



EFFECTO DE LAS ADICIONES DE POLVOS DE ACERÍA (EAFD) EN LAS PROPIEDADES DE CONCRETOS ASFÁLTICOS

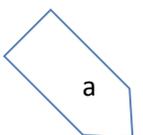
Autor

Yailuth Alexandra Loaiza Lopera

Asesor

Henry Alonso Colorado Lopera

Abril 2017, Medellín



Agradecimientos



AGRADECIMIENTOS

Quiero primero que todo agradecer al grupo de investigación Cementos, Cerámicos y Compuestos y en especial a mi director Henry Colorado por permitirme aprender de él durante estos 2 años y medio, por el apoyo y la oportunidad de hacerme parte del grupo. Espero por muchos años más poder seguir siendo parte de él.

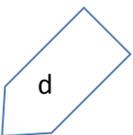
Al CIA por la financiación de este proyecto con código CODI PRV 15-1-01. A la empresa Conasfaltos donde fueron realizados muchos de los ensayos en especial al Ingeniero Sergio Cifuentes por todo el apoyo y el conocimiento transmitido y al personal del laboratorio por la ayuda permanente.

Agradezco a la Universidad de Antioquia y al departamento de Ingeniería de Materiales por acogerme y permitirme hacer parte de ellos durante tantos años. Agradezco al Jefe de Ingeniería Mecánica Pedro Simanca por dame la oportunidad de empezar mi experiencia docente.

Quiero agradecer también a mi familia por el apoyo y la paciencia durante todo este tiempo. Sin su apoyo hubiera sido muy difícil culminar el proceso.

Y por último a todos los que de alguna u otra forma hicieron parte de este proceso.

Resumen



RESUMEN

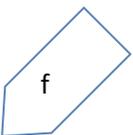
El polvo de acería o polvo de horno de arco eléctrico (EAF dust) es un desecho peligroso disponible en millones de toneladas generados por la industria metalúrgica en todo el mundo. Estos materiales son altamente variables en composición y tamaño de partícula y por lo tanto es variable en todas sus propiedades derivadas. El principal objetivo de esta investigación es evaluar este desecho en mezclas con asfalto. Se agregó hasta el 50% en peso de polvo al asfalto, el cual produce un impacto positivo al medio ambiente por razones que incluyen la disminución de la contaminación de lodos y fuentes de agua, reducción de costos y optimización de procesos; y potencialmente nuevos métodos de procedimiento mediante el uso de desechos peligrosos.

Se evaluó la microestructura y la distribución de partícula por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). Se evaluó la penetración, el punto de ablandamiento y la viscosidad en todas las mezclas obtenidas. También se les realizó caracterización química mediante espectroscopía FTIR. Con el cemento asfáltico modificado se prepararon muestras de concreto asfáltico para evaluar su desempeño en aplicaciones de construcción de carreteras mediante ensayo Marshall.

Una validación estadística de los datos fue realizada mediante el software Statgraphics, con el cual se realizó análisis ANOVA para la masa asfáltica, diseño de experimentos para el ensayo Marshall y análisis MANOVA para el concreto asfáltico.

Los resultados muestran una buena distribución de los polvos en la matriz de asfalto. La mayoría de los ensayos mecánicos muestran un ascenso en las propiedades mecánicas del asfalto (punto de ablandamiento, penetración y viscosidad) hasta la mezcla de 10%, luego ocurre un descenso de las propiedades mecánicas, lo que se puede explicar por las interacciones entre el asfalto y el desecho usado. Los resultados del ensayo Marshall muestran un concreto asfáltico con baja resistencia que puede ser mejorada con otros aditivos, en aplicaciones donde la resistencia requerida sea baja u otras aplicaciones diferentes a la construcción de vías. Sin embargo, se observa que la adición de EAFD puede mejorar propiedades en el concreto asfáltico como estabilidad, flujo y rigidez.

Abstract



ABSTRACT

Electric arc furnace (EAF) dust is a hazardous waste available in millions of tons generated by the metallurgical industry around the world. These materials are highly variable in composition and particle size, and thus variable in all derived properties. The main goal of this research is to evaluate this waste as an admixture for asphalt. Up to 50wt% of EAF dust was added as admixture to asphalt, which produced a significant positive impact to the environment for reasons including the decrease in the contamination of soil and water; a cost reduction for materials replaced in the asphalt mix, and a developed methodology for introducing wastes.

Microstructure and particle distribution was evaluated by optical, and scanning electron microscopies. Penetration, softening point, and viscosity tests were conducted over all compositions. FTIR spectroscopy tests was conducted in order to evaluate chemical features. Modified asphalt was used to prepare asphaltic concrete samples to assess its performance in road constructions application by Marshall test.

Statistic validation of data was made by the software Statgraphics, which was used to make ANOVA analysis for asphalt mastic, design of experiments for Marshall test, and MANOVA analysis for asphalt concrete.

Results show a good powder distribution in the asphalt matrix. Penetration point increased up to 10wt% of waste and then decreased. Complementarily, softening point decreased after 5wt% having a minimum in 10wt%. Then, asphalt hardness increased with the increase in the EAFD content. Penetration index (PI) and viscosity showed a similar behavior than softening point with the increase in the waste contents. These results have been explained as a consequence of the interaction between asphalt and EAF dust. Marshall test results showed an asphaltic concrete with low resistance which can be improved by adding other additives for non-critical structural applications. It is also shown that EAFD could improve stability, flow and stiffness in concrete asphalt.

Tabla de contenido



Tabla de Contenido

RESUMEN	e
ABSTRACT	g
Tabla de contenido	h
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Hipótesis	3
Capítulo 2	5
2. Marco teórico	6
2.1. Asfalto	6
2.1.1. Constitución y estructura	6
2.1.2. Clasificación	7
2.1.3. Asfalto modificado	8
2.1.4. Otros usos del asfalto	9
2.2. Electric Arc Furnace Dust (EAFD)	9
2.3. Masa asfáltica	11
Capítulo 3	13
3. Materiales y métodos	14
3.1. Cemento asfáltico	14
3.2. Diseño de experimentos	18
3.3. Concreto asfáltico	18
3.3.1. Agregados	19
3.3.2. Cemento asfáltico	19
3.3.3. Preparación de muestras para ensayo de compresión Marshall	19
3.3.4. Ensayo de densidad	21
3.3.5. Ensayo de compresión Marshall	22
Capítulo 4	24
4. Análisis de desempeño de cemento asfáltico	25
4.1. Análisis microscópico	25

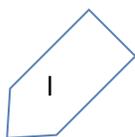
4.2. Propiedades mecánicas	30
4.3. Desempeño químico	32
4.4. Análisis y discusión	33
Capítulo 5	41
5. Análisis de desempeño de concreto asfáltico	42
5.1. Propiedades mecánicas	42
5.1.1. Cálculo de gravedades específicas	42
5.1.2. Cálculo de vacíos	44
5.2. Análisis y discusión	47
Capítulo 6	54
6. Análisis estadístico	55
6.1. Cemento asfáltico	55
6.2. Diseño de experimentos	61
6.3. Concreto asfáltico	62
Capítulo 7	68
7. Conclusiones	69
Bibliografía	71
Apéndice. Publicaciones y congresos derivados del trabajo de investigación de maestría.	78

Lista de tablas



Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de cemento asfáltico según su viscosidad (Salazar Delgado, 2013).	7
Tabla 2. Composición química representativa como porcentaje en peso de EAFD (Tápanes Robau et al., 2001).	10
Tabla 3. Propiedades del asfalto suministrado por Ecopetrol.	14
Tabla 4. Resultados de fluorescencia de rayos X, con pérdida de ignición de 11%.	15
Tabla 5. Porcentajes en peso de las mezclas preparadas.	16
Tabla 6. Granulometría de los agregados usados y su proporción en la mezcla asfáltica.	19
Tabla 7. Mezclas para concreto asfáltico.	20
Tabla 8. Valores típicos de PI en asfalto.	37
Tabla 9. Porcentaje óptimo de asfalto que cumple los criterios establecidos.	51
Tabla 10. Medidas estadísticas principales de las variables respuesta en el cemento asfáltico.	55
Tabla 11. ANOVA para las variables independientes.	56
Tabla 12. Análisis ANOVA para las variables respuesta, con un solo factor variable.	60
Tabla 13. Diseño factorial para concreto asfáltico 3^2 .	61
Tabla 14. Análisis MANOVA para las variables respuesta del concreto asfáltico.	62
Tabla 15. Análisis ANOVA para las variables respuesta con 2 factores.	66



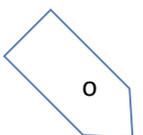
Lista de figuras



Lista de Figuras

Figura 1. Microestructura de asfalto como sistema coloidal. a) Asfalto tipo sol, b) asfalto tipo gel.	8
Figura 2. Formación de EAFD	10
Figura 3. Espectro FTIR del asfalto base usado para las mezclas.	15
Figura 4. Análisis DRX de EAFD, a) patrón de difracción, b) análisis Rietveld.	16
Figura 5. a) Asfalto en contenedores como es suministrado, b) de EAFD, c) asfalto, d) Celda de seguridad El Guacal donde se depositan residuos peligrosos en Heliconia, Antioquia, Colombia.	17
Figura 6. a) Proceso de preparación de las mezclas, b) ensayo de penetración.	18
Figura 7. Preparación de muestras de concreto asfáltico. a) Mezclador industrial, b) Martillo compactador Marshall.	21
Figura 8. Montaje para realizar medidas de altura, peso en aire, peso en agua y peso después de sumergido.	22
Figura 9. Ensayo Marshall. a) Baño María, b) Máquina de ensayo Marshall.	23
Figura 10. Microscopia electrónica de barrido de EAFD a) 500, b) 20000 aumentos.	25
Figura 11. Distribución de tamaño de partícula.	26
Figura 12. Microscopia electrónica de barrido del asfalto modificado con EAFD con adición de 10 %.	27
Figura 13. Imágenes de SEM para asfalto con diferente contenido de EAFD.	28
Figura 14. EDS-SEM para asfalto con EAFD.	29
Figura 15. Imágenes de microscopía óptica de asfalto con EAFD.	29
Figura 16. Muestras con diferentes contenidos de EAFD: a) Punto de ablandamiento, b) penetración, c) índice de penetración.	31
Figura 17. Resultados de ensayo de viscosidad para asfalto con diferente contenido de EAFD, a 60 °C, bajo la norma ASTM D4402.	32
Figura 18. FTIR para asfalto con EAFD.	33
Figura 19. Partícula de EAFD rodeada por una interface y el asfalto. a) menos de 10% de EAFD, b) más de 10% de EAFD.	36
Figura 20. Distancia entre partículas en función del contenido de EAFD.	36
Figura 21. Monograma de Van der Poel, b) módulo de rigidez calculada en base al Monograma de Van Der Poel (Poel & Der, 1954).	38
Figura 22. Variación de las propiedades mecánicas con respecto a la distancia entre partículas, a) distancia entre partículas, b) penetración y punto de ablandamiento, c) viscosidad y módulo de rigidez.	40
Figura 23. Ensayos de gravedad específica en las muestras. A) Gravedad específica máxima, b) Gravedad específica de la mezcla, c) densidad.	44
Figura 24. Resultados cálculo de vacíos, a) de aire, b) en el agregado mineral, c) rellenos con asfalto.	46

