensayo de tres briquetas, en lugar de quince o doce, con los procedimientos tradicionales de los métodos Marshall o Superpave, respectivamente. Se ha comprobado que los resultados con esta metodología son muy similares a los obtenidos con la metodología Marshall (Ochoa-Díaz, 2013).

Para el diseño de las mezclas inicialmente se tuvo en cuenta realizar tres tipos de mezclas. La primera usando materiales convencionales (piedra caliza como agregado grueso y arena como agregado fino) identificada como mezcla M1, como mezcla de control; la segunda, sustituyendo el agregado grueso por EAF en un 50%, identificada como mezcla M2; la tercera, sustituyendo en su totalidad el agregado grueso por EAF, denominada mezcla M3. La gradación de trabajo para los tres tipos de mezcla se muestra en la figura 2.

Figura 2. Granulometría de trabajo MDC-19



Fuente: El autor

Los indicadores que se tuvieron en cuenta para el diseño de cada una de las mezclas asfálticas fueron: peso unitario de la mezcla compactada, estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos con aire en la mezcla, vacío entre agregados minerales y vacíos llenos de ligante. Las pruebas de desempeño para cada una de las mezclas fueron: susceptibilidad al agua y resistencia a la deformación plástica.

Susceptibilidad al agua.

El ensayo de susceptibilidad al agua utilizando la prueba de tracción indirecta evalúa el cambio en la resistencia a la tracción resultante de los efectos de saturación y acondicionamiento acelerado al agua, sobre mezclas asfálticas compactadas en laboratorio. El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento de la norma INV E-725-13 y ASTM D4867; se elaboraron seis probetas por cada tipo de mezcla, tres para ser ensayadas en seco y tres para ser ensayadas después de saturación

parcial. Las muestras del grupo húmedo se llevaron a un baño de agua por 24 horas a una temperatura de 60 °C; transcurrido dicho tiempo, se sumergieron los dos grupos de probetas a un baño de maría a 25 °C durante una hora. La resistencia a la tracción indirecta se determinó utilizando la ecuación 1.

$$R_T = \frac{2000P}{\pi hD}$$

Donde:

R_T = Resistencia a la tracción (kPa)

P = Carga máxima aplicada (N)

h = Espesor del espécimen (mm)

D = Diámetro del espécimen (mm)

La relación de la resistencia a la tracción (TSR) se calculó como la relación de la resistencia promedio a la tensión del subgrupo acondicionado al agua (R_{TH}) y la resistencia promedio a la tensión del subgrupo mantenido en seco (R_{TS}), como se expresa en la ecuación 2.

$$TSR = \left[\frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right] * 100$$

Resistencia a la deformación plástica

El ensayo de resistencia la deformación plástica se realizó para evaluar la resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento. El ensayo se llevó acabo de acuerdo con la norma INV E-756-13 y la norma europea EN-12697-22, utilizando el equipo "Wheel Tracking Test". El ensayo se realizó a una temperatura constante de 60°C, haciendo pasar una rueda metálica de 20 cm de diámetro, dotada de una banda de rodadura de caucho macizo de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor, que ejerce una presión de contacto sobre la superficie de la probeta de 900 KN/m².

Se midieron las deformaciones totales en los minutos 1, 3 y 5 contados a partir del comienzo del ensayo. Después cada 5 minutos hasta completar 45 minutos y, a partir de este momento, midiendo cada 15 minutos hasta finalizar el ensayo a los 120 minutos. A partir de las deformaciones correspondientes a los diferentes tiempos, con los resultados anteriores se calculó la velocidad de deformación media, correspondiente a los intervalos de tiempo mediante la ecuación 3.

$$V_{t2}/V_{t1} = \frac{d_{t2} - d_{t1}}{t_2 - t_1}$$

Donde:

V_{t2}/V_{t1} = Velocidad media de deformación, en el intervalo de tiempo entre t_1 y t_2 ($\mu\text{m}/\text{min}$)

d_{t1} , d_{t2} = Deformaciones a t_1 y t_2 respectivamente (μm)

t_1 , t_2 = Tiempos en el lapso establecido (min)

3. Resultados y discusiones

Componentes químicos de los materiales

El porcentaje en peso de cada uno de los componentes presentes en la piedra caliza y la escoria EAF son diferentes, los componentes predominantes en la piedra caliza son CaO y SiO₂ mientras que en la escoria EAF son CaO y Fe₂O₃. La escoria EAF tiene una relación CaO/SiO₂ de 2.6, en la piedra caliza es de 3.8, como se muestra en la Tabla 3. Dicha relación considera el nivel de alcalinidad del agregado y relaciones altas conducen a afinidad más fuertes con el asfalto (Hesami et al., 2015)

