



Behavior of dynamic modulus and fatigue in asphalt mixtures with oxygen furnace slag

Comportamiento del módulo dinámico y fatiga en mezclas asfálticas con escoria de horno al oxígeno

Ricardo Ochoa-Díaz*

**PhD. en Ingeniería y Ciencia de los Materiales, ricardo.ochoa@uptc.edu.co, ORCID: 0000-0003-1151-7884, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia., Colombia.*

How to cite: : R. Ochoa-Díaz, "Behavior of dynamic modulus and fatigue in asphalt mixture with oxygen furnace slag". *Respuestas*, vol. 25, no. 3, pp. 89-102, 2021.

Received on July 07, 2020; Approved on November 12, 2020

ABSTRACT

Keywords:

BOF Slag,
Ramcodes,
Dynamic modulus,
Fatigue

Oxygen furnace slag (BOF) is produced during the transformation of pig iron from the blast furnace into steel during the integrated iron and steel process. This waste has generated environmental problems due to accumulation and not proper disposal. Therefore, this study aims to analyze the use of dynamic modulus and fatigue behavior in asphalt mixtures with partial (50%) and total (100%) replacement of the coarse aggregate by BOF; the results were compared with the behavior of a mixture made with conventional aggregates. To achieve the objective, the chemical and physical properties of BOF were determined, the optimal content of asphalt cement was determined with the Ramcodes methodology and tests were carried out to evaluate the physical characteristics, dynamic modulus and fatigue of each type of mix. The results of this study show an improvement in fatigue behavior and a slight decrease in dynamic modulus in mixtures with BOF. Which allows us to deduce that the use of this waste is feasible and thus contribute to sustainable development and protection of the environment.

RESUMEN

Palabras clave:

Escoria BOF,
Ramcodes,
Módulo dinámico,
Fatiga

La escoria de horno al oxígeno (BOF) se produce durante la transformación del arrabio, proveniente del alto horno, en acero durante el proceso siderúrgico integrado. Este residuo ha generado problemas ambientales debido a la acumulación y disposición no adecuada. Por lo anterior, este estudio tiene como objeto analizar el uso comportamiento del módulo dinámico y la fatiga en mezclas asfálticas con sustitución parcial (50%) y total (100%) del agregado grueso por BOF; los resultados se compararon con el comportamiento de una mezcla elaborada con agregados convencionales. Para alcanzar el objetivo se determinaron las propiedades químicas y físicas de BOF, el contenido óptimo de cemento asfáltico se determinó con la metodología Ramcodes y se realizaron ensayos para evaluar las características físicas, el módulo dinámico y la fatiga de cada tipo de mezcla. Los resultados de este estudio muestran una mejora en el comportamiento a fatiga y una leve disminución en el módulo dinámico en las mezclas con BOF. Lo cual permite deducir que es factible el uso de este residuo y así contribuir al desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente.

Introducción

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; si a esto le sumamos que las regulaciones ambientales para la explotación de estos materiales no renovables son cada vez más estrictas generando incremento significativo en los costos de producción [1]. En consecuencia, esto lleva a un cambio de paradigma: utilizar materiales no convencionales y emplear técnicas de reciclajes de los pavimentos existentes.

Durante el proceso de la fabricación de acero se producen diferentes residuos entre los cuales se encuentran las escorias,

*Corresponding author.

E-mail Address: ricardo.ochoa@uptc.edu.co (Ricardo Ochoa-Díaz)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

[2][3]. Las más conocidas son la escoria de alto horno (BFS), escoria de horno al oxígeno (BOF) y escoria de horno eléctrico (EAF) [4]. La escoria BOF es producida en siderúrgicas integradas durante el proceso de transformación del arrabio, proveniente del alto horno, en acero; el arrabio reacciona con cal, silicatos, óxidos de aluminio, óxidos de manganeso y ferritas dependiendo de la calidad de acero que se produzca [5].

En Colombia la única siderúrgica integrada es Acerías Paz del Río S.A., ubicada en el Departamento de Boyacá, en donde la producción de BOF es de aproximadamente 72000 toneladas por año [6]. Debido a la poca utilización de este residuo 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 este residuo siderúrgico e incorporarlo a la economía circular, la cual permite responder a las necesidades económicas y ambientales. Además, la construcción y mantenimiento de carreteras incrementa el uso de agregados naturales no renovables los cuales podrían ser sustituidos por este residuo.

El objetivo de este trabajo es evaluar la factibilidad de reemplazar parcial o totalmente el agregado natural por escoria BOF como agregado grueso, en concretos asfálticos, cumpliendo con los requisitos técnicos y ambientales.

