

**EFECTO DEL ÓXIDO DE
HIERRO EN LAS
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS
DE LA MEZCLA ASFÁLTICA
MDC-10**

**EFFECT OF IRON OXIDE IN THE
MECHANICAL FEATURES OF
MDC-10 ASFALTIC MIXING**

**EFEITO DO ÓXIDO DE FERRO
NAS CARACTERÍSTICAS
MECÂNICAS DA MISTURA
ASFALTIC MDC-10**

Heiber J. Gil-López

Ingeniero en Transporte y Vías,
Facultad de Ingeniería, Escuela de
Transporte y Vías, Universidad
Pedagógica y Tecnológica de
Colombia, Tunja- Colombia,
heiber.gil@uptc.edu.co

Laura D. González-Vargas

Ingeniero en Transporte y Vías, Facultad
de Ingeniería, Escuela de Transporte y
Vías, Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia, Tunja-
Colombia,
laura.gonzalez02@uptc.edu.co

Carlos H. Higuera-Sandoval

Ingeniero en Transporte y Vías, Facultad
de Ingeniería, Escuela de Transporte y
Vías, Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia, Tunja-
Colombia, carlos.higuera@uptc.edu.co

Fecha de Recepción: 15 de julio de 2019
Fecha aprobación: 9 de septiembre de 2019

Resumen

El artículo presenta los resultados del efecto del óxido de hierro en las características mecánicas de una mezcla asfáltica preparada con un asfalto AC 80-100 y agregado pétreo de la cantera Triturados Paz del Río para la construcción de una capa de rodadura coloreada; con el objeto de mejorar la armonía, estética y seguridad vial. Para llevar a cabo lo anterior, se realizó el diseño de seis mezclas asfálticas una convencional, evaluando porcentajes del 4.0 al 6.5 de cemento asfáltico para determinar el porcentaje óptimo de asfalto y a partir de este valor se realizaron cinco mezclas con porcentajes del 2 al 10 de pigmento, bajo la metodología Marshall. Con base a estos datos se realizaron ensayos de resistencia a la deformación plástica, susceptibilidad al daño por humedad, módulo resiliente, resistencia a la fatiga y ensayo de péndulo británico. Se determinó un porcentaje óptimo de asfalto de 6%, que se usó como valor fijo para obtener el porcentaje óptimo de óxido de hierro del 5%, generando comportamientos crecientes, decrecientes y erráticos para las variables del diseño preliminar y con respecto a los ensayos de verificación se obtienen mejoras considerables en la deformación plástica, módulo resiliente y resistencia a la fatiga.

Palabras clave. Fatiga, módulo resiliente, Óxido de hierro y Susceptibilidad al daño por humedad

Abstract

The article presents the results of the effect of iron oxide on the mechanical characteristics of an asphalt mixture prepared with an AC 80-100 asphalt and stone aggregate of the Peace of the River crushed quarry for the construction of a rolling layer colored; in order to improve harmony, aesthetics and road safety. To carry out the above, the design of six asphalt mixtures was carried out a conventional evaluating percentages from 4.0 to 6.5 of asphalt cement to determine the optimal percentage of asphalt and from this value five mixtures with percentages were made 2 to 10 pigment, under the Marshall methodology. Based on this data, tests were carried out on resistance to plastic deformation, susceptibility to moisture damage, resilient module, fatigue resistance and British pendulum test. An optimal asphalt percentage of 6% was determined, which was used as a fixed value to obtain the optimal percentage of iron oxide of 5%, generating increasing, decreasing and erratic behaviors for preliminary design variables and with respect to tests significant improvements are made in plastic deformation, resilient module and fatigue resistance.

Keywords. Fatigue, Resilient Module, Iron Oxide, and Moisture Damage Susceptibility.

Resumo

O artigo apresenta os resultados do efeito do óxido de ferro sobre as características mecânicas de uma mistura de asfalto preparada com um asfalto AC 80-100 e

agregado de pedra da pedreira esmagada pela Paz do Rio para a construção de uma camada de rolamento de cor; A fim de melhorar a harmonia, estética e segurança rodoviária. Para realizar o acima exposto, o projeto de seis misturas de asfalto foi realizado um percentual de avaliação convencional de 4,0 para 6,5 de cimento asfalto para determinar a porcentagem ideal de asfalto e desse valor cinco misturas com porcentagens foram feitas 2 a 10 pigmento, a metodologia Marshall. Com base nestes dados, foram realizados testes sobre resistência à deformação plástica, suscetibilidade a danos à umidade, módulo resiliente, resistência à fadiga e teste de pêndulo britânico. Foi determinado um percentual asfáltico ideal de 6%, que foi utilizado como valor fixo para obter o percentual ideal de óxido de ferro de 5%, gerando comportamentos crescentes, decrescentes e erráticos para variáveis preliminares de projeto e com relação aos testes melhorias significativas são feitas na deformação plástica, módulo resiliente e resistência à fadiga.

Palavras-chave. Fadiga, módulo resiliente, óxido de ferro e umidade danificam a susceptibilidade

Introducción

A nivel internacional se ha desarrollado la creación de nuevas estructuras de pavimento con pigmento de óxido de hierro generando un impacto dentro de los entornos urbanos, ya que éstas se han aplicado a la construcción de carriles exclusivos, parques, canchas,

estacionamientos y carriles peatonales donde visto desde el entorno estético genera una aceptación por parte de sus usuarios.

Entre las investigaciones realizadas está la de Ontario, Canadá, la cual mostró que el óxido de hierro usado en una mezcla asfáltica era una solución más viable que una pintura EPOXY para la coloración de carriles con base a los valores de fricción. (L. Qingfan, V. Sina., T.Susan. 2017). En los países bajos se crearon carriles peatonales y ciclo rutas utilizando pigmentos de color rojo, verde y amarillo en una mezcla asfáltica con cemento asfáltico transparente lo que genero aspectos relacionados en mejoras de temas ambientales y la disminución de calor (Reeken, H. v. 2018). Por último, en la universidad de Atenas se realizó la investigación de cinco mezclas coloreadas para medir su efecto en la Isla de calor urbano (A. Synnefa, T. Karlessi, N. Gaitani, M. Santamouris. D.N. Assimakopoulos., C. Papakatsikas. 2011).

En Colombia la mayoría de las investigaciones en pavimentos se encuentran enfocadas al uso de mezclas asfálticas convencionales por lo cual se tiene bastante experiencia e información, pero el uso de la mezcla asfáltica de color es un tema desconocido; ya que sólo se poseen experiencias de pavimentos coloreados aplicadas a pavimentos rígidos en casos tales como los carriles del centro histórico del Sistema de Transporte Masivo de Cartagena TRANSCARIBE (Sistema integrado de transporte masivo de Cartagena. 2013), la influencia del color de los pavimentos en el calentamiento por radiación térmica (L. C. Hernández-García, D. E. 2018) y por último la experiencia innovadora de la empresa ARGOS (Empresa de cemento del

grupo Argos. 1924), la cual actualmente ha construido canchas (ARGOS. 2015) e infraestructura para peatones (ARGOS. 2015) de concreto coloreado teniendo disponible una gama de aproximadamente 800 colores. Lo que a que las investigaciones de pavimentos flexibles coloreados conlleva sean excluidas siendo estos, los de mayor uso y construcción en Colombia.

Por ello, el presente artículo muestra los efectos que el pigmento de óxido de hierro rojo genera en las características mecánicas de una mezcla asfáltica de tipo fino, mediante la caracterización de los elementos que conforman la mezcla asfáltica, los resultados del diseño Marshall y los ensayos de susceptibilidad al daño por humedad, resistencia a la deformación plástica, resistencia a la fatiga y módulo resiliente; a su vez su efecto en el costo de la construcción de un pavimento. Cabe mencionar que este proyecto forma parte de las investigaciones que adelanta el Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial (GRINFRAVIAL), de la Escuela de Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Por último, lo contenido en este artículo es importante para los profesionales en Ingeniería relacionados con el área de infraestructura vial y temas afines ya que se da un punto de partida a investigaciones relacionadas con mezclas asfálticas pigmentadas en Colombia.