Figura 25. Resultados ensayo Marshall. a) Estabilidad Marshall, b) flujo Marshall.	47
Figura 26. Rigidez Marshall de concretos asfálticos.	49
Figura 27. a) Relación de gravedad específica bulk con contenido de asfalto modificado, b) relación de resistencia Marshall con gravedad específica bulk.	50
Figura 28. Resultados de ensayo Marshall con contenido de asfalto óptimo para cada contenido de EAFD. a) Estabilidad, b) Flujo, c) RM, d) Porcentaje de vacíos de aire, e) Gravedad específica bulk, f) Densidad, g) Máxima gravedad teórica, h) Vacíos llenos de asfalto, i) Vacíos en agregado mineral.	52
Figura 29. Mecanismo de asfalto modificado y agregados a) 0% de EAFD, b) 10% de EAFD, c) 20% de EAFD.	53
Figura 30. Gráficos de dispersión para las variables respuesta.	58
Figura 31. Gráficos de medias para las variables respuesta.	59
Figura 32. ANOVA grafico de los resultados, a) ANOVA gráfico para estabilidad, b) ANOVA gráfico para flujo, c) ANOVA gráfico para rigidez.	64
Figura 33. Gráfico de efectos de las variables, a) variable respuesta estabilidad, b) variable respuesta flujo, c) variable respuesta rigidez.	65



Capítulo 1

Introducción



1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El rezago vial del país está dado por la poca inversión en infraestructura y en investigación en los materiales de construcción. Según Invías, de los 11323.93 kilómetros de carreteras que están a su cargo, es decir vías primarias, el 77% se encuentra pavimentado, de esa red que se encuentra pavimentada, el 56% se encuentra en buen estado para el año 2014 (Instituto Nacional de Vías, 2014). Eso sin contar con las vías secundarias y terciarias que están a cargo de los departamentos y municipios respectivamente y que además es inconcebible que una vía primaria no esté en buen estado y peor aún que no se encuentre pavimentada. Lo que conlleva al deterioro en la calidad del transporte terrestre tanto de carga como de pasajeros, aumentando el costo del transporte y el costo de los productos cuando llegan finalmente al usuario sumado a eso se pueden generar accidentes de tránsito con consecuencias fatales (Noticias UNO, 2014). No sólo estos son factores que retrasan la infraestructura vial del país, sino también el creciente parque automotor que no va al mismo ritmo del desarrollo vial.

Según la World Steel Association, la producción mundial de acero fue de 1640 millones de toneladas para el año 2014, China es el líder mundial en cuanto a cantidad producida (World Steel Association, 2015). Los aceros se pueden producir mediante hornos básicos de oxígeno (BOF, Basic Oxygen Furnace) o mediante hornos de arco eléctrico (AEF, Arc Electric Furnace). Sin embargo AEF es el horno más usado, el cual representa actualmente 60% de la producción de acero en Estados Unidos, por ser un horno más versátil, con bajos niveles de contaminación y con un costo de producción un poco más económico (Grupo Arlam, n.d.). Los hornos de arco eléctrico generan altas turbulencias y altas temperaturas de trabajo lo que promueve la volatilización de elementos presentes en la carga, tales como hierro y zinc y algunas veces de metales pesados tales como el cadmio y el plomo, estos elementos volátiles son succionados del horno y condensados (Madías, n.d.), lo que produce un material fino (-200 M, pasante malla 200) con altos contenidos de metales, que de llegar a ser vertidos a un lugar no adecuado puede ser un peligro potencial para la salud humana, la flora y la fauna. EAFD que fueron reutilizados en este proyecto provienen de hornos de arco eléctrico y están constituidos principalmente por óxidos de hierro, de zinc y de calcio, lo que los diferencia de otros desechos de la misma fuente es que estos contienen diferentes cantidades de óxidos de zinc y de hierro (Bacinschi et al., 2012; Bafghi, Karimi, & Adeli, 2013; Best & Pickles, 2001; De Araújo & Schalch, 2014; Delvasto, Aldao, & Ravotti, 2011; Hwang, Sun, Huang, & Peng, 2010; Lenz & Martins, 2007; Oreščanin et al., 2007;

Capítulo 1

Pickles, 2009; Ruiz, Clemente, Alonso, & Alguacil, 2007; Salihoglu, Pinarli, Salihoglu, & Karaca, 2007; Tsilika & Komninou, 2007; Vieira, Sanchez, Monteiro, Lalla, & Quaranta, 2013; Zeng, Liu, Wang, Qiu, & Chen, 2014). EAFD ha sido estabilizado con éxito con materiales cementicios tales como cemento y asfalto (Alsheyab & Khedaywi, 2013), sin embargo la investigación en los fenómenos que allí ocurren ha sido poca.

El asfalto ha sido ampliamente usado como material cementicio en la construcción de carreteras, sin embargo, la alta susceptibilidad térmica limita sus aplicaciones, por lo tanto, los asfaltos modificados son elegidos para uso en carreteras donde la propiedad deseada sea la alta durabilidad. La modificación de asfaltos se ha realizado en su gran mayoría con materiales poliméricos que pueden ser reciclados o de primer uso y en menor proporción con fibras y rellenos minerales (Pérez & López, 2013). El polvo de caucho de llanta ha sido el modificador de asfalto de mayor uso y el que más se ha investigado, por lo que las mejoras que genera en el asfalto son eficazmente comprobadas, estas mejoras se deben a la alta viscosidad del asfalto modificado, mejorando la resistencia al ahuellamiento, el punto de ablandamiento, la resiliencia, el agrietamiento por fatiga y la susceptibilidad a alta temperatura, además de eso, mejora la durabilidad, reduce los costos de mantenimiento y disminuye el impacto ambiental usando materiales reciclados (F. Zhang & Hu, 2015).

Por las razones anteriormente descritas es necesario desarrollar investigaciones en los pavimentos asfálticos mezclados con EAFD, los cuales se convierten en un problema ambiental tanto en el ámbito nacional como en el ámbito mundial. Es por esto que se deben determinar las propiedades microestructurales, físicas, químicas y mecánicas de las mezclas de asfalto con EAFD.

1.2. Hipótesis

El asfalto contiene moléculas altamente polares, llamadas asfaltenos que pueden ser adsorbidas sobre la superficie de partículas minerales, lo cual hace un asfalto más blando, porque las moléculas polares del asfalto son las encargadas de darle la rigidez.

1.3. Objetivos

Los objetivos del trabajo de investigación son:

Objetivo general

- Desarrollar un concreto asfáltico modificado con EAFD obtenido de desechos de la industria del acero.

Objetivos específicos

- Desarrollar cementos asfálticos con incorporaciones de EAFD para determinar mediante caracterización y análisis estadístico cual es el porcentaje óptimo que puede ser agregado al asfalto.
- Estudiar el efecto de la concentración de EAFD en las propiedades mecánicas, fisicoquímicas y microestructurales de las mezclas asfálticas para optimizarlas.
- Mejorar el comportamiento de los concretos asfálticos en su campo de aplicación para evitar daños en vías y así disminuir costos de mantenimiento.

Capítulo 2

Marco teórico



2. Marco teórico

2.1. Asfalto

2.1.1. Constitución y estructura

El asfalto es un material bituminoso sólido o semisólido que contiene en su estructura principalmente asfaltenos y maltenos los cuales le dan consistencia y ductilidad, respectivamente. El asfalto tiene características cementantes a temperatura ambiente, su viscosidad varía con la temperatura y a medida que se calienta se licua y sirve como unión en materiales pétreos. También se usa para estabilizar las diferentes capas que conforman los pavimentos.

Los materiales asfálticos son asfaltos producidos de la destilación del petróleo para extraer solventes y aceites volátiles, se pueden clasificar dependiendo de su vehículo de incorporación o aplicación en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, ya sea calor, agua o solventes, respectivamente.

Las características de un asfalto están determinadas por su constitución (composición química) y su estructura (constitución física), de las moléculas en el material.

El asfalto es una compleja mezcla de moléculas, los cuales son predominantemente cadenas hidrocarbonadas. Los principales componentes del asfalto y su proporción son:

Carbón 82-88%

Hidrógeno 8-11%

Sulfuros 0-6%

Oxígeno 0-1.5%

Nitrógeno 0-1%

La composición de los asfaltos dependerá de la fuente y del procesamiento de extracción. De acuerdo a la estructura, el asfalto está constituido por asfaltenos y maltenos, los maltenos a su vez están constituidos por saturados, aromáticos y resinas (J Read, Whiteoak, & Bitumen, 2003).

Capítulo 2

2.1.2. Clasificación

Las características físicas de los asfaltos permiten establecer clasificaciones entre ellos, tales características son viscosidad, penetración y punto de ablandamiento. Esta clasificación también define su campo de aplicación, siendo la clasificación mediante punto de ablandamiento la más utilizada mundialmente. En la Tabla 1 se observa la clasificación de asfaltos según su punto de ablandamiento y su equivalencia en viscosidad (Salazar Delgado, 2013).

Tabla 1. Clasificación de cemento asfáltico según su viscosidad (Salazar Delgado, 2013).

Grado de penetración	Clasificación	Viscosidad a 60 °C (Poise)
40-50	AC-40	4000 ± 800
60-70	AC-20	2000 ± 400
85-100	AC-10	1000 ± 200
120-150	AC-5	500 ± 100
200-300	AC-2.5	250 ± 50

Para cumplir con estándares de calidad cada tipo de asfalto base debe cumplir unos requisitos mínimos de penetración, punto de llama y punto de ablandamiento.

El asfalto es considerado como un sistema coloidal, consistente de micelas de asfaltenos de alto peso molecular, dispersas en un medio de más bajo peso molecular el cual es maltenos. En presencia de cantidades suficientes de resinas y aromáticos, los asfaltenos estarán completamente dispersos en el medio y presentan buena movilidad, este tipo de asfalto es conocido como tipo *sol*, si la relación aromáticos/resina, no es suficientemente grande, los asfaltenos no pueden dispersarse bien y por lo tanto tienden a aglomerarse, a esto se le conoce como un asfalto tipo *gel* (J Read et al., 2003). Ambos tipos de asfalto se observan en la Figura 1.

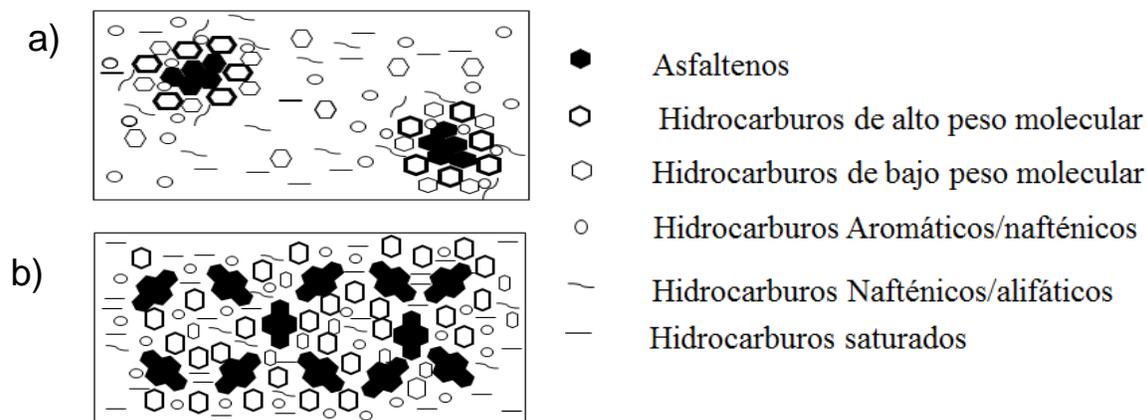


Figura 1. Microestructura de asfalto como sistema coloidal. a) Asfalto tipo sol, b) asfalto tipo gel.