La investigación se desarrolló en tres etapas. En primer lugar, conocer las características físicas y químicas de los materiales empleados. La escoria BOF y los agregados naturales se caracterizaron por fluorescencia de rayos X (XRF) y en el microscopio electrónico de barrido (SEM); se obtuvieron los elementos químicos presentes y la microtopografía. La caracterización física y mecánica se realizó de acuerdo con las normas ASTM [7], [8] e INVIAS [9] teniendo en cuenta los ensayos para agregados pétreos a utilizar en mezclas asfálticas. En segundo lugar, se diseñaron las mezclas con la metodología Ramcodes [10]: 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 BOF. Se realizaron ensayos de verificación de vacíos y análisis de estabilidad y flujo para comprobar el cumplimiento de las especificaciones [11]. Luego se efectuaron las pruebas de módulo dinámico y leyes de fatiga. Por último, los resultados se analizaron y se utilizaron para determinar la viabilidad del uso de BOF en la fabricación de concreto asfáltico para su uso en la construcción de carreteras.

Materiales y Metodología

Materiales.

La escoria de horno al oxígeno BOF, Figura 1, se obtuvo de la siderúrgica Acerías Paz del Río S.A.; la piedra caliza fue elegida como agregado grueso y la arena como agregado fino para la mezcla de referencia, estos materiales fueron suministrados por la cantera la Roca del municipio de Moniquirá en el departamento de Boyacá. El cemento asfáltico utilizado fue de penetración 80/100, procedente de IncoAsfaltos S.A.S., en Colombia. 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 ($ESALs > 5.0 \times 10^6$) [12].



Figura 1. Escoria BOF

Metodología

Caracterización química de los materiales

Morfología y composición química de los agregados. Las partículas de grava, escoria BOF, arena y BFD, se sometieron a un examen microscópico para caracterizar su forma y textura superficial. El examen se realizó con el microscopio electrónico de barrido (SEM) Leo 410, con vacío de cámara de $9.85E-5$ Torr, corriente en el filamento de 1.2 nA y voltaje en el ánodo de 15 kV.

La evaluación de la composición química se realizó usando análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), empleando un espectrómetro secuencial *Rigaku Primus II* con tubo de rodio y ventana de berilio de 30 micras.

Diseño de las mezclas

El tipo de concreto asfáltico elegido para el desarrollo de la investigación fue MDC-19 de acuerdo al artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías [12]. De acuerdo con el objetivo de la investigación, se reemplazó parcial y totalmente los agregados convencionales por los residuos siderúrgicos. Esta dosificación se planteó teniendo en cuenta que investigaciones similares han sustituido el agregado convencional en proporciones inferiores al 50% y no han considerado la sustitución total del agregado convencional.

Las mezclas se diseñaron siguiendo el método de diseño Ramcodes. En el caso particular de las mezclas asfálticas, Ramcodes cuenta con una herramienta de análisis muy poderosas, como es el polígono de vacíos [13]. 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 [14].

Para el diseño de las mezclas 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 BOF en un 50%, identificada como mezcla M2; la tercera, sustituyendo en su totalidad el agregado grueso por BOF, denominada mezcla M3

Módulo dinámico

Para determinar el módulo dinámico de las mezclas asfálticas del estudio, se fabricaron tres probetas por cada tipo de mezcla, las cuales fueron ensayadas mediante el procedimiento de la norma prNE-12697-26-Anexo C [15] en el equipo *Nottingham Asphalt Tester* (NAT). Las probetas fueron elaboradas con la fórmula de trabajo y compactadas con el compactador giratorio para todos los casos. Con esta prueba se determina el módulo dinámico de una probeta tipo Marshall, por medio del principio de tensión indirecta. El principio enuncia que, al aplicar una carga compresiva a través del diámetro de una muestra cilíndrica se produce una tensión sobre un diámetro ortogonal al cual se aplica la carga. Al registrar la carga vertical aplicada y la deformación horizontal producida se obtiene el módulo dinámico.

Teniendo en cuenta que el ensayo es no destructivo, las probetas fueron ensayadas a 5 °C, 25 °C y 40 °C y a una frecuencia de 10 Hz. Se aplicaron 10 impulsos de acondicionamiento para permitir el ajuste del equipo, seguidamente se realizó la aplicación de los impulsos de carga a la probeta a lo largo del primer plano diametral, luego se rotó 90 ° y se repitió el procedimiento.

El módulo dinámico depende de la temperatura del ensayo. Con base en los valores de los ensayos realizados y aplicando la técnica de regresión por mínimos cuadrados, se ajusta a una función matemática del tipo dado en la ecuación 1, esta ecuación representa el comportamiento del módulo resiliente para cada mezcla.

$$E = A * e^{B * T} \quad (1)$$

Donde,

E es el módulo dinámico a la temperatura T

T es la temperatura de la mezcla

A y B son constantes de regresión

Fatiga

La fatiga en mezclas asfálticas ocurre debido al incremento de grietas, estas grietas comienzan como vacíos de aire que se comprimen durante el proceso de compactación y como defectos en el cemento asfáltico. El crecimiento de las grietas puede ocurrir como fisuras adhesivas y cohesivas dentro de la mezcla. La fisura adhesiva ocurre en las películas delgadas de cemento asfáltico que cubre los agregados y se desarrollan en la interface entre el agregado y el cemento asfáltico. La fisura cohesiva ocurre dentro del cemento asfáltico en las películas más gruesas [16].