Materiales y métodos

Entre los materiales utilizados para el desarrollo de la investigación se requirió asfalto de penetración AC 80-100 suministrado por la

empresa MPI, agregado pétreo de la Cantera Triturados Paz de Río y pigmento de óxido de hierro de la empresa PQUM.

Siguiendo las especificaciones de construcción de carreteras del INVÍAS-2013, se implementó el siguiente método para el diseño y verificación de mezclas asfálticas convencionales y con adición de pigmento de óxido de hierro. Lo anterior se observa en la Figura 1.

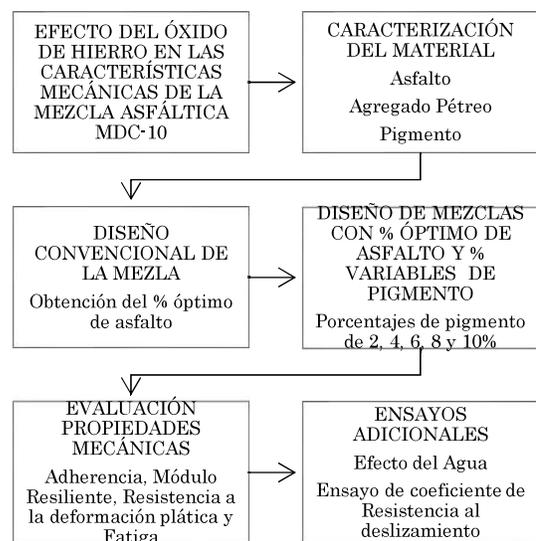


Fig. 1. Método del desarrollo de la Investigación.

Fuente: autores del proyecto

Desarrollo del trabajo

Siguiendo las especificaciones de construcción de carreteras del INVÍAS-2013 (Instituto Nacional de Vías. 2013), se implementó la siguiente metodología para el diseño y verificación de mezclas asfálticas convencionales y con adición de pigmento de óxido de hierro.

A. Caracterización del agregado pétreo y cemento asfáltico:

Para realizar la caracterización del agregado pétreo se tuvo en cuenta los ensayos exigidos en el artículo 450-13 y para el cemento asfáltico los ensayos exigidos en el artículo 410-13 ambos contenidos en las especificaciones de construcción de carreteras del INVIAS-2013.

B. Caracterización del óxido de hierro:

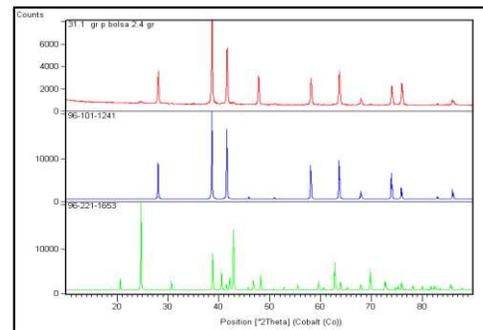
El óxido de hierro o este tipo de pigmentos inorgánicos no cuentan con una especificación que exija ensayos para verificar su calidad, por lo tanto, solo se realiza el ensayo de granulometría y difracción en Rayos X para su caracterización química. Para la granulometría por ser un material tipo polvo se usó el tamiz número doscientos (N°200).

Para la caracterización química se usó el equipo Difractómetro de rayos X mediante el ensayo de cristalografía en rayos X, este ensayo consiste en enviar una serie de rayos X que rodean los átomos del material ensayado y esta interacción contiene información sobre la posición y tipo de átomos, es decir, qué elementos predominan en la composición del material (EQUIPOS Y LABORATORIOS DE COLOMBIA). Dado que inicialmente se tiene en cuenta que el material es un óxido de hierro se usan ondas de cobalto las cuales son mejores para leer hierros.

De este ensayo se obtiene una gráfica llamada perfil del patrón de difracción del material en la cual cada pico es un átomo. Este perfil obtenido del material ensayado es comparado con los perfiles de patrón de cada elemento que

contiene el software y a partir de la similitud de los picos se definen porcentajes de composición (Figura 2.)

Fig. 2. Grafica obtenida del ensayo de Cristalografía en Rayos X para determinar porcentajes de composición. Fuente: Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales

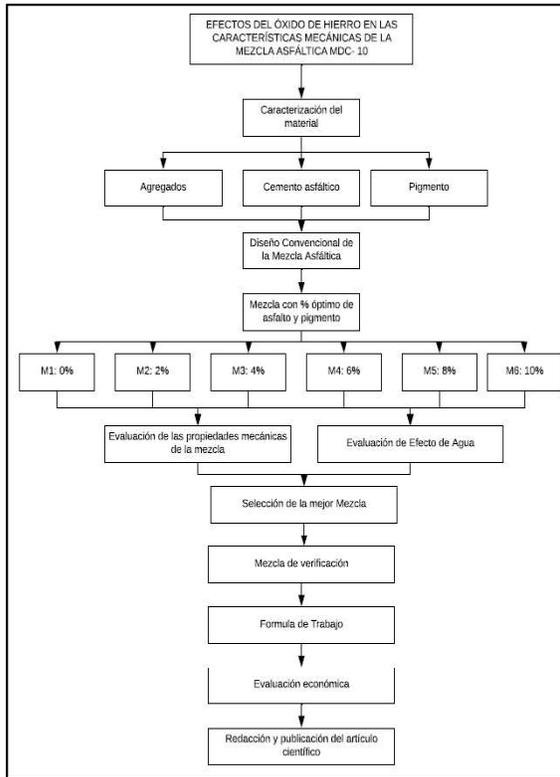


Fuente: Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (INCITEMA). Difractómetro de Rayos x en ensayo de Cristalografía de rayos X

C. Diseño de mezclas asfálticas:

Teniendo en cuenta el diseño metodológico observado en la Figura 3, una vez caracterizados los materiales de la mezcla asfáltica se sigue el siguiente procedimiento.

Fig. 3. Diseño Metodológico.



Fuente: Autores del proyecto

Bajo la metodología Marshall se establece el diseño dentro del cual se obtendrán los valores de: Gravedad específica Bulk, Gravedad específica máxima, Gravedad específica efectiva de agregado (Ecuación 1), porcentaje de asfalto absorbido (Ecuación 2). Porcentaje de cemento asfáltico de la mezcla (Ecuación 3). Porcentaje de vacíos con aire (Ecuación 4). Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (Ecuación 5). Porcentaje de vacíos en agregados minerales (Ecuación 6). Estabilidad, Flujo, relación estabilidad/ Flujo, relación llenante/ ligante (Ecuación 7) (Instituto Nacional de Vías. 2013). De los cuales se obtendrán los valores iniciales para los porcentajes de 4, 4.5, 5, 5.5, 6 y 6.5 de la mezcla convencional para determinar el porcentaje óptimo de asfalto el cual después

se comparará con los valores obtenidos para las mezclas con óxido de hierro.