2.1.3. Asfalto modificado

La naturaleza del cemento asfáltico lo hace susceptible a los cambios de temperatura y al daño por humedad. Estos presentan fallas tales como deformaciones a altas temperaturas y a bajas temperaturas agrietamiento, por lo tanto, es necesario modificarlo con aditivos que se le agregan al asfalto y le confieren mayor resistencia y durabilidad. Los tipos de modificadores de asfalto varían según su naturaleza física y química y según la propiedad a modificar.

Según su naturaleza física y química los modificadores de asfalto son (Lapuente Aragón, n.d.):

- Aceites o alquitranes.
- Rellenos minerales.
- Azufre.
- Polímeros.

Estos últimos son los más usados por su bajo costo y además se ha demostrado que son efectivos mejorando las propiedades del asfalto, debido a que muchos de los polímeros usados presentan grupos funcionales que reaccionan con el asfalto, ejemplos de estos son los elastómeros funcionalizados los cuales forman enlaces con los grupos carboxílicos presentes en asfaltenos (Polacco *et al.*, 2004).

Según la propiedad que modifican, los tipos de modificadores son (Marín Hernández, 2004):

- Modificadores de reología: Principalmente polímeros.
- Aditivos extendedores: Azufre.
- Aditivos endurecedores.

Capítulo 2

- Aditivos ablandadores.
- Aditivos rejuvenecedores.
- Rejuvenecedores en reciclado.
- Rejuvenecedores en asfalto modificado.
- Fibras: Celulosa, asbesto, poliéster, polipropileno, entre otros.
- Aditivos mejoradores de adherencia: Cal.

2.1.4. Otros usos del asfalto

El principal uso del asfalto ha sido en la construcción de carreteras, ya sea para tráfico liviano o pesado, incluso muy pesado como la construcción de vías en aeropuertos para tránsito de aviones, sin embargo, el asfalto también tiene otras aplicaciones no tan conocidas, entre ellas están (J Read et al., 2003):

- Construcción de vías de trenes
- Puentes
- Aplicaciones de recubrimientos
- Superficies coloreadas
- Pinturas decorativas

2.2. Electric Arc Furnace Dust (EAFD)

Dada la premisa de que todo proceso de producción genera residuos, las plantas de producción de acero no son ajenas a ella. Si bien es cierto que la no generación de residuos es utópica, no es tan utópica la reutilización de ellos. Durante el proceso de producción de acero en hornos de arco eléctrico se generan gases producto de la oxidación y reducción de los componentes de la chatarra y de la volatilización de los elementos aleantes a causa de las altas temperaturas alcanzadas las cuales pueden llegar a ser de 1600 °C. Estos gases son recolectados por los sistemas de captación de aire y llevados a las casas de humo donde son condensados. Por cada tonelada de acero producido se generan de 15 a 20 kg de este residuo EAFD, es decir entre 1.5 y 2.0 % del total de acero producido. Anualmente se producen en el mundo desde 2.9 a 5.7 millones de toneladas de EAFD (Lenz & Martins, 2007). En Colombia se producen 1.7 millones de toneladas anuales de acero aproximadamente (Portafolio, 2014). La composición química de EAFD varía con el tipo de acero producido y los elementos aleantes utilizados. En la Figura 2 se puede observar el mecanismo de formación de EAFD. En la Tabla 2 se presenta la composición química representativa de EAFD (Electric Arc Furnace Dust) (Tápanes Robau, Alvarez Palacios, & Charles Senguden, 2001).

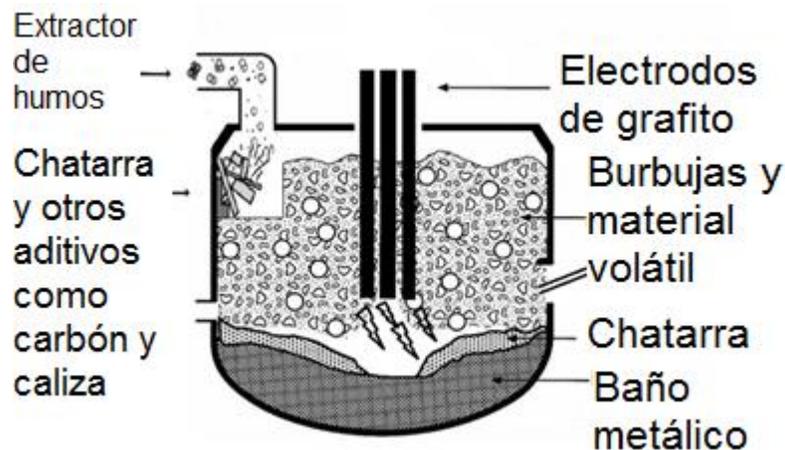


Figura 2. Formación de EAFD

Tabla 2. Composición química representativa como porcentaje en peso de EAFD (Tápanes Robau et al., 2001).

Elemento	% en peso
FeO	0,31-23,74
Fe ₂ O ₃	0,0-94,70
SiO ₂	2,40-3,90
Al ₂ O ₃	0,20-0,7
CaO	0,20-1,10
MgO	0,20-0,5
Mn	0,0-0,07
P	≤0,50
S	≤0,02

EAFD es considerado un desecho peligroso por su alto contenido de metales pesados, tales como Plomo (Pb), Cadmio (Cd), y Cobre (Cu).

Uno de los procesos más prácticos y económicos para tratar desechos peligrosos es la solidificación/estabilización (S/S). La solidificación según la definición de EPA (EPA, n.d.), es el proceso por el cual un desecho es encapsulado formando un material sólido, restringiendo la migración de elementos contaminantes por la disminución del área superficial expuesta a la lixiviación o por el cubrimiento del desecho con un material de baja permeabilidad. La solidificación puede estar dada por una reacción química en el desecho y un material aglutinante o por un

proceso mecánico. A la solidificación de partículas finas se le llama microencapsulación y a la de partículas gruesas macroencapsulación. La estabilización se refiere a un proceso químico por el cual reduce el área de lixiviación inmovilizando el desecho o reduciendo su solubilidad. Los materiales con características cementantes que sirven como aglutinantes en S/S pueden ser de carácter orgánico o inorgánico; los de carácter orgánico pueden ser asfalto o carbón activado; los de carácter inorgánico son cemento, cenizas volantes o sulfuros.

Se han desarrollado muchos métodos para el tratamiento de la industria metalúrgica tales como los procesos pirometalúrgicos y los hidrometalúrgicos, sin embargo, estos han sido parcialmente exitosos debido a que la recuperación de los metales valiosos no es eficiente, es costoso y comúnmente genera otros subproductos más contaminantes (Lenz & Martins, 2007). Por otro lado se encuentra el proceso de solidificación/estabilización (S/S) el cual es un método económico y simple para estabilizar desechos peligrosos comparado con otros métodos (Camareno & Esquivel, 2006) y el asfalto es frecuentemente usado como agente estabilizador. El asfalto es una solución competitiva debido a que es un material económico, y de procesamiento simple, y tiene un buen funcionamiento como estabilizador (Mattus, 1988).

2.3. Masa asfáltica

La mezcla entre asfalto y partículas cerámicas de tamaño milimétrico (filler), se le conoce como *masa asfáltica*, la adición de *fillers* al asfalto ha demostrado ser un factor fundamental en las propiedades de impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica, en cuanto a aplicaciones de construcción de carreteras, ya que las partículas finas ayudan a disminuir la cantidad de vacíos en mezclas asfálticas con agregados (“Canteras el Cerro,” n.d.).

El asfalto ha sido durante mucho tiempo usado para la construcción de carreteras, sin embargo, este material posee baja resistencia para ser usado tal y como es obtenido debido a su alta susceptibilidad térmica, por esta razón es necesario modificar el asfalto para mejorar dichas propiedades. Muchos países han realizado esfuerzos para modificar los asfaltos, tales como España, Estados Unidos y China (Moreno-Navarro, Sol-Sánchez, Rubio-Gámez, & Segarra-Martínez, 2014), (West, Rada, Willis, & Marasteanu, 2013), (Chen, Lin, & Wu, 2011), (Zhou et al., 2015). Ellos han usado caucho, rellenos minerales y fibras como agentes modificadores, los cuales han demostrado ser eficientes en mezclas con asfalto, mejorando propiedades tales como resistencia a la deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico (Zhou et al., 2015), (Universidad de los Andes, 2005). Estudios anteriores han demostrado el efecto de rellenos minerales en asfaltos. Al-Suhaibani, Al-Mudaiheem, & Al-Fozan, 1992, usaron cemento Portland, humo de sílice y cenizas volantes para demostrar que el efecto

de los rellenos minerales es directamente proporcional con el tamaño y el tipo de partículas y causan un efecto en el comportamiento del asfalto. Khedeywi & Alsheyab, Mohammad A, 2014, usaron EAFD en concreto asfáltico, para evaluar propiedades tales como flujo y estabilidad Marshall, rigidez, peso unitario, vacíos ocupados con asfalto y vacíos en agregados minerales (Khedeywi & Alsheyab, Mohammad A, 2014). También se han usado fibras de acrílico como modificador, logrando aumentar la resistencia a la deformación plástica y reducir la susceptibilidad a los cambios térmicos (Moreno-Navarro et al., 2014).

El asfalto también ha sido usado como agente estabilizador de desechos peligrosos y radiactivos con contenidos de metales pesados, en este estudio se encontró que el asfalto puede ser considerado un buen método para disponer materiales peligrosos debido a que logra solidificarlos y hacer estos residuos menos contaminantes y lixiviables (Mattus, 1988).

EAFD ha sido usado en ladrillos (Domínguez & Ullman, 1996), reciclaje de metales (Lenz & Martins, 2007), cemento Portland (Colorado, Garcia, & Buchely, 2016), cambio de fase de materiales (Ma, 2016) y también se ha demostrado su uso en asfalto (Loaiza, Cifuentes, & Colorado, 2015, 2017).

Este trabajo presenta una opción viable para disminuir la contaminación ambiental por la disposición segura de uno de los residuos generados en la industria del acero, así como también disminuir los daños en las vías, reducir costos de mantenimiento y el uso desmedido de los recursos naturales. También se busca con este desarrollo generar conocimiento tanto de la industria del asfalto y del acero y en ese sentido establecer el uso de materiales de construcción que sean económicos y no perjudiciales para el medio ambiente.

Capítulo 3

Materiales y métodos



3. Materiales y métodos

3.1. Cemento asfáltico

La empresa Colombiana Ecopetrol suministró el asfalto grado 60-70 para este proyecto. La Tabla 3 muestra las propiedades del asfalto suministrado

Tabla 3. Propiedades del asfalto suministrado por Ecopetrol.