Este ensayo tiene por objeto determinar el número de ciclos (de una determinada carga) necesarios para llegar a la falla de una briqueta. Se realizó bajo la norma *BS-EN 12697-24* Anexo E, a una temperatura de 20 °C, una frecuencia de 2.5 Hz y bajo condiciones de esfuerzo controlado con el equipo NAT.

Se fabricaron ocho probetas para cada tipo de mezcla con el respectivo asfalto óptimo obtenido y su correspondiente composición granulométrica. Las briquetas elaboradas se dividen en cuatro grupos, cada grupo de dos probetas fueron sometidas al ensayo a distintas cargas; las cargas seleccionadas fueron en el rango de 250 kPa, a 350 kPa respectivamente. A cada briqueta sometida a este ensayo se le determinó la vida hasta la rotura a partir del número de aplicaciones de carga que causan la rotura. El esfuerzo en el centro de la briqueta se calculó con la ecuación 2 y la deformación máxima por tracción se calculó a partir de la ecuación 3.

$$\sigma_0 = \frac{2P}{\pi t \varphi} \quad (2)$$

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2\Delta H}{\varphi} \right) \times \left[\frac{1+3\mu}{4+\pi^*\mu-\pi} \right] \quad (3)$$

Donde

σ_0 es el esfuerzo de tracción en el centro de la probeta (MPa)

P es la carga máxima (N)

t es el espesor de la probeta (mm)

φ es el diámetro de la probeta (mm)

ε_0 es la deformación por tracción en el centro de la probeta ($\mu\varepsilon$)

ΔH es la deformación horizontal (mm)

μ es el coeficiente de Poisson

Para la obtención de las leyes de fatiga para la predicción de la vida de fatiga, se utilizó la ecuación 4, de Wohler [17].

$$\varepsilon_0 = k (Nf)^{-n} \quad (4)$$

Donde

Nf es la cantidad de ciclos de carga hasta la falla por fatiga

k y n son constantes del material

ε_0 es la deformación horizontal de tracción inicial en el centro de la muestra en $\mu\varepsilon$.

Resultados y Análisis

Caracterización química de los materiales

Morfología microscópica.

La figura 2 presenta micrografías SEM de los materiales usados, se muestra la forma y textura de la superficie de las partículas de la arena, la grava y la escoria BOF. La figura 2(a) es la micrografía SEM de la arena, la cual muestra que la textura superficial es áspera y presenta bordes de forma angulosa. La figura 2(b) es la micrografía SEM de la grava, la textura superficial es áspera, presenta bordes de forma angulosa y subredondeados. La figura 2(c) es la micrografía SEM de la escoria BOF, la textura es áspera, presenta bordes menos angulares y más redondeados, presenta poros superficiales y es más áspera que el agregado natural [18], a estas características de la textura y rugosidad se le puede atribuir un fuerte enlace y una excelente zona interfacial para el cemento asfáltico [19].

Composición química

La composición química de la escoria BOF, la grava y la arena detectados por XRF se muestra en la tabla III. Los principales constituyentes químicos de la grava son CaO, SiO₂ y Al₂O₃. La escoria BOF se produce de convertir el arrabio, procedente del alto horno, en acero y la composición química depende de la calidad y tipo de acero producido.

Los principales componentes de la escoria BOF son CaO, Fe₂O₃, SiO₂ y Al₂O₃. En comparación de la grava con la escoria, el componente principal en la grava es CaO con más del 50%, lo anterior debido a su origen calizo.

Aunque Fe_2O_3 también aparece como componente en la grava, el porcentaje en peso es muy inferior en comparación al porcentaje de la escoria. Al contenido de CaO se le puede atribuir una mejor adherencia entre el agregado y el cemento asfáltico [18]. La escoria BOF presentará una buena adhesión con el cemento asfáltico ya que presenta buen contenido de CaO .

La relación CaO/SiO_2 considera el nivel de alcalinidad del agregado, relaciones altas conducen a una afinidad mayor entre el agregado y el cemento asfáltico [20]. La escoria BOF presenta una relación CaO/SiO_2 de 4.3, más alta que la relación en la grava que es de 3,8. En consecuencia, la escoria BOF tiene mejor afinidad con el cemento asfáltico.

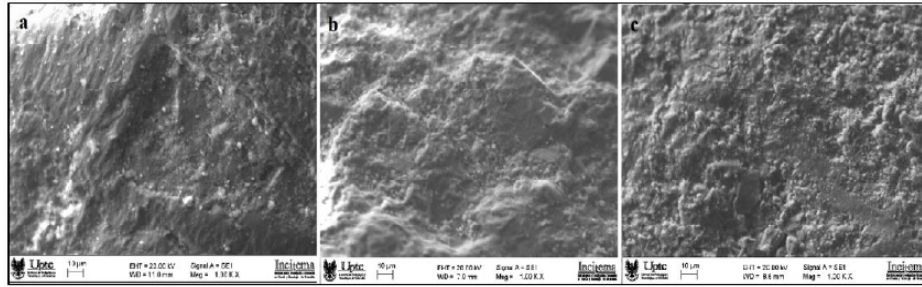


Figura 2. Micrografías SEM de los agregados a un aumento de 1.00 KX de (a) arena; (b) grava; (c) BOF.