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (1)$$

Donde:

Gse: Gravedad específica efectiva del agregado combinado

Gmm: Gravedad específica máxima de la mezcla

Pmm: Porcentaje en masa de la mezcla total suelta = 100

Gb: Gravedad específica del cemento asfáltico

Pb: porcentaje de cemento asfáltico de la mezcla

$$Pba = 100 \left[\frac{Gse - Gsb}{Gse * Gsb} \right] * Gb \quad (2)$$

Dónde:

Pba: porcentaje de asfalto absorbido como porcentaje de la masa del agregado

$$Pbe = Pb = \frac{Pba}{100} * Ps \quad (3)$$

Dónde:

Pb: porcentaje de cemento asfáltico de la mezcla

Ps: porcentaje de agregado en la mezcla

$$\%Va = 100 - \left[\frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \right] \quad (4)$$

Dónde:

%Va: porcentaje de vacíos con aire

Gmm: Gravedad máxima de la mezcla

Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

$$VFA = 100 * \left[\frac{VAM - Va}{VAM} \right] \quad (5)$$

Dónde:

VAM: Vacíos en el agregado mineral en la probeta compactada

$$VAM = 100 - \frac{Gmb}{Gsb} * ps \quad (6)$$

Dónde:

Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

Gsb: Gravedad específica bulk del agregado combinado

$$\text{Relación} \frac{\text{Llenante}}{\text{ligante}} = \frac{P_{0,075}}{P_{be}} \quad (7)$$

Dónde:

P_{0,075}: porcentaje que pasa el tamiz # 200

D. Ensayos de verificación:

Se realizan los ensayos de resistencia a la deformación plástica, susceptibilidad al daño por humedad, módulo resiliente y resistencia a la fatiga. Lo anterior, bajo las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS 2013, excepto para el ensayo de resistencia a la fatiga en la cual se usa la norma española UNE- EN 12697-24 (Asociación Española de Normalización. 1986)

El ensayo de resistencia a la deformación plástica se rige bajo los procedimientos de la norma INVÍAS 754 (Instituto Nacional de Vías. 2013) para la cual se realizan tres especímenes de mezcla convencional y dos para cada porcentaje de pigmento de óxido de hierro, estas de forma cilíndrica, las cuales se fallan a 60°C durante dos horas en la maquina Wheel

Tracker como se observa en la Figura 4 y con los resultados se realiza el cálculo de la velocidad de deformación (Ecuación 8)

$$\frac{Vt2}{Vt1} = \frac{dt2 - dt1}{t2 - t1} \quad (8)$$

Donde:

Vt1/Vt2: Velocidad media de deformación correspondiente al intervalo de tiempo entre t1 y t2 (µm/min)

dt1 dt2: Deformaciones correspondientes a t1 y t2 (µ)

t1 y t2: Tiempo que dependen del lapso establecido en las especificaciones (min)

Fig. 4. Especímenes compactados para el ensayo de resistencia a la deformación plástica y ensayo en máquina Wheel Tracker.



Fuente: Autores del proyecto.

El ensayo de susceptibilidad al daño por humedad se realizó bajo los procedimientos de la norma INVÍAS 725 (Instituto Nacional de Vías. 2013), para lo cual se realizaron doce especímenes compactados de la siguiente manera: seis con vacíos de 7±1% y seis con los vacíos esperados en campo. De cada grupo se realizó una división de tres especímenes ensayados en seco y tres ensayados en húmedo, los especímenes ensayados en

húmedo fueron sometidas a una saturación que estuviera dentro de los límites de 55 a 80% (Ecuación 9, 10, 11 y 12) y sumergidas 24 horas a 60°C antes de acondicionarlas a 25°C para el ensayo de tracción indirecta como se observa en la Figura 4 para hallar la relación de la resistencia a la tracción indirecta de ambas condiciones (Ecuación 13 y 14).

$$\text{Vacíos con aire (cm}^3\text{)} = \frac{Gbs * \%Va}{100} \quad (9)$$

Donde:

%Va: es el porcentaje de vacíos con aire

Gbs: Gravedad

$$Vwa = \text{Masa SSS} - \text{Masa al aire seco} \quad (10)$$

$$VA = \frac{\%Va * \text{Volumen especimenes}}{100} \quad (11)$$

$$\text{Grado de saturación} = \frac{Vwa}{VA} * 100 \quad (12)$$

Donde:

Vwa: Volumen de Agua

$$RT = \frac{200 * P}{\pi * t * D} \quad (13)$$

Donde:

RT: es la resistencia a la tensión (KPa)

D: es el diámetro, mm

P: la carga máxima, Newton

T: la altura del espécimen, mm

$$RTT = \left(\frac{RTs}{RTH} \right) * 100 \quad (14)$$

Donde:

RTs: es la resistencia a la tensión en seco (KPa)

RTH: es la resistencia a la tensión en húmedo (KPa)

Fig. 5. Acondicionamiento y ensayo de tracción indirecta para determinar la susceptibilidad al daño por humedad.



Fuente: Autores del proyecto

Para el ensayo de módulo de resiliente, norma INV E- 749-13 (Instituto Nacional de Vías. 2013), que usa cargas de compresión y mide las deformaciones horizontales y verticales recuperables de 6 especímenes, mediante la relación del módulo resiliente, donde se toman lecturas de temperatura de 5, 25 y 40 grados centígrados. El módulo resiliente de elasticidad se calcula con la ecuación 15 y su ejecución se muestra respectivamente en la Figura 6.

$$Sm = \frac{F(\pi + 0.2734)}{z * h} \quad (15)$$

Donde:

Sm: módulo resiliente total. (MPa)

F: máxima carga repetida aplicada.

z: deformación total recuperable.

h: relación del espécimen en mm

Fig. 6. Ensayo de módulo resiliente.



Fuente: Autores del proyecto.

Para el ensayo de resistencia a la fatiga se usa la normal española UNE- EN 12697-24, en donde se especifica que se deben fallar 8 especímenes a temperatura de 20 grados centígrados, con cargas de 250, 300, 330 y 350 Kpa, en donde el esfuerzo de tracción y la deformación por tracción se deben calcular con las ecuaciones 16 y 17 y como se muestra en la Figura 7.

$$\sigma_0 = \frac{2P}{\pi * t * \varphi} \quad (16)$$

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2\Delta H}{\varphi}\right) * \left(\frac{1 + 3v}{4 + \pi * v - \pi}\right) \quad (17)$$

Donde:

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

P: Carga Máxima (N)

t: espesor de la probeta en mm.

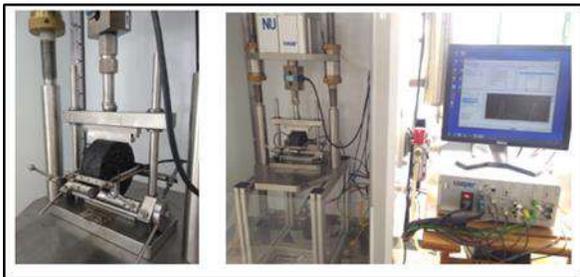
φ : diámetro de la probeta en mm.

ε_0 : deformación por tracción en $\mu\epsilon$ en el centro de la probeta.

ΔH : deformación horizontal.

v: Relación de Poisson equivalente a 0.35.

Fig. 7. Ensayo de resistencia a la fatiga.



Fuente: Autores del proyecto.

E. Efecto del agua:

Con el fin de observar la permanencia del color y el efecto del agua en su decoloración se sometieron especímenes con mezcla de pigmento de óxido de hierro a estar sumergidos

por 2 meses en agua y agitados todos los días como se observa en la Figura 8.

Fig. 8. Especímenes sumergidos para observar el efecto del agua.



Fuente: Autores del proyecto

F. Coeficiente de Fricción con el Péndulo Británico:

Para determinar el coeficiente de fricción se siguieron los procedimientos de la norma INVÍAS 792 (Instituto Nacional de Vías. 2013) para ello usaron especímenes cilíndricos que cumplieran con la superficie mínima para realizar el ensayo (89*152 mm). El ensayo consiste en cubrir totalmente con agua el área de ensayo y realizar un movimiento oscilatorio de prueba y cuatro mediciones, teniendo en cuenta que para medición anteriormente se debe aplicar agua. Lo anterior se observa en la Figura 9.



Fig. 9. Ensayo de Coeficiente de deslizamiento con el péndulo británico.

Fuente: Autores del proyecto.

G. Determinación de porcentaje óptimo de asfalto y porcentaje óptimo de pigmento de óxido de hierro:

Para establecer el porcentaje óptimo de asfalto se tuvo en cuenta las variables del diseño Marshall y los ensayos de verificación para mezclas sin pigmento de óxido de hierro.

De la misma manera, se obtiene el porcentaje óptimo de pigmento de óxido de hierro de la comparación de los resultados para cada porcentaje de los parámetros variables Marshall y los ensayos de verificación.

H. Mezcla de verificación:

Con el porcentaje óptimo de pigmento de óxido de hierro se realizó el ensayo de estabilidad y flujo para observar que este cumple con los valores mínimos.