Propiedades físicas de asfalto					
Análisis	Unidad	Resultado	Especificación	Método	
Viscosidad a 60 °C	cP	242000		ASTM 4402	D
Viscosidad a 80 °C	cP	21750		ASTM 4402	D
Viscosidad a 100 °C	cP	3725		ASTM 4402	D
Viscosidad a 135 °C	cP	395		ASTM 4402	D
Viscosidad a 150 °C	cP	217.5		ASTM 4402	D
Ductilidad	cm	140	≥100	Asfalto VENT	
Gravedad API	Grados API	6.9		ASTM 4052	D
Densidad a 15 °C	Kg/m ³	1021.7		ASTM 4052	D
Penetración a 25 °C	mm/10	60	60-70	Asfalto VENT	
Índice de penetración	N/A	-1		Asfalto VENT	
Pérdida de masa (RTFO)	g/100g	0.48	≤1.0	Asfalto VENT	
Punto ablandamiento	de °C	49.2	45-55	Asfalto VENT	
Punto de inflamación	°C	294	≥232	ASTM	
Solubilidad tricloroetileno	en %	99.7	≥99.0	Asfalto VENT	

Mediante espectrometría por transformada de Fourier (FTIR), se identificaron los principales enlaces en las moléculas del asfalto, el ensayo fue realizado en un aparato Shimadzu con longitudes de onda desde 500 a 3500 cm⁻¹, se usó una pastilla de Bromuro de Potasio (KBr), el espectro es mostrado en la Figura 3. Las principales bandas mostradas en 2877 cm⁻¹ y 2824 cm⁻¹ están asociadas al estiramiento asimétrico C-H de CH₃ y CH₂ y el estiramiento simétrico C-H de CH₂

de las cadenas de hidrocarburos. La banda que aparece en 1601 cm^{-1} corresponde al doble enlace C=C en los anillos bencénicos y a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-H. La banda en 1471 cm^{-1} es atribuida al movimiento de tijereteo en el enlace C-H. Estas bandas se presentan similares a las reportadas por la literatura (Carneiro et al., 2013).

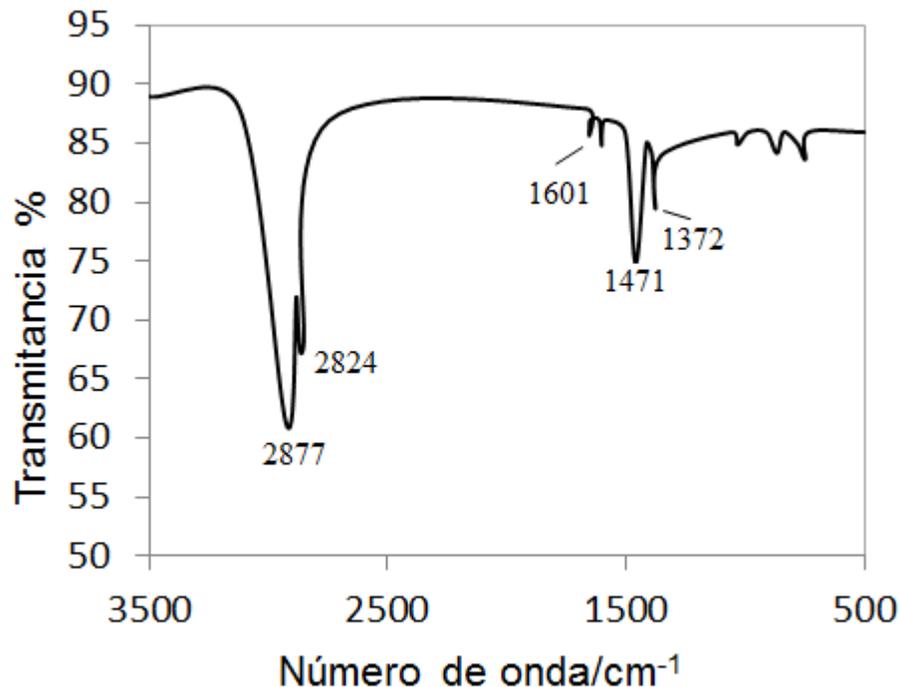


Figura 3. Espectro FTIR del asfalto base usado para las mezclas.

EAFD fue suministrado por la empresa Ternium S.A., cuya granulometría es pasante maya 200. La composición de EAFD fue medida por fluorescencia de rayos X con un equipo Thermo model Optim'x, los resultados son mostrados en la Tabla 4, donde se muestra que los principales componentes son óxido de hierro (Fe_2O_3 : 21.5%) y óxido de zinc (ZnO : 50.4%)

Tabla 4. Resultados de fluorescencia de rayos X, con pérdida de ignición de 11%.

Oxide	ZnO	Fe_2O_3	Na_2O	MgO	Mn_3O_4	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Al_2O_3	SrO
wt%	50.40	21.54	3.38	2.55	2.43	2.12	1.90	1.32	1.20	0.77	0.004
Oxide	BaO	Cr_2O_3	P_2O_5	CuO	HfO ₂	TiO ₂	PbO	NiO	V_2O_5	ZrO ₂	LOI
wt%	0.472	0.26	0.172	0.19	0.115	0.035	0.025	0.020	0.006	0.001	11

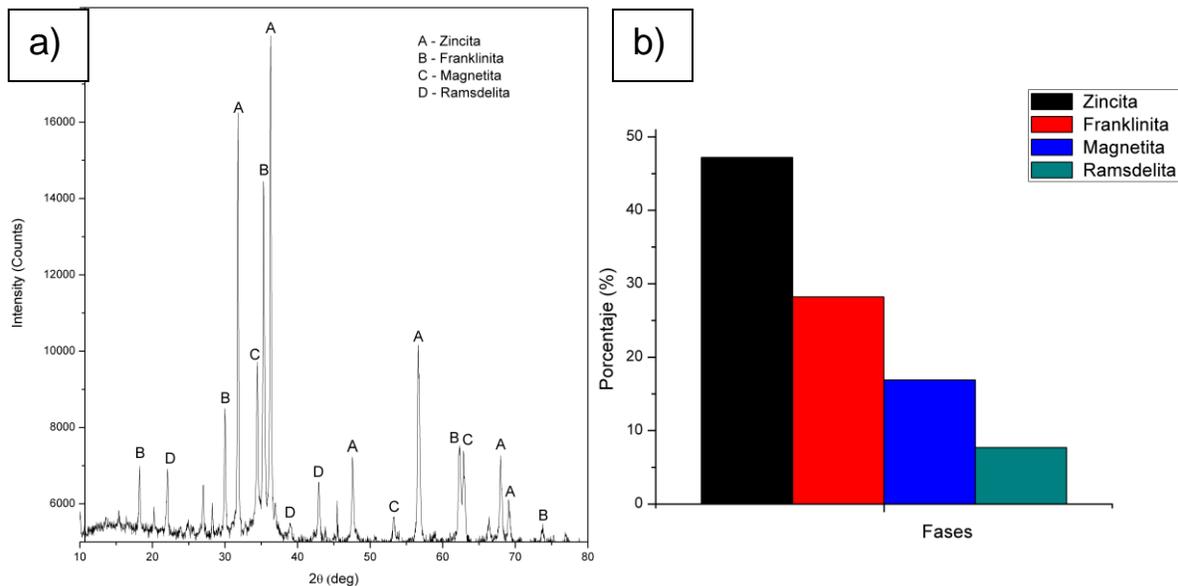


Figura 4. Análisis DRX de EAFD, a) patrón de difracción, b) análisis Rietveld.

La caracterización estructural de EAFD se hizo mediante difracción de rayos X (DRX), la muestra fue pulverizada hasta malla 400 y en el ensayo se le aplicó radiación en el rango 2θ desde 10° a 80° . El patrón fue analizado mediante el software HighScore Plus. La Figura 4a muestra el patrón de difracción de rayos X para EAFD. se observan las principales fases identificadas en la muestra, las cuales son Zincita (ZnO), Franklinita ($(\text{Fe,Mn,Zn})^{2+}(\text{Fe,Mn})^{3+}_2\text{O}_4$), Magnetita (Fe_3O_4) y Ramsdelita (Mn_4O_8). Mediante el método de Rietveld, se cuantificaron las fases presentes, las cuales fueron: Zincita (47.2%), Franklinita (28.2%), Magnetita (16.9%) y Ramsdelita (7.7%), el resultado se puede observar en la Figura 4b.

Se realizaron mezclas de asfalto con 0.0 (Asfalto base), 1.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0 y 50.0% en peso de EAFD. Las mezclas fueron realizadas en un agitador mecánico Velp Scientifica durante 1 hora a 155°C a 200 RPM para garantizar la buena distribución de las partículas. La Tabla 5 resume las proporciones de las mezclas preparadas.

Tabla 5. Porcentajes en peso de las mezclas preparadas.

Muestra	A-0D	A-1D	A-5D	A-10D	A-20D	A-30D	A-50D
wt% Asfalto	100	99	95	90	80	70	50
wt% EAFD	0	1	5	10	20	30	50

El ensayo de penetración se realizó siguiendo la norma ASTM D5 a una temperatura de 25°C , en un penetrómetro tipo Controls. La penetración es un indicador de la suavidad del asfalto, los asfaltos con alto número de penetración son llamados asfaltos suaves y son usados en climas fríos, mientras que los asfaltos

Capítulo 3

más duros, es decir con menor número de penetración, son usados en climas con altas temperaturas. El ensayo de punto de ablandamiento se lleva a cabo como lo indica la norma ASTM D36, en un aparato básico de anillo y bola mostrado. La microscopía electrónica de barrido (MEB) se realizó tanto al asfalto como a EAFD antes y después de ser mezclados.

La Figura 5a muestra los recipientes es los que se suministra el asfalto por la empresa y la forma en la que se calienta en una hornilla para extraerlo. La consistencia del EAFD y del asfalto se muestra en la Figura 5b y c respectivamente. La Figura 5d muestra una panorámica de una de las celdas de seguridad que tiene el relleno El Guacal, ubicado en el municipio de Heliconia en Antioquia. Actualmente EAFD solo se dispone en estas celdas y no tiene ningún uso práctico. El procedimiento de mezclado y los ensayos de penetración se muestran en la Figura 6.



Figura 5. a) Asfalto en contenedores como es suministrado, b) de EAFD, c) asfalto, d) Celda de seguridad El Guacal donde se depositan residuos peligrosos en Heliconia, Antioquia, Colombia.

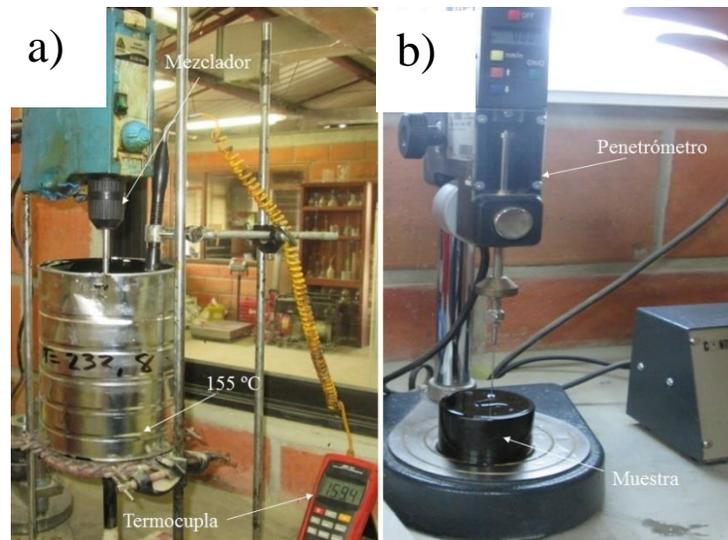


Figura 6. a) Proceso de preparación de las mezclas, b) ensayo de penetración.