Table III. Composición Química de los Materiales por Fluorescencia de Rayos X

Componente (% en peso)	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Otros
<i>Agregado grueso</i>								
Grava	3.80	9.30	16.60	-	63.40	0.17	3.04	3.63
Escoria BOF	2.70	4.90	10.80	2.10	46.80	2.00	28.80	1.73
<i>Agregado fino</i>								
Arena	1.60	7.30	88.70	-	0.46	-	0.99	1.00

La tabla IV muestra la composición química de escoria BOF de varias fuentes, con el interés de comparar la composición química de la escoria BOF utilizada en esta investigación.

Tabla IV. Comparativo de Composición Química de Escoria Bof con otros Autores

Referencia	País	Composición (% en peso)							
		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Otros
1*	Colombia	2.70	4.90	10.80	2.10	46.80	2.00	28.80	1.73
[20]	China	5.19	3.25	19.24	1.41	42.70	1.77	24.55	1.52
[21]	India	0.82	1.22	12.16	3.33	47.88	0.28	26.30	7.9
[18]	Taiwán	8.56	0.98	7.75	-	39.30	4.24	38.06	1.11
[22]	Francia	6.30	2.00	11.80	2.70	47.50	1.90	22.60	5.20
[23]	Francia	6.37	3.04	13.25	1.47	47.71	2.64	24.36	1.16
[24][24]	UK	8.06	4.35	15.26	1.15	41.44	5.20	9.24	15.3
[25]	UK	7.76	0.99	11.99	1.15	43.54	2.98	20.37	11.22

Caracterización mecánica de los materiales

Los resultados de la caracterización de los materiales utilizados se muestran en la tabla I. Los materiales cumplen con los requerimientos exigidos por las especificaciones. La escoria BOF presenta características similares a las del agregado grueso convencional. Sin embargo, por su característica superficial presenta una absorción más elevada.

La caracterización del cemento asfáltico muestra que los resultados están dentro de los límites de la especificación y se muestran en la tabla II.

Tabla I. Resultados Caracterización Agregados Utilizados (Bof, Caliza y Arena)

Propiedades	Agregado grueso		Agregado fino	Especificación	Norma
	BOF	Caliza	Arena		
Desgaste (los ángeles) (%)	20	20	N/A	<25	ASTM C 131
Degradación (Micro-Deval) (%)	20	20	N/A	<20	ASTM D 6928
Pérdidas ensayo de solidez (%)	1.72	3.20	3.21	<18	ASTM C 88
Caras fracturadas (%)	91.4	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	2.468	2.593	2.722	-	ASTM C 127/128
Gss	2.564	2.605	2.743	-	
Gsa	2.729	2.625	2.779	-	
Absorción (%)	3.80	0.47	0.59	-	

Tabla II. Resultados Caracterización Cemento Asfáltico

Propiedades	Valores medidos	Especificación	Norma
Penetración a 25°C (0.1 mm)	87.35	80 - 100	ASTM D 5 97
Ductilidad, 5 cm/min, 25°C (cm)	>100	>100	ASTM D 113
Punto de ablandamiento (°C)	50.5	>45	ASTM D 36
Punto de inflamación (°C)	245	>230	ASTM D 92
Viscosidad a 60°C (P)	2336	>1000	ASTM D 2171

Diseño 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 (V_a), 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 cemento asfáltico (%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.

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 3 se muestra como ejemplo el polígono de vacíos para la mezcla M1.

Siguiendo los pasos de Ramcodes, con el contenido óptimo de asfalto y la combinación de agregados se elaboraron tres probetas. A las cuales se les realizaron los ensayos de estabilidad, flujo y análisis de densidad y vacíos. El promedio de los resultados obtenidos en los ensayos, mostró que el valor de flujo (3.6 mm) no cumplía el requerimiento para el nivel de tránsito especificado (2.0 a 3.5 mm). Teniendo en cuenta la recomendación de la metodología [13] [26] y considerando que el valor de flujo está muy cerca del límite superior del requerimiento, se realizó un nuevo intento bajando el contenido de asfalto a 4,8 % y con la misma combinación de agregados, se fabricaron tres nuevas probetas. Con este porcentaje de asfalto se cumple todos los requerimientos. Para la mezcla M2, el centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 4.9 % y para la mezcla M3 un porcentaje óptimo de asfalto de 5.1%. En la tabla V se muestran los resultados del diseño preliminar de cada una de las mezclas.