Resultados y discusión

En cuanto a la caracterización del agregado pétreo el material tuvo la granulometría presentada en la figura 10 y los resultados de ensayos de calidad en la Tabla 1, donde se observa que el material cumple de manera satisfactoria con los requisitos establecidos en las Especificaciones de construcción de carreteras del INVÍAS 2013.

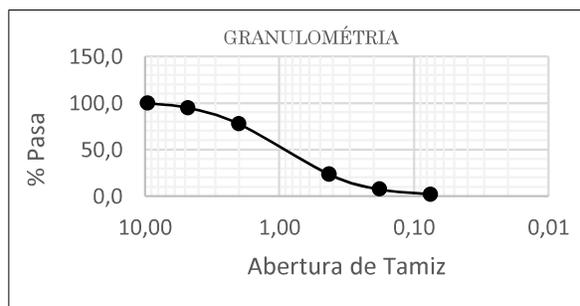


Fig. 10. Granulometría del agregado pétreo.

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 1. Resultados de la Caracterización del Agregado pétreo y contraste con las Especificaciones INVÍAS.

Ensayo y Norma	Esp. NT2	Resultado Laboratorio	Observación.
Degaste en máquina de los ángeles (INV E-218-13)	25	20	Cumple
Degradación por abrasión en Micro-Deval (INV E-238-13)	25	9,5	Cumple
Resistencia mecánica 10% de finos (INV E-224-13)	110	146,8	Cumple
Solidez en sulfato de magnesio (INV E-220-13)	18	12,77	Cumple
Impurezas del agregado grueso (INV E-227-13)	0,5	0,43	Cumple
Índice de plasticidad (INV E-125-13 y INV E-126-13)	NP	NP	Cumple
Equivalente de arena (INV E-133-13)	50	78,4	Cumple
Partículas planas y alargadas (INV E-240-13)	10	9,8	Cumple
Caras fracturadas (INV E-227-13)	60	100	Cumple

Angularidad de la Fracción fina (INV E- 239-13)	45	45,5	Cumple	(INV E- 712-13)				
Adhesividad del agregado grueso (INV E- 257-13)	Reportar	95%	Cumple	(INV E-716 o INV E- 717-13)	Viscosidad Absoluta (60°C)	1000 min	1000	Cumple
Gravedad específica agregados finos (INV E- 222-13)		2,520		(INV E- 702-13)	Ductilidad (25°C 5mm/min)	100 min	>100	Cumple
Gravedad específica de agregados gruesos (INV E-223-13)		2,620		(INV E- 704-13) *	Contenido de Agua	0,2 máx.	0,2	Cumple
Gravedad específica del llenante mineral (INV E-128-13)		2,938		(INV E- 709-13)	Punto de inflamación mediante copa abierta Cleveland (°C)	230 min	245	Cumple
				(INV E- 718-13) *	Contenido de Parafinas, %	3 máx.	2	Cumple

Fuente: Autores del proyecto.

El cemento asfáltico de índice de penetración de AC 80-100 cumple con los requisitos establecidos en las Especificaciones de construcción de carreteras del INVÍAS 2013 como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la Caracterización del cemento asfáltico y contraste con las Especificaciones INVÍAS.

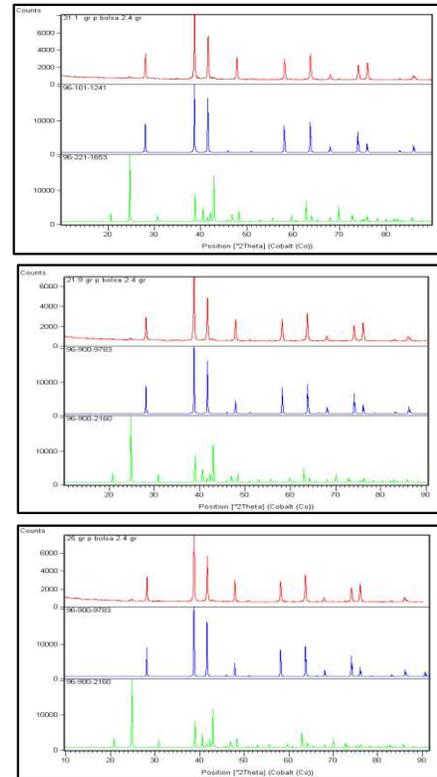
Ensayo y Norma	Esp. NT2	Resultado Laboratorio o	Observación
Penetración (25°C, 100g, 5s), 0.1 mm (INV E- 706-13)	80- 100	91.7 96 93.2	Cumple
Punto de ablandamiento	45- 52	47 47,5	Cumple

Fuente: Autores del proyecto.

Para la caracterización granulométrica del óxido de hierro se tuvo en cuenta la ficha técnica y la forma en la que era proporcionado el material. Dado que es un material tipo polvo y por su textura demasiado fina se usó el tamiz número doscientos (Nº 200). De lo anterior, se presentaron varios comportamientos del material, entre ellos al ser tan fino tendía a volverse grumoso en grandes cantidades generando el taponamiento de los orificios del tamiz, por lo anterior el tamizado se realizó a varias pasadas y se obtuvo que el 100% del material pasa el tamiz # 200, es decir, Filler.

Para el pigmento de óxido de hierro se ensayaron tres muestras en las cuales se encontraron que cuenta con composición de Hematita y Geothita. La hematita es la forma mineral de óxido de hierro cuya fórmula es Fe_2O_3 y tiene sistema cristalográfico hexagonal, la Geothita es la forma mineral del Oxihidróxido de hierro cuya fórmula es $Fe_2O_4H_2$ la cual tiene un sistema cristalográfico es ortorrómbica. De lo anterior, se encuentra que la hematita predomina de un noventa y cuatro (94) a noventa y seis (96) por ciento de la muestra del material y la Geothita de cinco (5) a tres (3) por ciento. De las tres muestras cómo se nombró anteriormente se obtuvo un perfil de patrón de difracción del material el cual se muestra de color rojo en la Figura 8 para cada muestra, hacia la parte inferior se observan los patrones de difracción de los minerales Hematita (color azul) y Geothita (color verde) los cuales son los más parecidos o de similar tendencia al material evaluado.

Fig. 11. Comparación de los perfiles de patrón de la muestra número uno, dos y tres con los de la Hematita y Geothita.



Fuente: Autores del proyecto.

Para la mezcla convencional se realizó la Tabla 3, la cual se observan en gris claro los porcentajes que no cumplieron, el gris de tono dos los valores que si cumplieron y por último en gris oscuro el óptimo. Los resultados arrojaron que el porcentaje de asfalto que mostraba mejor comportamiento de las propiedades mecánicas es el 6%, por lo tanto, para las mezclas con óxido de hierro este porcentaje será constante y se variará el porcentaje de pigmento.

Tabla 3. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

MDC 10	E*	F*	R. E/F*	%V _a *	% VAM*	% VFA*	R.P*
Esp*	750	2.0	3.0-	3.0-	16	65-	0.8
	0	-	5.0	5.0		78	-
		4.0					1.2
4.0							
4.1							
4.2							
4.3							
4.4							
4.5							
4.6							
4.7							
4.8							
4.9							
5.0							
5.1							
5.2							
5.3							
5.4							
5.5							
5.6							
5.7							
5.8							
5.9							
6.0	ÓPTIMO						
6.1							
6.2							
6.3							
6.4							
6.5							
Rango	4.0-	4.0	4.8-	5.9-	4.0-	5.3-	5.4
	6.5	6.3	6.2	6.2	6.5	6.0	6.5

*E: estabilidad

*F: Flujo

*R. E/F: Relación estabilidad/ Flujo

*%V_a: porcentaje de vacíos con aire

*VAM: Porcentaje de vacíos en agregados minerales

*VFA: Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

*R. P: Relación llenante ligante

*Esp: Especificación nivel de tránsito 2

Fuente: Autores del proyecto.