La distribución de las partículas fue observada con un microscopio óptico Leica. Las muestras de asfalto con EAFD fueron obtenidas depositando cada una de las mezclas en una placa de vidrio y luego observadas en el modo de luz transmitida.

Para la evaluación por SEM-EDS, las muestras fueron recubiertas con una capa de oro de 1nm de espesor, en un equipo Hummer 6.2 (15 mA AC por 30 segundos) system para hacerlas conductoras. El equipo SEM utilizado fue un equipo JEOL JSM 6490LV en modo de alto vacío. El análisis de la distribución del tamaño de partícula fue realizado por análisis de imagen con el software Image-J versión 1.50e.

3.2. Diseño de experimentos

Los resultados de los ensayos realizados fueron validados mediante análisis estadístico en el software para análisis estadísticos Statgraphics, con un análisis ANOVA para los resultados, así como también se realizó diseño de experimentos para las mezclas de concreto asfáltico y estos resultados también fueron validados mediante análisis del diseño de experimentos y análisis MANOVA.

3.3. Concreto asfáltico

Luego de elaborar la masa asfáltica, se procedió a elaborar con esta, mezclas de concreto asfáltico para evaluar su desempeño.

Capítulo 3

Con el fin de determinar estabilidad y flujo se realizaron las mezclas de concreto asfáltico y estas fueron falladas en una Máquina Universal de Ensayos. Las muestras elegidas para realizar el ensayo fueron determinadas mediante el diseño de experimentos y el análisis de datos realizado a la masa asfáltica.

3.3.1. Agregados

Se usó un agregado de tipo trituración proporcionados por la planta de Conasfaltos, Bello, con las características mostradas en la Tabla 6, para preparar una Mezcla de alto módulo (MAM).

Tabla 6. Granulometría de los agregados usados y su proporción en la mezcla asfáltica.

Tamaño de agregado	Porcentaje de pasante (Tamiz No.)									Norma						% en la mezcla
	1"	¾"	½"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 200	1"	¾"	½"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 200		
1" (25.4mm)	100	100	31	1	1	1	0.8	95-100	95-100	25-60	0-10	0-10	0-10	0-1	15	
¾" (19.1mm)	100	100	34	4	1	1	0.6	100-100	90-100	20-55	0-15	0-5	0-10	0-1	22	
<5/16" (7.93mm)	100	100	100	99	79	46	9.8	100-100	100-100	100-100	100-100	70-80	39-46	5-10	61.8	
Cal (2mm)	100	100	100	100	100	80									1.2	

3.3.2. Cemento asfáltico

Se usó la masa asfáltica fabricada en la sección anterior, se escogieron las formulaciones con 0%, 10% y 20% de EAFD, ya que no se evidenciaron diferencias significativas en las propiedades con las formulaciones de 1% y 5% de EAFD, de acuerdo al análisis ANOVA de los resultados.

3.3.3. Preparación de muestras para ensayo de compresión Marshall

Se fabricaron muestras de 101.6 mm de diámetro y aproximadamente 63.5 mm de espesor. Inicialmente los agregados fueron secados durante 24 horas en un horno, luego se pesó la cantidad necesaria para cada una de las muestras y nuevamente se pusieron en el horno. Se utilizaron 3 proporciones de masa asfáltica en el concreto asfáltico empezando en 5.0% con incrementos de 0.5% hasta 6.0% para determinar la cantidad óptima de asfalto modificado en la muestra, se elaboraron dos muestras para cada una de las formulaciones, para un total de 18

muestras, la Tabla 7 resume las formulaciones para las mezclas preparadas. La masa asfáltica, los agregados y el barril mezclador fueron precalentados a 160 °C durante mínimo una hora. Luego de eso se realizó la mezcla en un mezclador industrial, observado en la Figura 7a para obtener una distribución homogénea y una completa cobertura del asfalto en los agregados. Se pesó aproximadamente 1200 g para cada una de las muestras y estos se pusieron en un molde cilíndrico para la compactación, una pala precalentada se introdujo dentro del molde para ayudar a acomodar los agregados en la mezcla, 15 veces en el perímetro y 10 en el centro. El molde fue puesto en el pedestal de compactación de martillo Marshall, mostrado en la Figura 7b y se aplicaron 75 golpes por cada una de las caras del cilindro, la muestra fue retirada del molde y dejada enfriar a temperatura ambiente. Se repitió el mismo procedimiento para cada una de las muestras.

Tabla 7. Mezclas para concreto asfáltico.

Muestra	Contenido de EAFD	Contenido de asfalto	Contenido de agregado	Total
1-2	0	5	95	100
3-4	0	5.5	94.5	100
5-6	0	6	94	100
7-8	0.5	4.5	95	100
9-10	0.5	5.0	94.5	100
11-12	0.5	5.5	94	100
13-14	1	4	95	100
15-16	1	4.5	94.5	100
17-18	1	5	94	100



Figura 7. Preparación de muestras de concreto asfáltico. a) Mezclador industrial, b) Martillo compactador Marshall.

3.3.4. Ensayo de densidad

Luego de enfriar las muestras durante mínimo 12 horas se hicieron las medidas de altura y de peso de las probetas. Se tomaron tres medidas de peso, peso en aire, peso en agua y peso después de sumergido en agua, de estos datos se calculó: gravedad específica bulk, gravedad teórica máxima, densidad, porcentaje de vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos de asfalto. El montaje para las mediciones se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Montaje para realizar medidas de altura, peso en aire, peso en agua y peso después de sumergido.

3.3.5. Ensayo de compresión Marshall

Las probetas cilíndricas fueron puestas en baño María durante treinta minutos a 60 °C y luego fallada en una máquina de ensayo Marshall Master Loader Humbold modelo HM-3000, que aplicó una carga de presión a la probeta y dió como resultados la fuerza máxima soportada por la muestra y el flujo plástico o deformación permanente ocasionada. A partir de estos datos se calculó la rigidez Marshall. El equipo para baño María y la máquina de ensayo se muestran en la Figura 9.

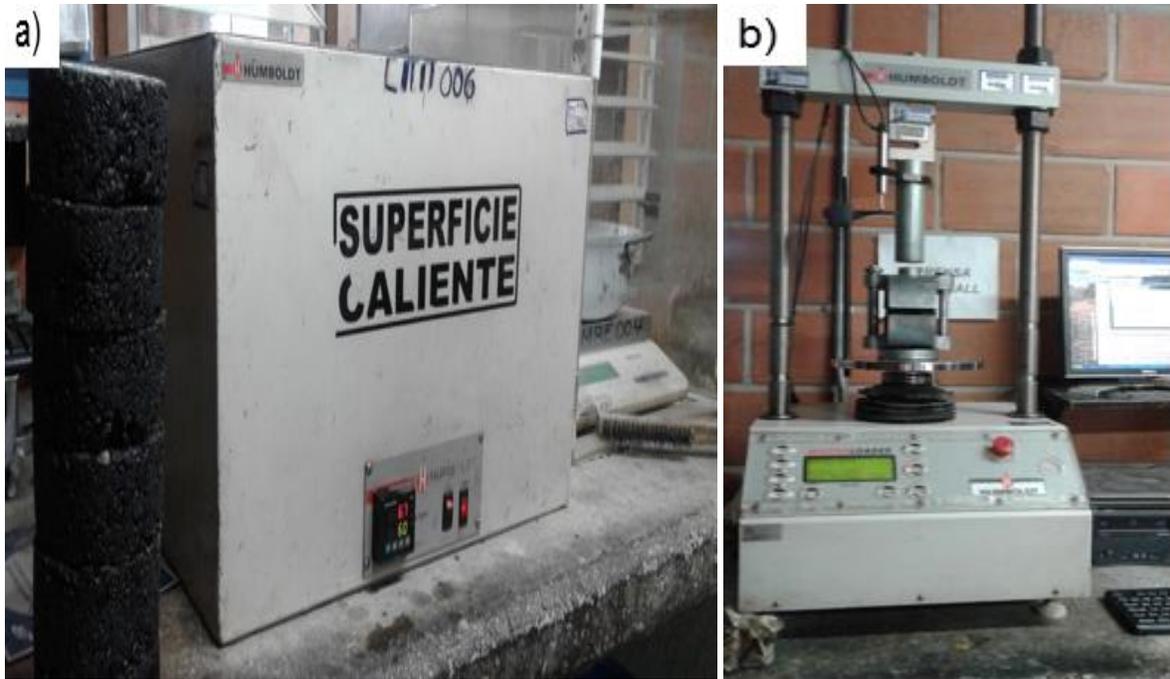
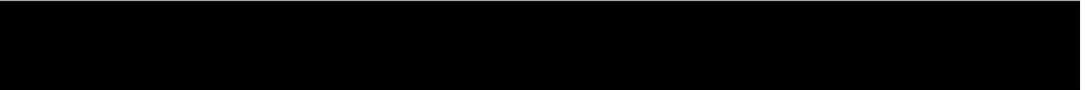


Figura 9. Ensayo Marshall. a) Baño María, b) Máquina de ensayo Marshall.

Capítulo 4

Análisis de desempeño de cemento asfáltico



4. Análisis de desempeño de cemento asfáltico

4.1. Análisis microscópico

EAFD visto por microscopía electrónica de barrido (MEB), Figura 10a y Figura 10b, confirman que este material es ultra fino, pasante maya 200. Se han realizado muchas investigaciones con este material, particularmente en cementos y concreto, pero con polvos de tamaño de partícula mayor.

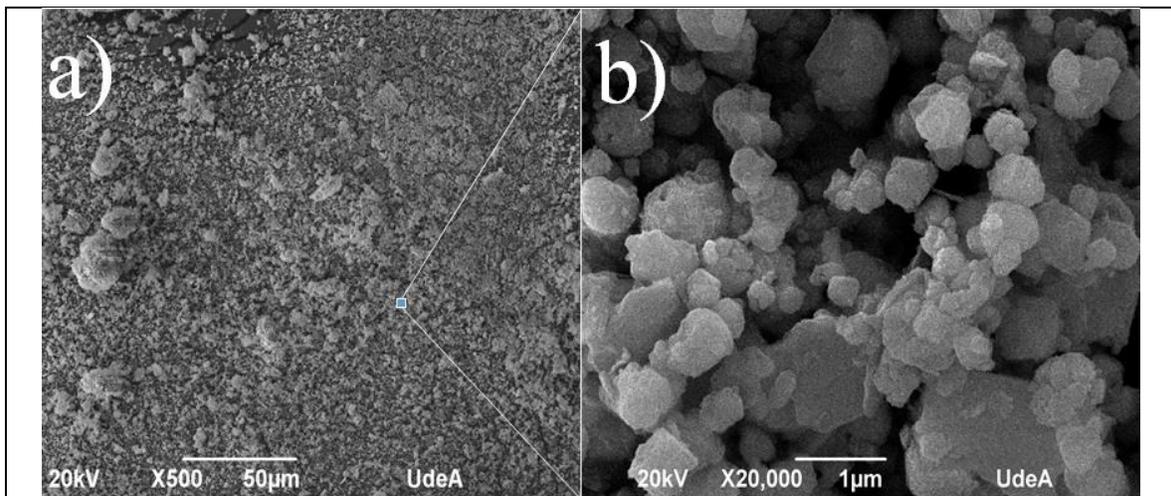


Figura 10. Microscopía electrónica de barrido de EAFD a) 500, b) 20000 aumentos.