El contenido de asfalto es similar para las tres mezclas. Sin embargo, se presenta un pequeño incremento en las mezclas M2 y M3; lo que se puede atribuir a la mayor absorción de la escoria BOF. La mezcla M2 presentó una estabilidad levemente inferior (2.3%) a la de la mezcla base y superior en 29.9% respecto al mínimo requerido. La mezcla M3 presentó una estabilidad levemente superior (2.8%) a la estabilidad de la mezcla base y superior en 36.7% con respecto a los 9000 N exigidos en las especificaciones. El comportamiento de la estabilidad en estas mezclas puede ser atribuido a la mayor afinidad y buena adhesión de la escoria BOF con el cemento asfáltico.

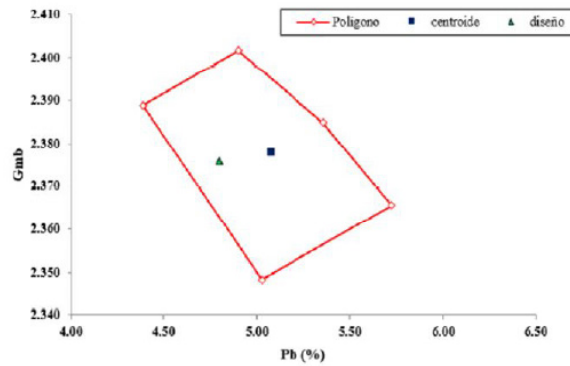


Figura 3. Polígono de vacíos mezcla M1

Tabla V. Resultados Diseño de las Mezclas Asfálticas

Característica	Unidad	Valor			Requerimiento (Art. 450-13) INVIAS
		M-1	M-2	M-3	
Contenido de agregado (en peso)	%	95.2	95.1	95.5	-
Contenido de asfalto (en peso)	%	4.8	4.9	5.1	-
Gravedad específica bulk (G_{mb})	g/cm^3	2.376	2.570	2.796	-
Gravedad específica máxima teórica (G_{mm})	g/cm^3	2.510	2.700	2.950	-
Estabilidad	N	11967	11687	12300	9000
Flujo, (mm)	mm	3.35	2.51	2.47	2.0 – 3.5
Relación: Estabilidad/flujo	kN/mm	3.57	4.66	4.98	3.0 – 6.0
Vacios con aire (V_a)	%	5.15	4.97	5.15	4.0 – 6.0
Vacios en agregados minerales (VAM)	%	15.80	16.31	16.41	>15.0
Vacios llenos de asfalto (VFA)	%	67.42	69.52	68.59	65 – 75
Asfalto absorbido (P_{ba})	%	0.24	0.42	0.41	-
Asfalto efectivo (P_{be})	%	4.57	4.50	4.11	-
Relación: Llenante/ligante efectivo	-	1.10	1.10	1.20	0.8 – 1.2

Módulo dinámico

El módulo es una propiedad importante del concreto asfáltico en cualquier procedimiento mecanicista de diseño y análisis de pavimentos flexibles. El módulo dinámico es la propiedad del material requerida en el método empírico de diseño AASHTO y es un parámetro importante de entrada en la guía de diseño empírico-mecanicista. Este parámetro se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos, por lo que ha sido introducido como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura [28].

La figura 4 presenta las líneas de tendencia del módulo para cada una de las muestras en estudio. Así como el valor del módulo para una temperatura de la mezcla de 20°C, considerando la temperatura a la cual va a estar trabajando la mezcla en una región con TMAP de 13°C. El módulo dinámico de la mezcla base (M1) es de 3351 MPa, siendo este el valor más alto de las mezclas ensayadas. Para las mezclas M3 y M4, el valor obtenido del módulo es un poco menor con valores de 3067 MPa y 3155 MPa respectivamente.

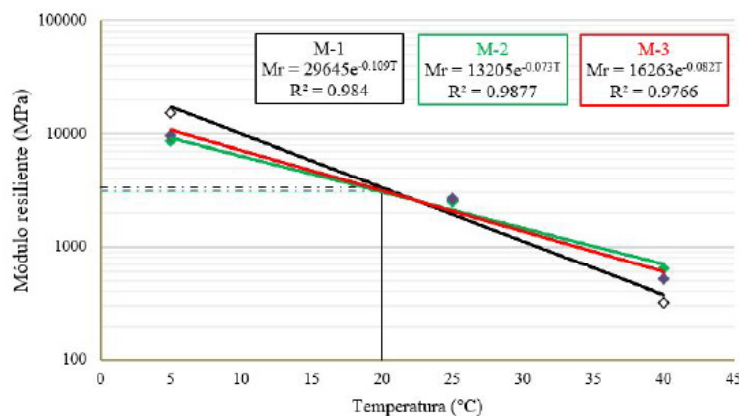


Figura 4. Líneas de tendencia módulo dinámico

En las mezclas M2 y M3 el módulo dinámico obtenido para una temperatura de 20 °C es levemente inferior al módulo resiliente de la mezcla base a la misma temperatura. De forma semejante, en el estudio realizado por [19], en el cual utilizaron escoria BOF como agregado grueso, reportaron un módulo un poco superior al reportado en esta investigación.