Los resultados después de realizados los respectivos ensayos para las mezclas convencional y con variación en porcentajes de pigmento de óxido de hierro son:

Gravedad específica promedio de los agregados:

La gravedad específica promedio de los agregados se encuentra afectada por la cantidad de óxido de hierro que se le adiciona la mezcla, esto por su gravedad específica diferente. Lo anterior, se debe a que el óxido de hierro tiene un peso específico de 4,7 gr/cm³ el cual es 1,762 gr/cm³ superior al valor del llenante mineral. En la Figura 12, se observa como este valor aumenta a medida que se adiciona mayor cantidad de pigmento de óxido de hierro.

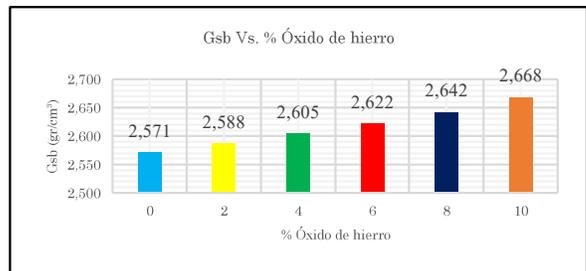


Fig. 11. Variación de la Gravedad específica promedio de los agregados con respecto al porcentaje de óxido de hierro

Fuente: Autores del proyecto.

Gravedad específica Bulk:

Los diferentes porcentajes de pigmento de óxido de hierro generan aumento del valor de la gravedad específica Bulk en un rango de 2.25% a 3.31% para los porcentajes evaluados como se observa en la Figura 13. Esto se debe a que como se mencionó anteriormente, la gravedad específica del pigmento de óxido de hierro es mayor a la del llenante mineral, además, tiene una granulometría muy fina tipo polvo lo cual genera que a pesar de que tenga la misma masa el volumen sea menor.

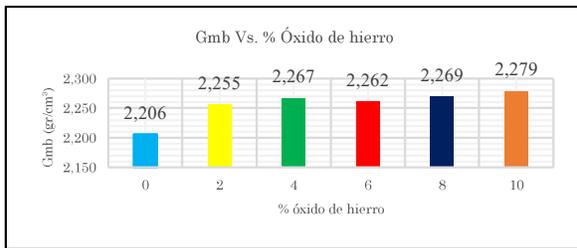


Fig. 12. Variación de la Gravedad específica Bulk con respecto al porcentaje de óxido de hierro.

Fuente: Autores del proyecto.

Gravedad máxima de la mezcla:

La gravedad máxima de la mezcla se ve afectada por el porcentaje de pigmento de óxido de hierro dado que aumenta para los porcentajes de 4, 6, 8 y 10 en un rango de 2 a 4%, y disminuye para la mezcla con 2% de pigmento de óxido de hierro en un 0.15% como se observa en la Figura 14. Lo anterior, se debe a que a pesar que la masa se reduce con respecto a la inicial después de la agitación en la cámara de vacíos para las mezclas con óxido de hierro excepto la del 2% la reducción es mucho menor que para la de la mezcla convencional, es decir, las mezclas con el pigmento tienen menor cantidad de vacíos que expulsar que la mezcla convencional.

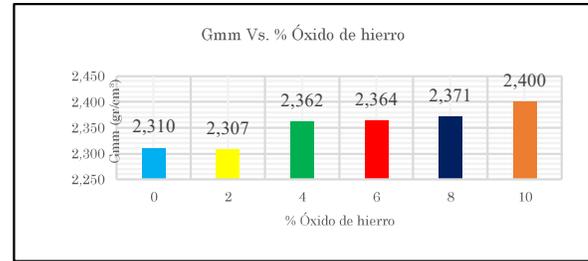


Fig. 13. Variación de la Gravedad máxima de la mezcla con respecto al porcentaje de óxido de hierro.

Fuente: Autores del proyecto.

Porcentaje de vacíos con aire:

El valor de los vacíos con aire disminuye a medida que aumenta el porcentaje de pigmento de óxido de hierro excepto para la mezcla con 10% dado que este valor aumenta y sale de la especificación (Figura 15) esto se debe a que, al ser el pigmento de óxido de hierro, un material tipo polvo tiene una mejor capacidad de adherencia con el agregado y llena los vacíos que quedan en la mezcla con el asfalto.

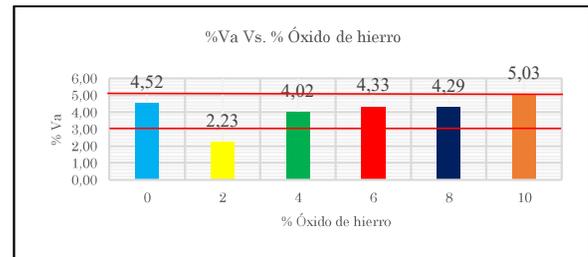


Fig. 14. Variación de los vacíos con aire con respecto al porcentaje de óxido de hierro.

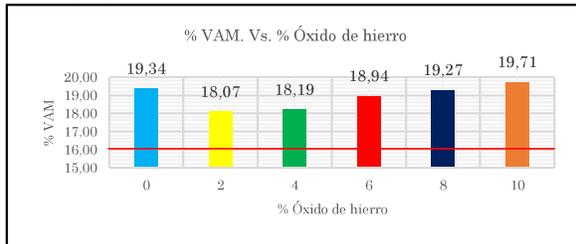
Fuente: Autores del proyecto.

Porcentaje de vacíos en agregados minerales:

De acuerdo con la Figura 16, se observa que hay un aumento de esta propiedad a medida que se aumenta el porcentaje de pigmento de óxido de hierro, es decir, tiene una relación directa y en comparación con la mezcla convencional todos los valores son inferiores excepto para la

mezcla con 10% de pigmento de óxido de hierro.

Fig. 15. Variación de los vacíos en agregados minerales con respecto al porcentaje de óxido de hierro.

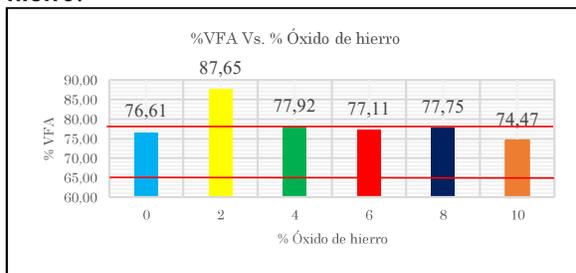


Fuente: Autores del proyecto.

Porcentaje de vacíos llenos de asfalto:

En cuanto a la variación y efecto de óxido de hierro en esta propiedad en la Figura 17 se presenta un pico de aumento de este valor para la mezcla con 2% de pigmento de óxido de hierro el cual hace que se salga de la especificación y esa mezcla no cumpla con ese requisito. Para los demás porcentajes las variaciones con mínimas y cumplen con las Especificaciones INVÍAS 2013.

Fig. 16. Variación de los vacíos llenos de asfalto con respecto al porcentaje de óxido de hierro.



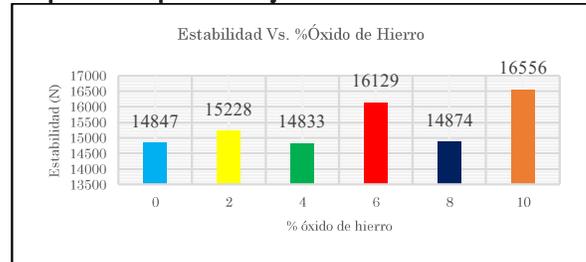
Fuente: Autores del proyecto.

Estabilidad:

Como se observa en la Figura 18 el valor de la estabilidad aumenta en gran magnitud para las mezclas con el 2, 6 y 10% de pigmento de óxido

de hierro, en menor magnitud para el 8% y se redujo para la mezcla con 4% de pigmento de óxido de hierro, es decir, la gráfica presento un comportamiento errático variable dado que tiene dos picos crecientes y dos depresiones.

Fig. 17. Variación de la Estabilidad con respecto al porcentaje de óxido de hierro.

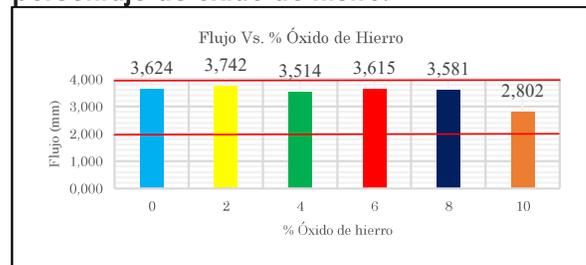


Fuente: Autores del proyecto.