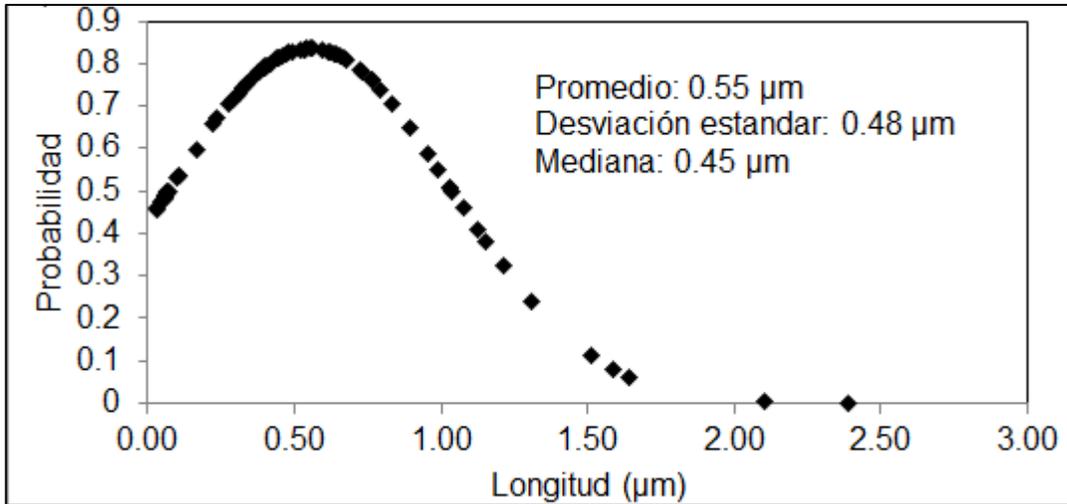


Figura 11. Distribución de tamaño de partícula.

La Figura 11 revela que la mayoría de las partículas son pequeñas y su tamaño se encuentra por debajo de 1 µm. De la Figura 11 también se observa que cerca del 50% de las partículas tiene un tamaño menor a la media, que es de 0,55 µm, esto concuerda con lo publicado en la literatura (Machado et al., 2006).

La Figura 12 revela una imagen típica de la distribución de las partículas en el asfalto. La imagen es tomada sobre la superficie de una muestra directamente. Se puede observar que el asfalto cubre totalmente las partículas, lo cual indica la estabilización de EAFD. En general todas las mezclas tienen una buena distribución de partículas, esto puede observarse en la Figura 15 de las microfotografías obtenidas mediante microscopía óptica. Este resultado confirma que el proceso es apropiado por su efectividad y economía.

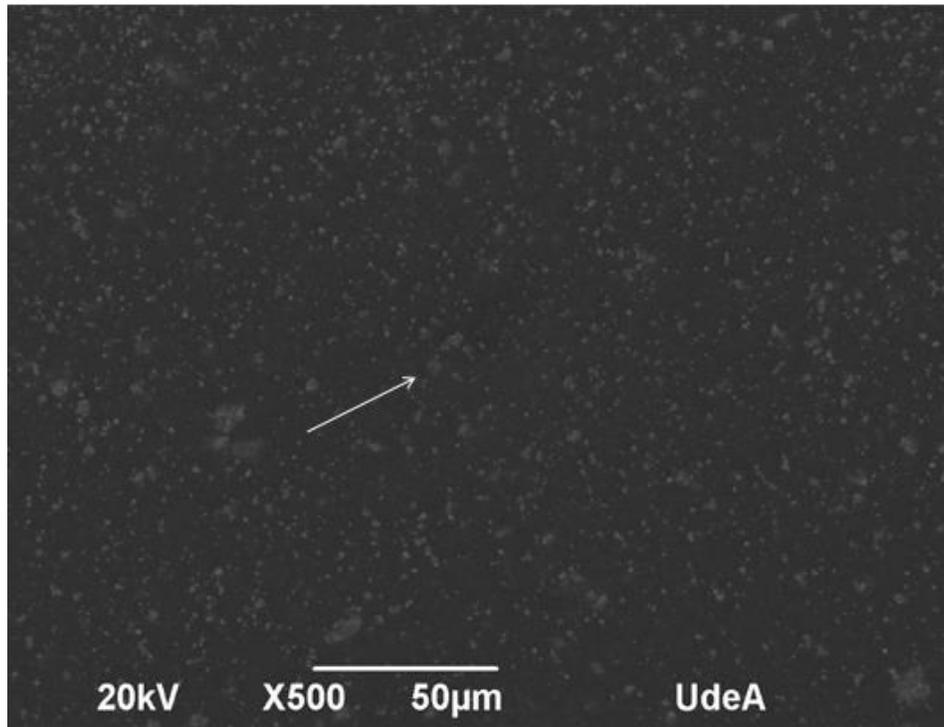


Figura 12. Microscopia electrónica de barrido del asfalto modificado con EAFD con adición de 10 %.

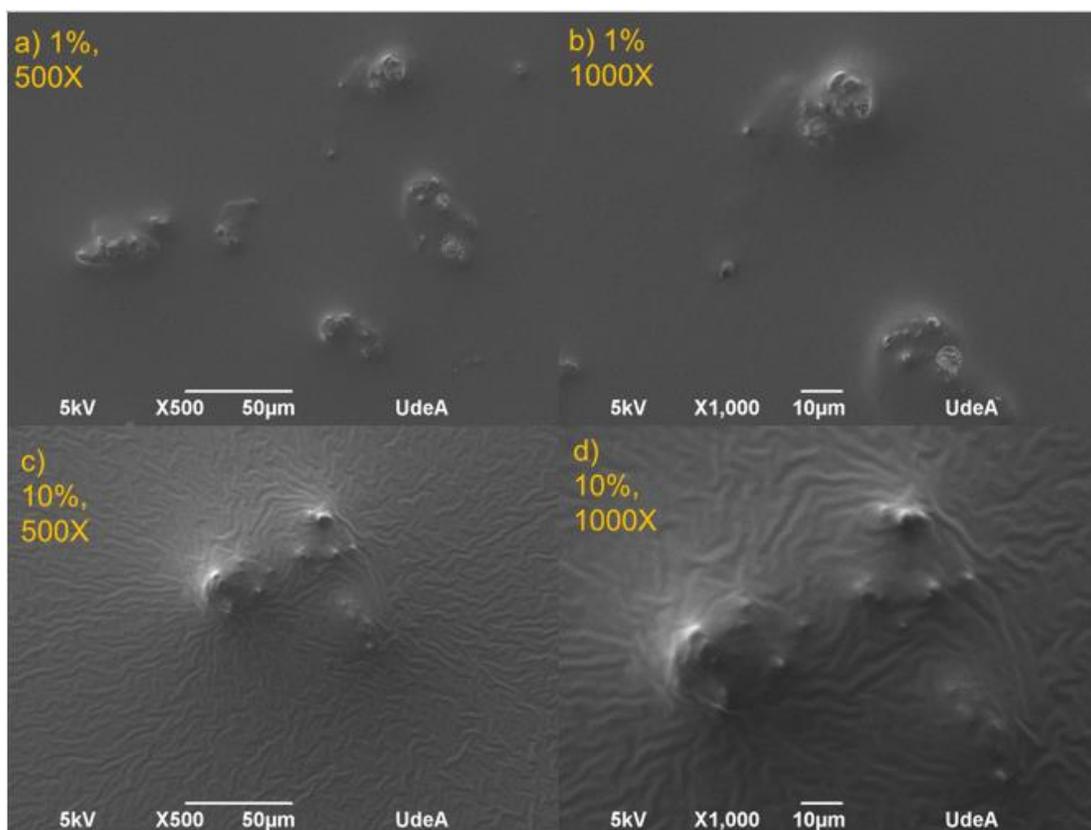


Figura 13. Imágenes de SEM para asfalto con diferente contenido de EAFD.

La superficie de las muestras observadas bajo microscopía SEM también mostró cambios topográficos. Para muestras con contenido del 1% de EAFD, la superficie es relativamente suave, Figura 13a y, mientras que para el asfalto con 10% de EAFD muestra una superficie con líneas de flujo, Figura 13c y Figura 13d lo cual explica de cierta manera los resultados de los ensayos de comportamiento mecánico.

La Figura 14 muestra un mapa EDS sobre una muestra con 10% de EAFD y la composición cuantitativa al lado derecho. En la composición se puede observar la presencia de Fe y Zn de EAFD. El pico de carbono corresponde al carbono presente en el asfalto, además también se observa la presencia de azufre del asfalto. El resultado más significativo de este ensayo es que algunos de los elementos más peligrosos, tales como Pb y Cr encontrados con la fluorescencia de rayos X para EAFD y reportados en la Tabla 4, no fueron hallados en la muestra modificada con 10% de EAFD. Esto sugiere que el asfalto tiene la capacidad de enmascarar estos elementos a niveles no detectables por el equipo SEM-EDS.

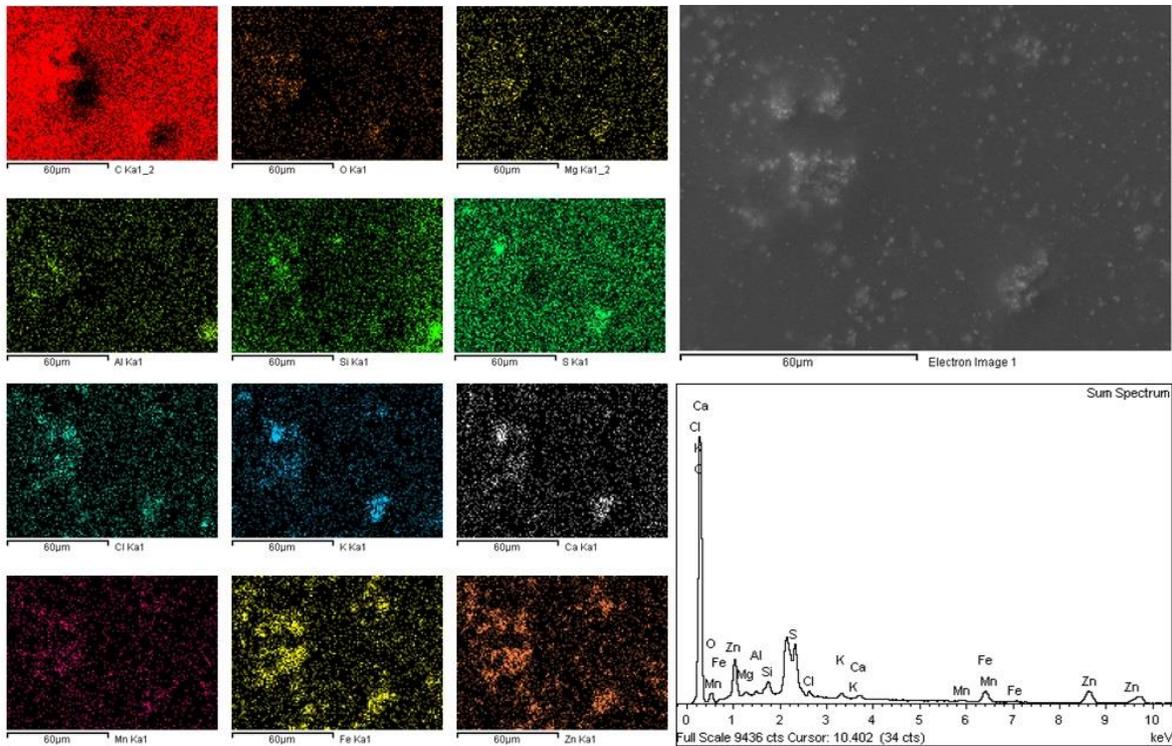


Figura 14. EDS-SEM para asfalto con EAFD.