Fatiga

La vida de fatiga se define como el número de ciclos de carga hasta donde ocurre la falla (N_f) y representa la capacidad de la mezcla para soportar las cargas cíclicas del tránsito [29]. La figura 5 muestra la deformación de tracción frente al número de ciclos para las mezclas en estudio. La figura también incluye las ecuaciones de la ley de fatiga y el coeficiente de correlación (R^2), lo que indica que existe correlación estadística entre los resultados obtenidos para determinar cada ley de fatiga, dado que los coeficientes R^2 son superiores a 0.92.

Las leyes de fatiga de las mezclas M2 y M3 son similares entre sí y también similares a la ley de fatiga de la mezcla base (M1). Las pendientes de las tres leyes de fatiga son similares. En consecuencia, las mezclas M2 y M3 presentan una mejor vida a fatiga por estar por encima de la ley de fatiga de la mezcla M1.

La figura 6 muestra las deformaciones iniciales para las mezclas y para tres diferentes ciclos de carga (N_f) calculadas de acuerdo a la ecuación 4 de las leyes de fatiga.

Para 5.0×10^5 ciclos de carga, la mezcla M2 presentó la más alta deformación inicial ($\epsilon_0 = 201 \mu\epsilon$) la cual es 8.6 % superior a la deformación inicial de la mezcla base (M1) para los mismos ciclos de carga. De igual forma, para 5.0×10^6 ciclos de carga la deformación inicial de la mezcla M2 es superior en 10.9 % respecto de la mezcla M1 para el mismo número de ciclos de carga. Siguiendo la misma tendencia, para 5.0×10^7 ciclos de carga la mezcla M2 presentó una deformación inicial superior en 13.2 % respecto a la mezcla M1 y para los mismos ciclos de carga. La mezcla M3 presentó las mismas deformaciones para los tres ciclos de carga que las mezclas M1.

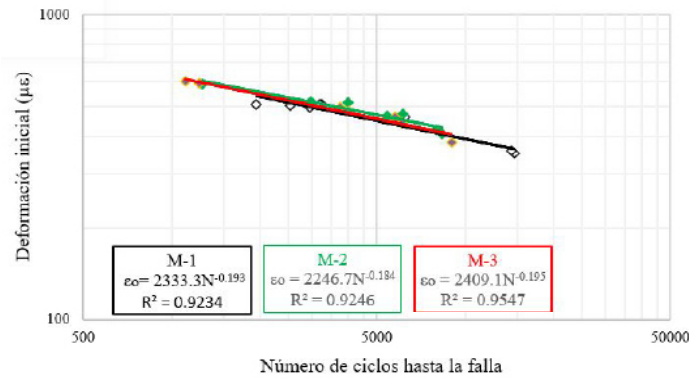


Figura 5. Leyes de fatiga de las mezclas

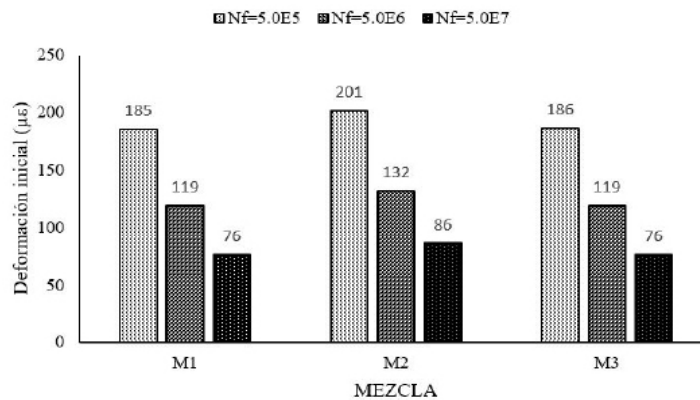


Figura 6. Deformaciones iniciales a diferentes ciclos de carga

La vida de fatiga de la mezcla base y las demás mezclas a diferentes niveles de deformación se presentan en la figura 7. Se puede observar que para una deformación $\epsilon_0=300 \mu\epsilon$, la mezcla M2 tiene vida a fatiga más alta que la mezcla base (M1). A medida que se aumenta la deformación, es decir, a deformaciones altas presenta menor vida de fatiga. La mezcla M3 independiente del nivel de deformación presenta una vida a fatiga similar que la mezcla base.

En general, la mezcla M2 presenta mejor vida a fatiga en todos los niveles de deformaciones que la vida a fatiga de la mezcla base. Las mezclas M3 presenta igual vida a fatiga que la mezcla base. Por lo anterior, se puede intuir que el reemplazo parcial y total de los agregados naturales por escoria BOF en concretos asfálticos aumenta un poco la fatiga de las mezclas, lo que puede ser atribuido a la textura superficial de la escoria, a la fuerza de unión entre el cemento asfáltico y la escoria atribuido a la alta alcalinidad de este material y a que esta mezcla está preparada con mayor porcentaje de cemento asfáltico.