Flujo:

La propiedad de flujo con variación en porcentaje del pigmento de óxido de hierro presenta un comportamiento variable en pequeñas magnitudes para el 2, 4, 6 y 8% de pigmento de óxido de hierro, mientras que para la mezcla con 10% presenta una disminución de cerca del 23% con respecto a la mezcla convencional como se observa en la Figura 19.

Fig. 18. Variación del flujo con respecto al porcentaje de óxido de hierro.



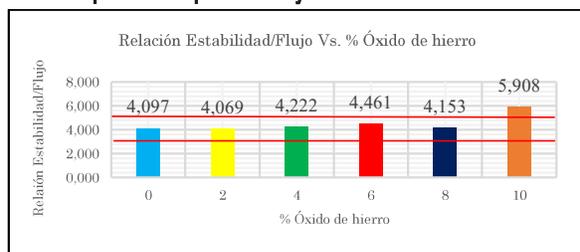
Fuente: Autores del proyecto.

Relación estabilidad/ flujo:

Según lo observado en la Figura 20 la variable de diseño relación estabilidad/ flujo tiene un comportamiento constante con una pequeña

disminución y unos pequeños aumentos, excepto para la mezcla con 10% con pigmento de óxido de hierro ya que se presenta un aumento de aproximadamente del 50% con respecto a la mezcla convencional.

Fig. 19. Variación de la relación Estabilidad/ Flujo con respecto al porcentaje de óxido de hierro.



Fuente: Autores del proyecto.

Resistencia a la deformación plástica:

Para el ensayo de resistencia a la deformación plástica se observó que a medida que se aumentaba el porcentaje de pigmento de óxido de hierro la curva de deformación disminuye. Pero en lo que respecta a la velocidad de deformación que es el parámetro crítico de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS 2013 en la Tabla 4 se tiene que el 2, 4 y 8% de pigmento de óxido de hierro cumplen con el valor máximo establecido mientras que es 6 y 10% sobrepasa el valor establecido.

Tabla 4. Variación de la velocidad de deformación con respecto al porcentaje de pigmento de óxido de hierro.

% Pigmento	Velocidad (μ /min)	Esp.	Observación.
0%	93.33	20	No Cumple
2%	20.00	20	Cumple
4%	20.00	20	Cumple
6%	26.67	20	No Cumple
8%	20.00	20	Cumple
10%	26.67	20	No Cumple

Fuente: Autores del proyecto.

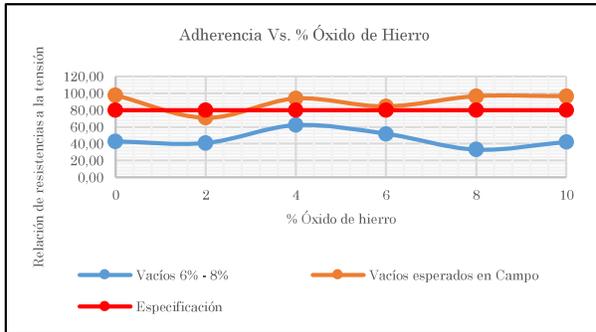
Susceptibilidad al daño por humedad:

El valor de la relación de la resistencia a la tensión se midió para especímenes con vacíos de $7\pm 1\%$ y vacíos esperados en campo, de lo cual se obtuvo la Figura 21 donde los especímenes con vacíos de $7\pm 1\%$ no cumplen con los valores mínimos establecidos en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS 2013, mientras que las mezclas con vacíos esperados en campo cumplen de manera satisfactoria.

La situación con vacíos $7\pm 1\%$ la curva de variación de la adherencia tiene un comportamiento sinusoidal donde el óxido de hierro mejora esta propiedad solo para el 4 y 6% con respecto a la mezcla convencional, pero sin cumplir con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS-2013.

Para la situación con vacíos esperados en campo se observó un comportamiento de la curva de variación de la adherencia de manera sinusoidal y que la mezcla convencional muestra un mayor valor de adherencia en comparación con las mezclas con pigmento de óxido de hierro, aunque este aumento no es significativo ya que tiene una desviación estándar de 5.5 y cumplen con el valor requisito de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS- 2013, excepto para la mezcla con 2% de pigmento de óxido de hierro ya que su valor disminuye aproximadamente de 20 unidades sin superar el valor mínimo de 80%.

Fig. 20. Variación de la adherencia para probetas con vacíos de 7±1% y vacíos esperados en campo con respecto al porcentaje de pigmento de óxido de hierro.



Fuente: Autores del proyecto.

Ensayo de tracción indirecta para la obtención del módulo resiliente de mezclas asfálticas:

Con el ensayo de módulo resiliente se tienen en cuenta tres temperaturas de 5°C 25°C y 40°C, variando los porcentajes de pigmento de óxido de hierro con el 2, 4, 6, 8 y 10%, donde se tiene en cuenta los valores respectivos de sus módulos, para la obtención de las curvas maestras.

Posteriormente se tiene en cuenta la temperatura media anual ponderada del aire de la ciudad de Tunja que es de 13 grados centígrados; esta se debe tomar como temperatura de referencia, ya que la temperatura de la mezcla asfáltica o Tmix es mayor a la temperatura ambiente por lo tanto este valor se obtiene con la carta de la Shell dando así 20 grados centígrados y obteniéndose el valor de los módulos en la Tabla 5, que se muestra a continuación.

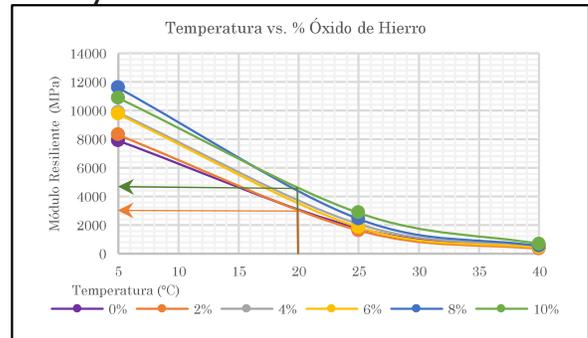
Tabla 5. Módulos resilientes obtenidos a 20 grados centígrados.

Porcentaje de óxido de Hierro	Modulo obtenido a 20°C, MPa
Convencional	3100
2	3250
4	4000
6	3500
8	4100
10	4500

Fuente: Autores del proyecto.

Se puede apreciar en la Figura 22 que el valor del módulo resiliente para los mayores porcentajes de pigmento de Óxido de Hierro tienen aumentos de módulos considerables con respecto a la mezcla convencional.

Fig. 21. Representación de módulos resilientes para cada porcentaje de pigmento con corte a temperatura de 20 grados centígrados (línea blanca).

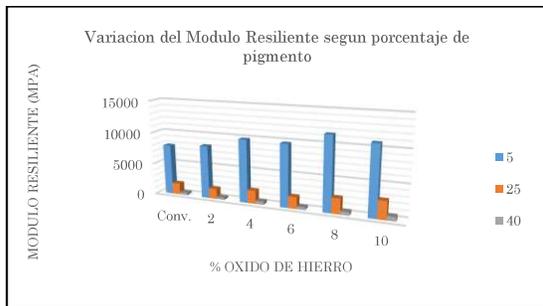


Fuente: Autores del proyecto

Por último, para este ensayo se realiza una comparación más específica con la mezcla convencional donde se ve un aumento en forma ascendente para las tres temperaturas tomadas en laboratorio, donde a medida que se adiciona más pigmento se genera la

creación de mezclas asfálticas de alto modulo como por ejemplo para los porcentajes de 8% y 10% donde sus resultados son superiores a los 10000 MPa, representados en la Figura 23.

Fig. 22. Variación del módulo resiliente con respecto al porcentaje de pigmento de óxido de hierro.



Fuente: Autores.