Tabla 3. Composición química de los materiales por fluorescencia de rayos X

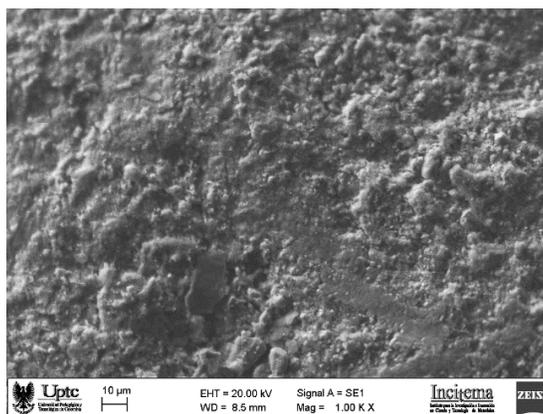
Componente (% en peso)	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Otros
Escoria EAF	3.70	6.10	11.00	28.60	5.99	42.10	2.41
Piedra caliza	3.80	9.30	16.60	63.40	0.17	3.04	3.63
Arena	1.60	7.30	88.70	0.46	-	0.99	1.00

Fuente: El autor

Morfología Microscópica

La morfología microscópica de la escoria EAF se muestra en la Figura 3 a una escala de 1.00KX, la cual presenta una textura rugosa y angularidad muy irregular, lo cual facilita la adherencia con el asfalto. A estas características de la textura y rugosidad se le puede atribuir un fuerte enlace de adherencia con el cemento asfáltico (Kehagia, 2009) (Xie et al, 2013).

Figura 3. Micrografía SEM de la escoria EAF



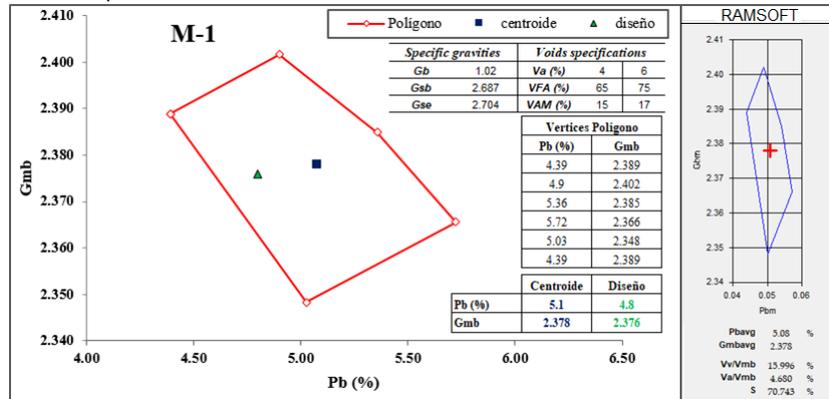
Fuente: El autor

Diseño preliminar de las mezclas

El primer paso consistió en realizar la dosificación granulométrica para cada mezcla. Seguidamente, se procede a determinar el contenido óptimo de ligante con la metodología Ramcodes, teniendo los resultados de caracterización de los agregados y el ligante. Esta metodología consiste en realizar un análisis de vacíos en la mezcla, como son: vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA), los cuales relacionan el

comportamiento de las mezclas compactadas. Los vacíos son función del porcentaje de ligante (%Pb) y de la gravedad específica bulk de la mezcla (Gmb), los cuales se representa en mapas con isolíneas para los valores permitidos en las especificaciones, mostrados en la Tabla 4. La intersección de esas líneas produce una construcción grafica en el espacio %Pb-Gmb, que da lugar al polígono de vacíos. El centroide de dicho polígono establece el contenido óptimo de ligante y la gravedad específica bulk (densidad). En la Figura 4 se muestra el polígono de vacíos para la mezcla M1

Figura 4. Polígono de vacíos para la mezcla M-1



Fuente: El autor, con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1.

De esta manera, se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 4.9% y una densidad de 2.376 gr/cm³ para la mezcla M1; un 4.9% de asfalto y 2.570 gr/cm³ de densidad para la mezcla M2 y 4.5% de asfalto y 2.796 gr/cm³ de densidad para la mezcla M3.

La tabla 4 muestra los resultados encontrados en el ensayo de estabilidad en la prensa Marshall y de flujo. En relación con la estabilidad, las tres mezclas superan el requerimiento mínimo de 9000 N establecidos en las especificaciones del INVIAS-2013. En el caso del flujo, las 3 mezclas cumplen con los valores del requerimiento. Sin embargo, las mezclas M2 y M3 presentan valores menores a la mezcla M1.

Tabla 4. Resultados caracterización mecánica de las mezclas.