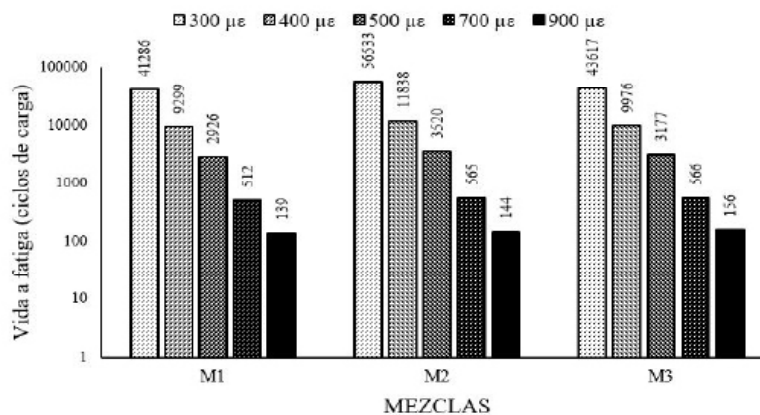


Figura 6. Vida a fatiga a diferentes deformaciones

Conclusiones

Los ensayos realizados mostraron características favorables, muy parecidas y en algunos casos superiores al del agregado natural. Para la escoria BOF, el resultado del ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles cumple con el requerimiento establecido, pero es superior en 0.3 % respecto del agregado natural y el resultado del ensayo de degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval es superior en 0.9 % respecto del agregado natural y superior en 0.7 % respecto al requerimiento máximo exigido en la norma para un nivel de tránsito NT-3.

Entre los daños ambientales, generados por la explotación de recursos naturales no renovables como materiales de construcción, cabe mencionar la deforestación propia en los procesos de explotación, pérdida en la biodiversidad y la alteración de los ecosistemas, daños en acuíferos y ríos que afectan inmediatamente a la población que depende de esta para cubrir sus necesidades básicas, etc. Sin embargo, la principal afectación es el consumo indiscriminado de materiales que son no renovables como la grava y arena. Con la utilización de residuos siderúrgicos como BOF, se disminuye la explotación de materiales no renovables como la grava, con consecuencias positivas que esto acarrea en el ecosistema. Aunque la producción de BOF en la región (Boyacá) es bastante inferior a la explotación y producción de materiales para construcción (grava), la reducción en el consumo de material tipo grava sería considerable.

En el caso de la estabilidad, el valor de estabilidad para la mezcla M2 disminuyó solo un 2.3 % en relación a la mezcla base. El valor de estabilidad de la mezcla M3 aumentó 2.8 % en comparación con la mezcla base. De todos modos, los valores de estabilidad de las mezclas M2 y M3 son superiores en 29.8 % y 36.7 % respectivamente respecto a la estabilidad mínima requerida.

Los módulos dinámicos de estas mezclas son menores al módulo de la mezcla base. Sin embargo, los valores de módulo resiliente de la mezcla en la cual se substituyó parcialmente y la mezcla que se substituyó totalmente el agregado natural, son muy similares. El módulo resiliente disminuyó en 8.5 % y 5.8 % en la mezcla M2 y M3 respectivamente, en comparación con el módulo resiliente de la mezcla base. Lo anterior, permite determinar que la utilización de escoria BOF como agregado grueso tiene el mismo efecto que el agregado natural en el módulo dinámico.

Adicionalmente, la mezcla M2 presenta mejor vida a fatiga a bajas deformaciones que la mezcla base. A medida que aumentamos el nivel de deformación, es decir, a deformaciones altas esta mezcla presenta menor vida a fatiga. De igual forma, teniendo en cuenta el número de ciclos de carga la mezcla M2 resistirá mayores deformaciones iniciales. La mezcla M3 presenta mayor vida a fatiga a bajas deformaciones en comparación con la mezcla M2 y la mezcla base, a altas deformaciones la mezcla M3 presenta menor vida a fatiga que la mezcla base y un poco mayor que la mezcla M2. Analizando la mezcla M3 y teniendo en cuenta el número de ciclos de carga, esta resistirá iguales deformaciones

iniciales que la mezcla base y menores respecto a la mezcla M2.

Las mezclas fabricadas con escoria BOF como agregado grueso ofrecen condiciones técnicas apropiadas para su implementación en la construcción de estructuras de pavimento. Lo anterior, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos para determinar las características mecánicas y de desempeño.

Agradecimientos.

El autor agradece a la empresa Acerías Paz del Río S.A. por el apoyo y suministro del material. Al INCITEMA de la Uptc, por el desarrollo de los ensayos de caracterización química del material. Al ingeniero Manuel Sierra, coordinador del laboratorio de Pavimentos de la Uptc. Por último, a la escuela de Ingeniería en Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Referencias.