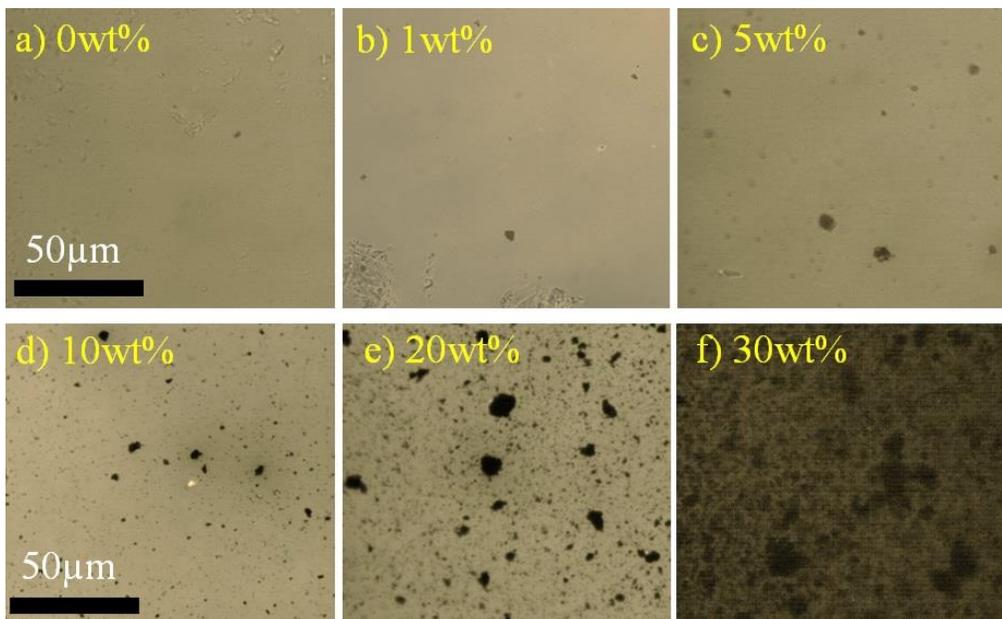


Figura 15. Imágenes de microscopía óptica de asfalto con EAFD.

4.2. Propiedades mecánicas

Los resultados del ensayo de penetración se muestran en la Figura 16b donde se nota que el máximo valor está a 10wt% y el mínimo a 50wt%. Los resultados del ensayo de punto de ablandamiento se muestran en la Figura 16a donde es evidente que son inversamente proporcionales a los resultados de penetración, esto es, el punto más blando corresponde a la mezcla con 10wt% de EAFD.

El índice de penetración (PI) fue hallado con la ecuación *Ecuación 1* (Pfeiffer & Van Doormaal, 1936).

$$PI = \frac{1952 - 500 * \log(P) - 20 * SP}{50 * \log(P) - SP - 120} \quad \text{Ecuación 1}$$

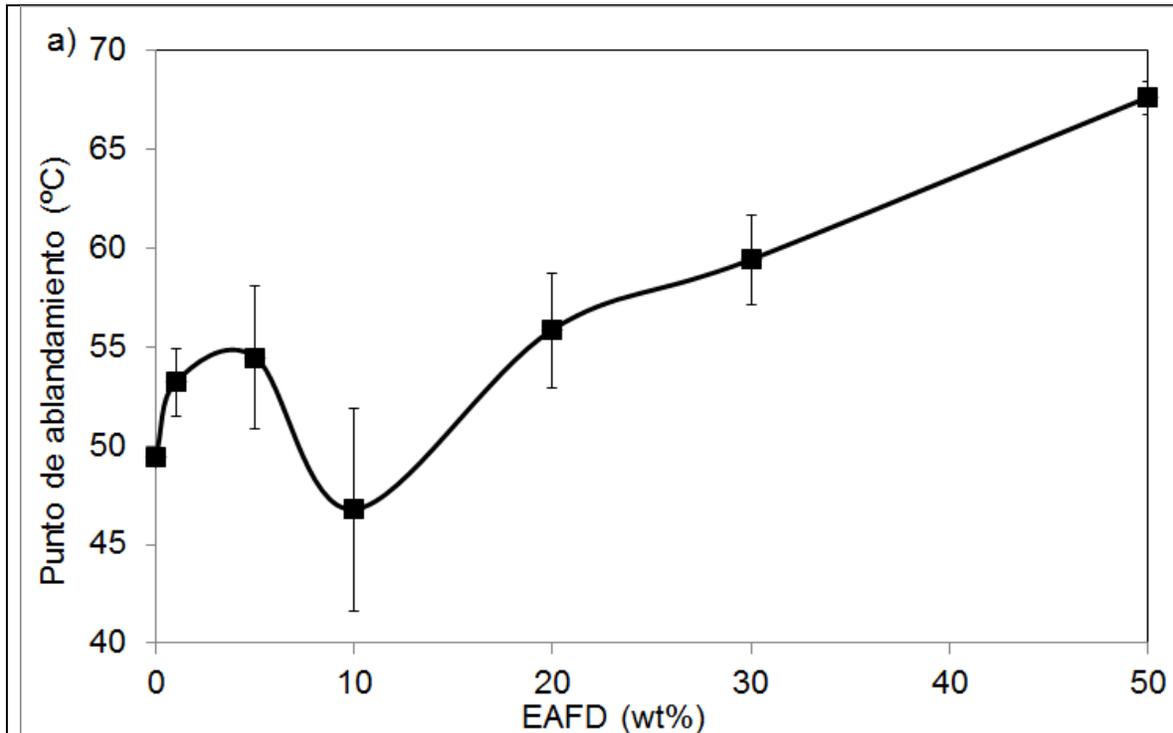
Donde:

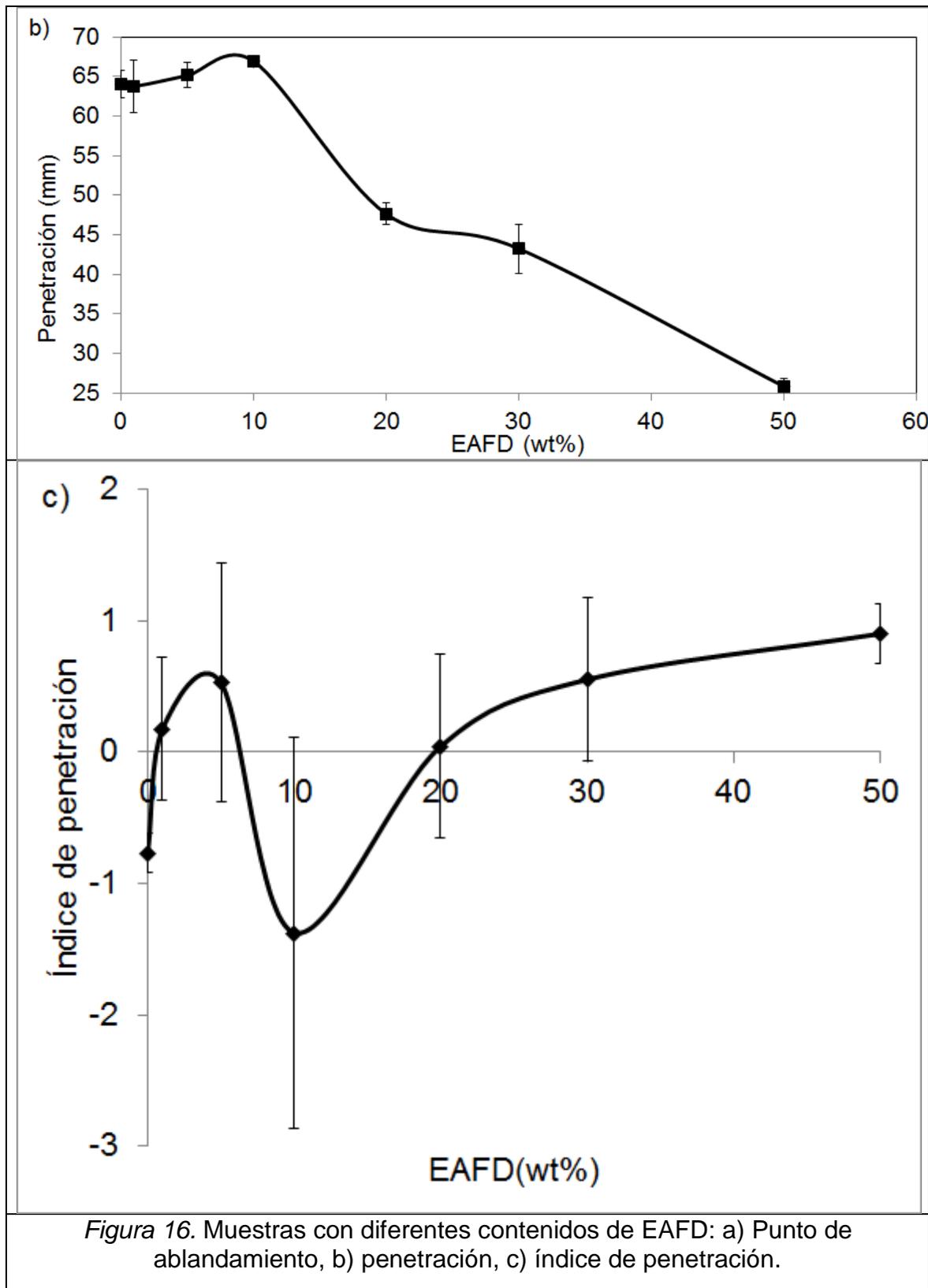
P: Penetración

SP: Punto de ablandamiento

Los resultados del índice de penetración son mostrados en la Figura 16c.

En general, el asfalto es más suave cuando se incrementa el contenido hasta el 10% en peso de EAFD, sin embargo, cuando se incrementa más del 10%, el asfalto se vuelve más duro.





Los resultados del ensayo de viscosidad, como era de esperarse, incrementan con el incremento del contenido de EAFD, los resultados son observados en la Figura 17. Sin embargo, en 10% de contenido de EAFD, la viscosidad se reduce. Estos resultados sugieren que en 10% de contenido de EAFD, el asfalto cambia significativamente su comportamiento mecánico y en este punto ocurre uno de los mecanismos de modificación del asfalto.