Parámetro	M1	M2	M3	Requerimiento INV E 450-13
Estabilidad, N	11967	11687	12300	>9000
Flujo, mm	3.35	2.51	2.47	2.0 – 3.5

Fuente: El autor

Pruebas de desempeño

Una vez obtenida la fórmula de trabajo para cada una de las mezclas, se realizan los ensayos para la verificación del diseño y determinar de las propiedades como susceptibilidad al agua y resistencia a la deformación plástica.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la prueba TSR, realizados con los especímenes elaborados para cada tipo de mezcla.

Tabla 6. Resultados ensayo TSR

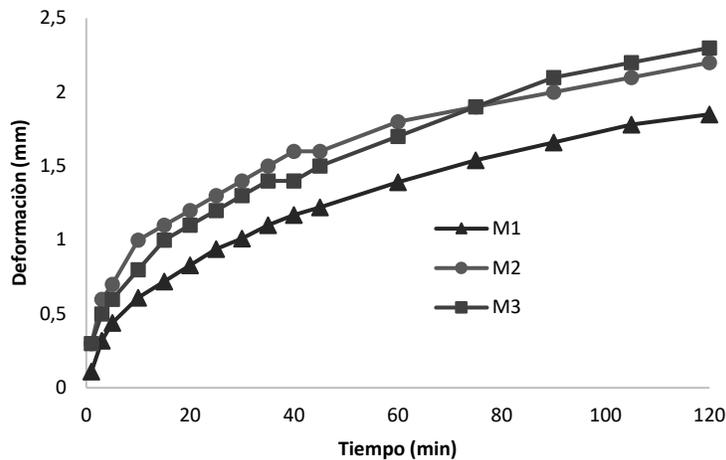
Condición	Id	P _{ult} (N)	RT(Kpa)	RT _{prom} (Kpa)	TSR _{prom} (%)
M1					
Húmedo	M1-3	9340	919.3	929.5	89
	M1-5	9520	939.7		
Seco	M1-7	10450	1023.4	1041.9	
	M1-8	10740	1060.5		
M2					
Húmedo	M2-2	6468	639.3	630.9	86
	M2-6	6277	622.5		
Seco	M2-7	7419	719.0	727.0	
	M2-9	7572	735.0		
M3					
Húmedo	M3-1	6721	657.5	672.7	81
	M3-2	7026	687.9		
Seco	M3-5	8287	819.7	826.3	
	M3-6	8367	832.9		

Fuente: los autores.

Los valores de TSR promedio de los diferentes diseños de mezclas disminuyen a medida que se aumenta el contenido de EAF, pero cumplen el requerimiento mínimo de 80%, exigido en la norma INV E 450-13.

En la Figura 5 se presentan los resultados de las pruebas de susceptibilidad a la deformación permanente. La mezcla M1 presentó una deformación máxima de 1.85 mm, mientras que las mezclas M2 y M3, modificadas con EAF, presentaron una mayor deformación de 2.2 mm y 2.3 mm, respectivamente.

Figura 5. Evolución de la deformación



Fuente: El autor

Conclusiones

En estas mezclas solo se sustituyó parcial y totalmente el agregado grueso por escoria EAF, como agregado fino en todos los casos se utilizó el agregado natural. Como la textura superficial de la escoria EAF es áspera con bordes subangulares y redondeada pero no presenta porosidad, el contenido óptimo de cemento asfáltico en estas mezclas es similar al contenido óptimo de la mezcla base. La mezcla M-2, en la cual se sustituyó parcialmente el agregado grueso natural por escoria EAF, aumentó solo en 0.1 % el contenido óptimo de cemento asfáltico en comparación con la mezcla base. Por otra parte, la mezcla M-3, en la cual se utilizó 100% escoria EAF como agregado grueso, disminuyó en 0.3 % el contenido óptimo de cemento asfáltico en comparación con la mezcla base. Lo expuesto anteriormente tiene sustento en la textura superficial y a la menor absorción de la escoria EAF.

Así mismo, a medida que se incrementa el contenido de escoria EAF en la mezcla aumenta su gravedad específica bulk, la mayor densidad de la escoria EAF en comparación con la densidad de la grava contribuye con este aumento.

En el caso de la estabilidad, el valor de estabilidad para la mezcla M-2 disminuyó solo un 2.3 % en relación a la mezcla base. El valor de estabilidad de la mezcla M-3 aumentó 2.8 % en comparación con la mezcla base. De todos modos, los valores de estabilidad de las mezclas M-2 y M-3 son superiores en 29.8 % y 36.7 % respectivamente respecto a la estabilidad mínima requerida.