- [1] F. Rolón Nieto, “El auge de la construcción en Colombia: un crecimiento real del sector o una burbuja que puede estallar,” *Dictam. Libr.*, vol. 10, no. 10, pp. 7–13, 2012.
- [2] N. C. C. Lobato, E. A. Villegas, and M. B. Mansur, “Management of solid wastes from steelmaking and galvanizing processes: A brief review,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 102, pp. 49–57, 2015, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.05.025.
- [3] M. Omran and T. Fabritius, “Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts,” *Powder Technol.*, vol. 308, pp. 47–60, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.11.049.
- [4] C. Kambole, P. Paige-Green, W. K. Kupolati, J. M. Ndambuki, and A. O. Adeboje, “Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 618–631, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036.
- [5] J. Xie et al., “Material characterization and performance evaluation of asphalt mixture Incorporating basic oxygen furnace slag (BOF) sludge,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 362–370, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.131.
- [6] O. González, “Producción residuos en Acerías Paz del Río S.A.,” in *Entrevista*, 2018.
- [7] ASTM, “Section 04-Construction: Volume 04.02 Concrete and Aggregates. West Conshohocken, Pa,” 2005.
- [8] ASTM, “Section 04-Construction: Volume 04.03 Road and Paving Materials. West Conshohocken. Pa,” 2005.
- [9] Instituto Nacional de Vías INVIAS, “Normas para ensayos de materiales para carreteras,” Bogotá, 2013.
- [10] F. Sánchez, P. Garnica, J. Gómez, and N. Pérez, “Ramcodes: Metodología racional para el análisis

- de densificación de geomateriales compactados.,” *Sanfandila, Querétaro*, 2002. [Online]. Available: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt200.pdf>.
- [11] INVIAS, “Especificaciones generales de construcción de carreteras,” *Bogotá*, 2013. [Online]. Available: www.invias.gov.co.
- [12] INVIAS, “Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua,” *Bogotá*, 2013.
- [13] F. J. Sánchez-Leal, P. G. Anguas, M. Larreal, and D. B. L. Valdés, “Polyvoids : Analytical Tool for Superpave HMA Design,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 1129–1137, 2011, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000275.
- [14] R. Ochoa and G. Grimaldo, “Validation of the polyvoids in the design of bituminous mixtures with coal tar as a binder,” *Rev. Ing. Construcción*, vol. 33, pp. 137–146, 2018, [Online]. Available: <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/827/pdf>.
- [15] A. E. de N. y certificación AENOR, “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez,” *madrid, UNE-EN 12697-26*, 2012. [Online]. Available: www.awenor.es.
- [16] R. L. Lytton, Y. Zhang, X. Luo, and R. Luo, *The fatigue cracking of asphalt mixtures in tension and compression*. Elsevier Ltd., 2015.
- [17] A. R. Pasandín and I. Pérez, “Fatigue performance of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates and waste tire rubber,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 26–33, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.090.
- [18] D. H. Shen, C. M. Wu, and J. C. Du, “Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 453–461, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001.
- [19] S. Amelian, M. Manian, S. M. Abtahi, and A. Goli, “Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag,” *J. Clean. Prod.*, vol. 176, pp. 329–337, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.120.
- [20] J. Xie, S. Wu, J. Lin, J. Cai, Z. Chen, and W. Wei, “Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 467–474, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.023.
- [21] B. Das, S. Prakash, P. S. R. Reddy, and V. N. Misra, “An overview of utilization of slag and sludge from steel industries,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 50, no. 1, pp. 40–57, 2007, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.05.008.
- [22] P. Y. Mahieux, J. E. Aubert, and G. Escadeillas, “Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 742–747, 2009,

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.015.

- [23] J. Waligora, D. Bulteel, P. Degrugilliers, D. Damidot, J. L. Potdevin, and M. Measson, “Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach,” *Mater. Charact.*, vol. 61, no. 1, pp. 39–48, 2010, doi: 10.1016/j.matchar.2009.10.004.
- [24] H. Y. Poh, G. S. Ghataora, and N. Ghazireh, “Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines,” no. April, pp. 229–240, 2006.
- [25] L. M. Juckes, “The volume stability of modern steelmaking slags,” vol. 9553, no. January, 2017, doi: 10.1179/03719550322500370.
- [26] F. J. Sánchez-Leal, “Manual de Aplicación - Metodología de Análisis y Diseño de Geomateriales Compactados,” 2009.
- [27] F. J. Sánchez-Leal, “Diseño acelerado de Mezclas Asfálticas con el Polígono de Vacíos. Metodología Ramcodes,” in *Curso*, 2018.
- [28] F. Elizondo, G. Badilla, and Á. Ulloa, “Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak,” *Rev. Infraestruct. Vial*, no. 19, pp. 40–50, 2008.
- [29] N. Li, A. A. A. Molenaar, M. F. C. Van De Ven, and S. Wu, “Characterization of fatigue performance of asphalt mixture using a new fatigue analysis approach,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 45, pp. 45–52, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.007.