Efecto del Agua:

Después de someter los especímenes al efecto del agua durante dos meses, se observó que no hubo decoloración, es decir, en condiciones de saturación y condiciones climáticas lluviosas se podría predecir que el agua no generará decoloración de la capa de rodadura. Lo anterior se observa en la Figura 24.

Fig. 23. Especímenes sometidos después de saturación.



Fuente: Autores del proyecto.

Coefficiente de resistencia al deslizamiento con Péndulo Británico:

De acuerdo a los procedimientos descritos anteriormente se obtienen los resultados de coeficiente de resistencia al deslizamiento observados en las Tabla 6 en la cual los resultados obtenidos tanto para la condición seca como condición húmeda cumplen los valores admisibles establecidos en el artículo 450-13 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

Tabla 6. Resultados de Coeficiente de resistencia al deslizamiento con el Péndulo Británico.

Porcentaje	CRD Seco	CRD Hum	Esp. NT2	Observación
0	0.87	0.75		Cumple
2	1.20	0.73		Cumple
4	1.17	0.81		Cumple
6	1.19	0.80	0.55	Cumple
8	1.23	0.82		Cumple
10	1.12	0.85		Cumple

Fuente: Autores del proyecto.

Determinación del porcentaje óptimo de óxido de hierro:

De los anteriores ensayos se realiza la comparación de los resultados como se observa en la Tabla 7, siguiendo la misma convención descrita anteriormente. Se determina que con base a estos parámetros los porcentajes que presentan mezclas con mejores características mecánicas son el 5 y 7% de pigmento de óxido de hierro.

Tabla 7. Determinación de porcentaje óptimo de óxido de hierro.

	% Va *	% VFA* *	% VAM* *	E.*	F.*	R. E/F*	Ah. *	Ad. *	MR *
NT	3.0-	65-	16	7500	2.0	3.0	20	80	
2*	5.0	78			4.0	5.0			
0.0									
0.4									
0.8									
1.2									
1.6									
2.0									
2.4									
2.8									
3.2									
3.6									
4.0									
4.4									
4.8					5%				
5.2									
5.6									
6.0									
6.4									
6.8					7%				

7.2									
7.6									
8.0									
8.4									
8.8									
9.2									
9.6									
10									

- *%Va: porcentaje de vacíos con aire
 - *VFA: Porcentaje de vacíos llenos de asfalto
 - *VAM: Porcentaje de vacíos en agregados minerales
 - *E: estabilidad
 - *F: Flujo
 - *R. E/F: Relación estabilidad/ Flujo
 - *R. P: Relación llenante ligante
 - *Ah.: Ahuellamiento o resistencia a la deformación plástica
 - *Ad.: Adherencia o susceptibilidad al daño por humedad
 - M.R.: Módulo Resiliente
 - *NT2: Especificación nivel de transito 2.
- Fuente: Autores del proyecto.

Resistencia a la fatiga:

Con los porcentajes óptimos de pigmento y la mezcla convencional, se realiza la comparación mediante la representación gráfica de los valores de deformación por tracción y número de ciclos como se muestra en la Tabla 8.

Los datos que se muestran son basados en los reportes generados por el equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester), del cual se toman 8 datos totales, descartando dos de cada porcentaje, ya que con la obtención de las curvas que se muestran en la Figura 25 el valor

obtenido del coeficiente de correlación R2 era menor a 0.9 lo que significa que existe una des confiabilidad en la relación de datos y la generación de cada una de las ecuaciones para la obtención de la deformación admisible.

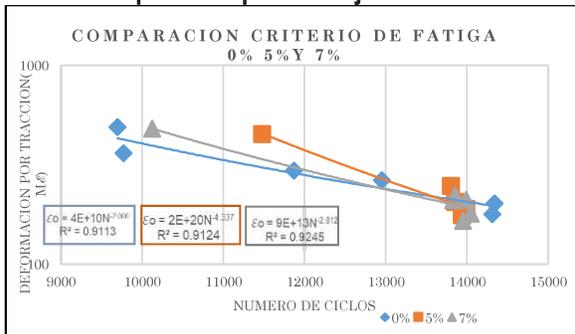
En la Figura 25 se muestran las curvas y ecuaciones de cada uno de los criterios de fatiga con valores obtenidos mediante regresión potencial.

Tabla 8. Valores obtenidos de deformación por tracción versus número de ciclos.

%	Deformación por tracción, $\mu\epsilon$	No. Ciclos
0%	360.36	9765
	486.21	9697
	262.76	12952
	293.50	11868
	201.26	14335
	177.58	14309
5%	175.86	13936
	179.65	13936
	449.41	11474
	246.69	13803
	205.23	13856
	209.18	13830
7%	221.92	13856
	163.77	13952
	209.62	13989
	478.40	10118
	179.39	14043

Fuente: Autores del proyecto.

Fig. 24. Curvas para el criterio de fatiga, obtenidas para los porcentajes estudiados.



Fuente: Autores del proyecto.

Las ecuaciones obtenidas para cada porcentaje son las siguientes.

Para Mezcla convencional:

$$\epsilon_0 = 4x10^{10} * N^{-2.006} \quad (17)$$

Para Mezcla con 5% de pigmento:

$$\epsilon_0 = 2x10^{20} * N^{-4.337} \quad (18)$$

Para Mezcla con 7% de pigmento:

$$\epsilon_0 = 9x10^{13} * N^{-2.812} \quad (19)$$

Con las tendencias y las ecuaciones que se muestran en la Figura 25 se determina que al ver el comportamiento de cada pendiente se establece que los porcentajes con menor inclinación tienen mayor resistencia a la fatiga en este caso la mezcla convencional y el 7% de pigmento de óxido de hierro son más resistentes a que exista una falla en la estructura de pavimento comparada con el 5% de pigmento de óxido de hierro ya que su inclinación es mayor. Por lo tanto, se puede decir que la vida de la estructura hasta su punto de fatiga va a ser más demorado para los porcentajes mencionados al comienzo de este párrafo.

Respecto a las ecuaciones obtenidas y al reemplazar el valor de ejes equivalentes para un nivel de tránsito NT2 (500.000-5'000.000 de ejes equivalentes de 8.2 toneladas), y tomando un valor de referencia de 1 millón de ejes equivalentes se determina el valor de la deformación mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 9. Resultados obtenidos de deformación.

Porcentaje de óxido de hierro	Deformación, $\mu\epsilon$
0	0.036817900
5	0.000001901
7	0.001208488

Fuente: Autores del proyecto.

Con estos datos se muestra que para los dos porcentajes óptimos de pigmento se ve una considerable disminución de la deformación, especialmente en la mezcla del 5% que casi no se deforma, lo mismo para la mezcla con el 7% de pigmento; dando, así como aspectos finales que el primer porcentaje se deforma menos, pero falla más rápido, con respecto al segundo que se deforma un poco más pero su resistencia a la fatiga es mayor.

Mezcla de verificación:

Con las probetas realizadas para los porcentajes óptimos se verifica el cumplimiento del valor de la estabilidad y flujo. De lo cual se obtuvo que la mezcla con 5% de pigmento de óxido de hierro tuvo una estabilidad y flujo de: 13329 Newtons y 3.14 milímetros, y para la mezcla con 7% se obtuvo un valor de estabilidad y flujo de: 16157 Newtons y 4.08 el cual se observa que la mezcla se rigidizo y por lo tanto el flujo no cumplió.

Por lo anterior, se determina que el porcentaje óptimo de pigmento de óxido de hierro es del 5%.

Conclusiones

Los agregados pétreos utilizados en la mezcla asfáltica MDC-10 fueron suministrados por la cantera TRITURADOS PAZ DEL RÍO y después de determinada su caracterización se concluye que este material cumple a cabalidad y de manera favorable con los requisitos exigidos en el artículo 450-13 de las Especificaciones INVÍAS.

En cuanto a la granulometría del material se obtuvo que el 5.3% es grava, el 92.8% es arena de trituración y el 1.9% es material tipo filler.

De la caracterización del cemento asfáltico se obtuvieron las temperaturas de mezcla y compactación de 144°C y 136°C respectivamente.