Por el contrario, los valores de flujo para las mezclas M-2 y M-3 son los menores en comparación con la mezcla M-1, aunque estos valores están dentro del intervalo establecido en el requerimiento. Teniendo en cuenta que la estabilidad de una mezcla depende de la fricción entre partículas, lo cual está relacionado con la forma, textura superficial y la cohesión del cemento asfáltico, la escoria EAF presenta una buena textura superficial y una buena cohesión con el cemento asfáltico. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas del agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

Por su parte, el ensayo para medir la susceptibilidad al daño por humedad mostró que a medida que se aumenta la cantidad de escoria EAF en la mezcla, los valores de resistencia a la tensión indirecta aumentan, tanto para las probetas ensayadas en seco como en las probetas acondicionadas. La resistencia a la tensión indirecta de la mezcla M-3 es mayor a la resistencia a la tensión indirecta de la mezcla M-2, tanto en las probetas acondicionadas como sin acondicionar.

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la deformación plástica mostraron que a mayor cantidad de escoria EAF incorporada en la mezcla, mayores son las deformaciones finales producidas. Lo anterior puede ser debido a la afinidad entre el cemento asfáltico y la escoria EAF. Además, estas dos mezclas presentaron las mayores deformaciones totales al final del ensayo, en la mezcla M-8 se presentó un incremento del 9.0 % y la mezcla M-9 un incremento de 15.0 % en comparación con la deformación total de la mezcla base

4. Referencias

- Acosta, Y. O. (2018). Producción Escoria EAF en Diaco. In *Entrevista*. Tuta.
- ASTM. (2005a). *Section 04-Construction: Volume 04.02 Concrete and Aggregates*. West Conshohocken, Pa.
- ASTM. (2005b). *Section 04-Construction: Volume 04.03 Road and Paving Materials*. West Conshohocken. Pa.
- Gupta, S., Sahajwalla, V., Burgo, J., Chaubal, P., & Youmans, T. (2005). Carbon structure of coke at high temperatures and its influence on coke fines in blast furnace dust. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 36(3), 385–394. <https://doi.org/10.1007/s11663-005-0067-3>
- Hesami, S., Ameri, M., Goli, H., & Akbari, A. (2015). Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(8), 745–759. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10298436.2014.953502>
- INVIAS. (2013a). *Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua*. Bogotá.
- INVIAS. (2013b). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Bogotá.
- INVIAS. (2013c). *Normas para ensayos de materiales para carreteras*. Bogotá.
- Kambole, C., Paige-Green, P., Kupolati, W. K., Ndambuki, J. M., & Adeboje, A. O. (2017). Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. *Construction and Building Materials*, 148, 618–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>
- Kehagia, F. (2009). Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates. *Waste Management and Research*, 27(3), 288–294. <https://doi.org/10.1177/0734242X08092025>.
- Lobato, N. C. C., Villegas, E. A., & Mansur, M. B. (2015). Management of solid wastes from steelmaking and galvanizing processes: A brief review. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.025>
- Masoudi, S., Abtahi, S. M., & Goli, A. (2017). Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Construction and Building Materials*, 135, 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>
- Ochoa-Díaz, R. (2013). Analysis of the use of coal tar as a binder in bituminous mixtures, using Marshall and Ramcodes methodologies. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 466). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/466/1/012034>
- Omran, M., & Fabritius, T. (2017). Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts. *Powder Technology*, 308, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.049>
- Parish, C. M., White, R. M., Lebeau, J. M., & Miller, M. K. (2014). Response of nanostructured ferritic alloys to high-dose heavy ion irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 445(1–3), 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.11.002>
- Sánchez-Leal, F. J. (2007). Gradation Chart for Asphalt Mixes : Development. *Journal of Materials in Civil Engineering in Civil Engineering*, 19(2), 185–197. [https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561\(2007\)19:2\(185\)](https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561(2007)19:2(185))

- Sánchez-Leal, F. J., Anguas, P. G., Larreal, M., & Valdés, D. B. L. (2011). Polyvoids : Analytical Tool for Superpave HMA Design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1129–1137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000275](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000275).
- Sánchez-Leal, F. J., Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Pérez García, N. (2002). *Ramcodes: Metodología racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados*. Sanfandila, Querétaro.
- Sánchez, F., Garnica, P., Gómez, J., & Pérez, N. (2002). *Ramcodes: Metodología racional para el análisis de densificación de geomateriales compactados*. 200. Sanfandila, Querétaro. Retrieved from <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt200.pdf>
- Skaf, M., Manso, J. M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J. A., & Ortega-López, V. (2017). EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
- Xie, J., Chen, J., Wu, S., Lin, J., & Wei, W. (2013). Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag. *Construction and Building Materials*, 38, 796–803. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.056>

Sobre los autores

- **Ricardo Ochoa Díaz:** Ingeniero en Transporte y Vías, Especialista en Geotecnia Vial, Magister en Infraestructura Vial, Doctor (c) en Ingeniería y Ciencia de los Materiales. ricardo.ochoa@uptc.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)