La gravedad específica promedio de los agregados (Gsb) presenta un comportamiento creciente a medida que se aumentan los porcentajes de óxido de hierro.

Con respecto a la gravedad específica Bulk (Gmb) se presenta un aumento considerable para las mezclas con pigmento de óxido de hierro en un rango de porcentajes de 2.25 a 3.31 de variación. Destacando que para cualquier porcentaje de pigmento de óxido de hierro los valores de gravedad específica Bulk no varían considerablemente entre ellos.

En cuanto a lo relacionado con la gravedad máxima de la mezcla se observa que los porcentajes iguales o superiores al 4% poseen una tendencia creciente, dando a inferir que a mayor cantidad de pigmento de óxido de hierro existe una relación directa con el aumento de esta gravedad.

En los vacíos con agregados minerales las mezclas de 2 a 10% de pigmento de óxido de hierro tienen un comportamiento creciente, es decir, a medida que aumenta el porcentaje de pigmento en la mezcla así mismo aumentan el porcentaje de vacíos en agregados minerales. Adicionalmente, se observó que esta propiedad tiene valores similares entre la mezcla convencional es y la mezcla con 8% de pigmento de óxido de hierro.

En las mezclas con 0, 4, 6 y 8% los vacíos con aire tienen comportamientos similares dado que presentan una desviación estándar de 0.20, es

decir, los vacíos con aire se ven afectados de manera drástica solo para porcentajes muy bajos o muy altos como el 10%

En los vacíos llenos de asfalto la mezcla con 2% de pigmento de óxido de hierro es el único valor atípico dentro de la tendencia de la curva.

La comparación entre el porcentaje de vacíos lleno de aire y vacíos llenos de asfalto, se observa un comportamiento inverso entre estas dos variables dado que al aumentar una variable la otra disminuía, mostrando una anomalía en el 2% ya que es el valor más alto y bajo de estas dos variables.

La estabilidad Marshall aumenta en las mezclas con pigmento de óxido de hierro con respecto a la mezcla convencional, excepto para el 4% en la cual se redujo en un 0.10%

El comportamiento del flujo no posee una variabilidad significativa excepto para el 10% en el cual su valor disminuye cerca de un 22% con respecto a la mezcla convencional pero aun así cumpliendo con los valores de las Especificaciones INVÍAS.

En todas las variables del análisis volumétrico de la metodología Marshall se presentaron resultados constantes o similares para las mezclas con porcentajes de 4, 6 y 8 excepto en la estabilidad. Las mezclas con porcentajes de 2 y 10 de pigmento de óxido de hierro adquirían un comportamiento errático que no cumplía con las Especificaciones INVÍAS 2013, es decir, porcentajes muy bajos o muy altos de pigmento de óxido de hierro afectan de manera negativa las propiedades físicas de una mezcla asfáltica MDC-10.

De acuerdo a los resultados observados en el ensayo evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad se concluye que la adherencia se ve altamente afectada en condiciones críticas de saturación, por lo tanto, se debe tener un proceso constructivo de la capa de rodadura excelente y adicionalmente usar un aditivo que mejore la adherencia para condiciones críticas.

A mayor cantidad de óxido de hierro en la mezcla se obtiene un mejor valor de módulo resiliente, es decir, el óxido de hierro aumenta el valor del módulo en la mezcla asfáltica MDC -10

En los ensayos de resistencia a la fatiga se obtiene que al aumentar la cantidad de óxido de hierro se mejora esta propiedad, pero se tiene que, para los porcentajes óptimos, uno se deforma menos al aplicar la fórmula de la regresión, y el otro tiene mayor resistencia, pero se deforma más.

Los especímenes sometidos a saturación total y parcial durante dos meses no presentaron decoloración ni el agua utilizada. Por el contrario, cuando los especímenes tienen porcentajes superiores al 6% de pigmento de óxido de hierro en condición seca la superficie se siente pegajosa y decolora un poco.

Todas las mezclas tanto convencional como las realizadas con pigmento de óxido de hierro cumplieron con el coeficiente de resistencia al deslizamiento con el Péndulo Británico mínimo establecido en el artículo 450 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS-2013, tanto en condición seca como de saturación. Las mezclas con pigmento de óxido de hierro presentaron valores similares de CRD para la condición húmeda respecto a

la mezcla convencional mientras que para la condición seca estas tuvieron valores superiores que los de la mezcla convencional.

De acuerdo con la mezcla de verificación mencionada anteriormente, se da a conocer que la mezcla con 7% de pigmento de óxido de hierro presentó una estabilidad muy alta y un flujo muy bajo, lo cual supone que esta se rigidizó. Para la mezcla del 5% se presentaron resultados favorables en estabilidad y flujo, por lo tanto, este valor se establece como el porcentaje óptimo de óxido de hierro.

Agradecimientos

Los autores del presente artículo agradecen el apoyo brindado por la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en la realización de la investigación.

Referencias

AENOR. "Asociación Española de Normalización y Certificación"

ARGOS, "Empresa de cemento del grupo Argos". Colombia. 1924

ARGOS, Institución Educativa la Sierra. Medellín. (2015). Recuperado el 10 de julio de 2018 De: <http://bibliotecadeobras.argos.com.co/Works/Internal/214>.

ARGOS, Un nuevo mundo con concreto coloreado de argos. Medellín. (2015). Recuperado el 10 de julio de 2018, De: <http://grandesrealidades.argos.co/el-concreto-de-color-conquista-el-mundo/>

A. Synnefa, T. Karlessi, N. Gaitani, M. Santamouris. D.N. Assimakopoulos y C. Papakatsikas. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and potential to improve the urban microclimate, Building and environment, no. 46 pp. 38-44, Retrieved July 10, 2018.

Byferrox. (2018). Asphalt not Only Functional and black, GLOBAL COMPETENCE CENTER CONSTRUCTION. United Kingdom: Lanxess.

EQUIPOS Y LABORATORIOS DE COLOMBIA. Cristalografía de Rayos X. Recuperado el 10 de julio de 2018 De: https://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=3087

Gálvez, Daniel, MOP (08 de abril de 2018). Dirección de Vialidad - Laboratorio Nacional, Obtenido de: <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Adherencia%20Superficial.pdf>.

García, Liliana. (2018). INFLUENCIA DEL COLOR DE LOS PAVIMENTOS EN EL CALENTAMIENTO POR RADIACION TERMICA. Girardot: Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI).

INVÍAS. (2013). "Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras," Bogotá D.C., Colombia.

INVÍAS. (2013) "Normas de ensayo de materiales para carreteras", Norma: 725, Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta. Bogotá D.C., Colombia.

INVÍAS. (2013) "Normas de ensayo de materiales para carreteras", Norma: 749, Ensayo de tensión

indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas. Bogotá D.C., Colombia.

INVÍAS. (2013) "Normas de ensayo de materiales para carreteras", Norma: 756, Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante las pistas de ensayo de laboratorio. Bogotá D.C., Colombia.

INVÍAS. (2013) "Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras", Norma: 792, Medida del coeficiente de resistencia al deslizamiento usando el Péndulo Británico. Bogotá D.C., Colombia.

INVÍAS. (2013) "Normas de ensayo de materiales para carreteras". Norma: 799, Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente.

L. C. Hernández-García, D. E. (2018). Influencia del color de los pavimentos en el calentamiento por radiación térmica. Girardot: Asociación

Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI).

L. Qingfan, V. Sina y T. Susan, (2017). Field evaluation of Red-Coloured hot mix asphalt pavements for bus rapid Transit lanes in Ontario, Canada, MDPI Coatings, No. 58.

PQUIM. (1992). "Pigmentos, pegantes, productos químicos para la industria".

Reeken, H. v. (2018, July 10). Coloured Asphalt. Obtenido de <https://colouredasphalt.com/projects/color/red/new-boulevard-strandweg-scheveningen>.

Thenoux Z., Guillermo (2002) Análisis de casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas chilenas. Santiago, Chile.

TRANSCARIBE (SITM). "Sistema integrado de transporte masivo". 2013