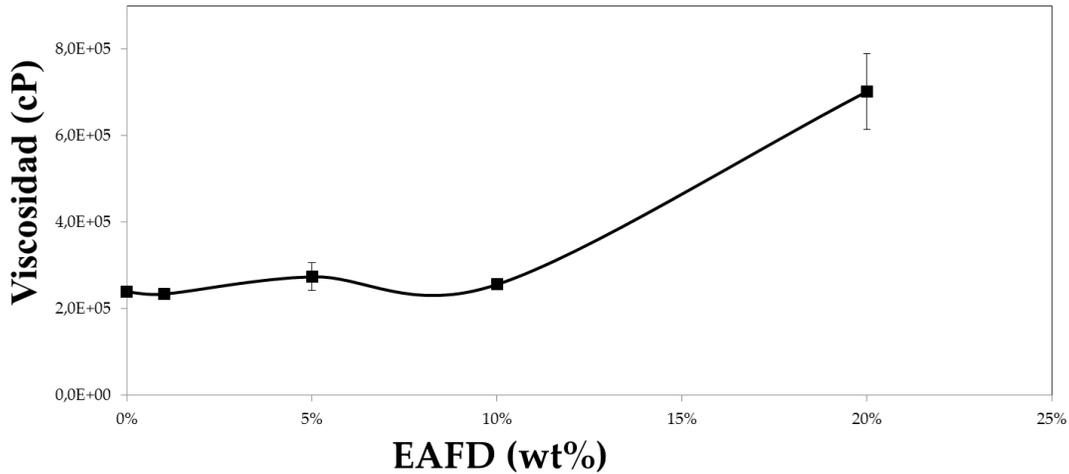


Figura 17. Resultados de ensayo de viscosidad para asfalto con diferente contenido de EAFD, a 60 °C, bajo la norma ASTM D4402.

4.3. Desempeño químico

Los espectros de FTIR sobre las muestras de 0.0, 1.0, 10.0 y 20.0% de EAFD, muestra que cuando EAFD es adicionado al asfalto, aparece una nueva señal alrededor de los 2727 cm^{-1} , esta señal está indicando una vibración del enlace C-H de la molecula $\text{RC}=\text{OH}$ ("Infrared spectroscopy for organic chemist. Web resources," n.d.). La Figura 18 muestra los resultados del ensayo FTIR.

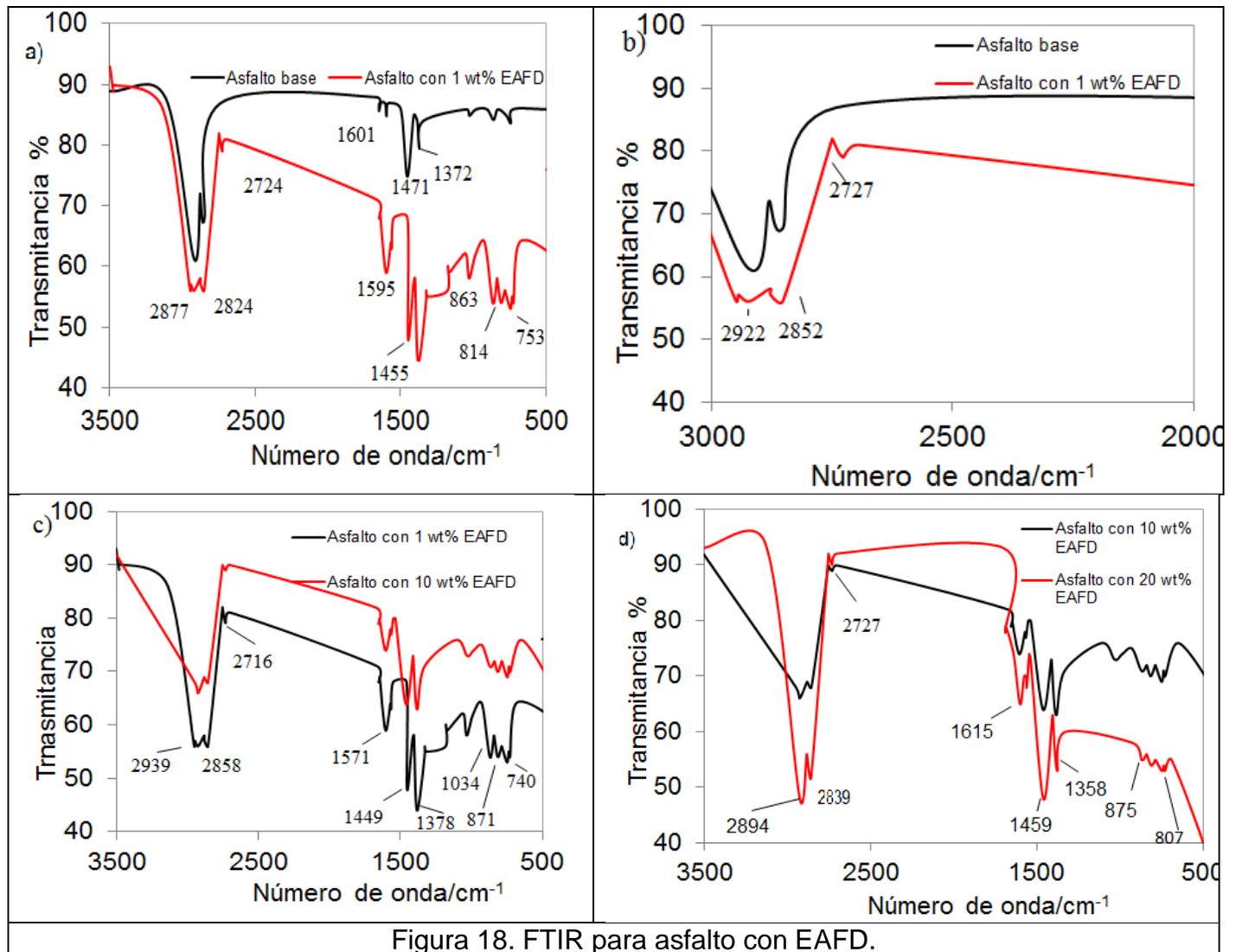


Figura 18. FTIR para asfalto con EAFD.

En general, los resultados sugieren que al adicionar 10% en peso de EAFD se alcanza una cantidad crítica, que cambia la tendencia de los resultados. Esto es importante porque muestra que en 10% se involucra otro complejo mecanismo, además del efecto endurecedor de las partículas en la mezcla en cuanto a propiedades mecánicas y térmicas.

4.4. Análisis y discusión

Los resultados del ensayo de penetración registran un aumento del punto de penetración hasta la mezcla que contiene 10 % en peso de EAFD, lo que quiere decir que es un asfalto más suave, sin embargo, en mezclas con mayores porcentajes de EAFD hay una disminución de la penetración haciéndolo más duro.

Los resultados del ensayo de punto de ablandamiento muestran aumento hasta contenidos de EAFD de 5 %, en 10 % decae hasta 47 °C y con mezclas con mayor cantidad de EAFD hay aumento del punto de ablandamiento. El índice de penetración presenta un comportamiento similar al del punto de ablandamiento.

Las imágenes de MEB del asfalto con 10 % en peso de EAFD, muestran una buena estabilidad del residuo y se observan partículas embebidas en el asfalto. Las mezclas asfálticas fabricadas en esta investigación muestran una buena consistencia y son estables mecánicamente, lo cual, valida los resultados de usar el asfalto como estabilizador de este residuo EAFD, considerado peligroso por los metales que puede contener.

La interacción entre EAFD y el asfalto está gobernada por las características químicas tanto del asfalto como de EAFD. La morfología de las partículas de EAFD, su distribución de tamaño y su área superficial, disponible para adsorción también tienen un efecto en el asfalto. Las mezclas pueden llegar a tener reacciones acido-base de Lewis, incluso pueden llevar a enlaces covalentes en los cuales cambia la superficie de las partículas y decrece la tensión interfacial para permitir una mejor estabilización de EAFD (Ouyang, Wang, Zhang, & Zhang, 2006). Muchos autores han descrito las interacciones fisicoquímicas entre el asfalto y los rellenos minerales, también han descubierto que no solo se observa un mecanismo en este tipo de interacciones sino que se observa varias de ellas (Antunes, Freire, Quaresma, & Micaelo, 2015; Clopotel, 2012; Davis & Castorena, 2015; Liang, 2013; Veytskin, Bobko, Castorena, & Kim, 2015). En esta investigación se propone una potencial interacción partícula-partícula, por ejemplo, debido al contenido de hierro teniendo efectos ferromagnéticos y otra posible disolución de iones en el asfalto líquido.

Como ya se había mencionado en el marco teórico, el asfalto tiene una composición compleja, debido a que tiene una gran cantidad de moléculas, tales como asfaltenos y maltenos, los maltenos pueden ser divididos en saturados, aromáticos y resinas, un asfalto grado 60/70 comúnmente tiene 2% de saturados, 73% de aromáticos, 7% de resinas y 18% de asfaltenos (Srivastava & van Rooijen, 2001). Los asfaltenos son la parte más viscosa y la parte polar de los asfaltos. Los maltenos son la parte menos viscosa y no polar, las resinas presentan características polares y no polares (Frost, 2010). Esta compleja composición tiene un efecto intrincado en la mezcla de partículas usadas en esta investigación, las cuales son de tipo desecho cerámico con gran variedad de óxidos. Otros tipos de partículas pueden tener otras interacciones, en este caso para el punto con 10wt% de EAFD hay una mezcla de complejas interacciones, los óxidos presentes pueden presentar diferentes interacciones con el asfalto.

El asfalto, considerado como un sistema coloidal, siendo los asfaltenos la fase dispersa y los maltenos la fase continua. En el asfalto tipo sol, los asfaltenos se encuentran bien dispersos, mientras que en el asfalto tipo gel, los asfaltenos no están bien dispersos debido a la cantidad de aromáticos y saturados. Con el aumento de la cantidad de aromáticos, la dispersión de los asfaltenos incrementa, debido a que los aromáticos forman un escudo alrededor de los asfaltenos; el efecto

Capítulo 4

de los saturados en los asfaltenos es pequeño, de esta manera los asfaltenos tienden a aglomerarse y formar estructuras en gel (Doğan, 2006). El asfalto usado para este trabajo de investigación tiene gran cantidad de aromáticos, por lo tanto, forma un sistema coloidal con estructura tipo sol

El asfalto con adiciones de partículas de EAFD forma un compuesto donde el asfalto es la matriz y EAFD es el relleno reforzante de la matriz. De acuerdo a la literatura, existen tres mecanismos presentes en este tipo de compuestos. El primero de ellos es la teoría de adhesión, donde los componentes polares en el asfalto son adheridos sobre la superficie de las partículas. Los asfaltenos, los cuales son los componentes polares del asfalto, son la parte viscosa y se adhieren sobre la superficie de las partículas dejando la matriz con menos asfaltenos, lo cual hace la mezcla menos viscosa. Este comportamiento puede ser observado en el resultado del ensayo de penetración, donde la penetración aumenta con el aumento del contenido de EAFD, hasta 10% en peso (Clopotel, 2012; Davis & Castorena, 2015; DeArmitt & Hancock, 2003; Frost, 2010; Liang, 2013; Veytskin et al., 2015). Lo cual se observa con el incremento en la viscosidad con más de 10% de EAFD, ver Figura 17, probablemente debido al adelgazamiento de cizalladura ocasionado por la orientación de las macromoléculas y la inmovilización del solvente (Gu et al., 2012; D. Zhang et al., 2009). La Figura 19a representa el mecanismo observado. Conforme va aumentando el contenido de EAFD, comienza a aparecer un efecto partícula-partícula, lo cual lleva a disminuir el área superficial disponible para la adherencia, la Figura 19b representa este fenómeno. Por lo tanto, la distancia entre partículas se calculó siguiendo la *Ecuación 2* **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de la distancia entre partículas para materiales compuestos reforzados con partículas (H. Zhang, Zhang, Friedrich, & Eger, 2006).

$$\tau = d \left[\left(\frac{\pi}{6\varphi_p} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

τ : Distancia entre partículas

d : Diámetro de partícula

φ_p : Contenido de relleno (en peso)

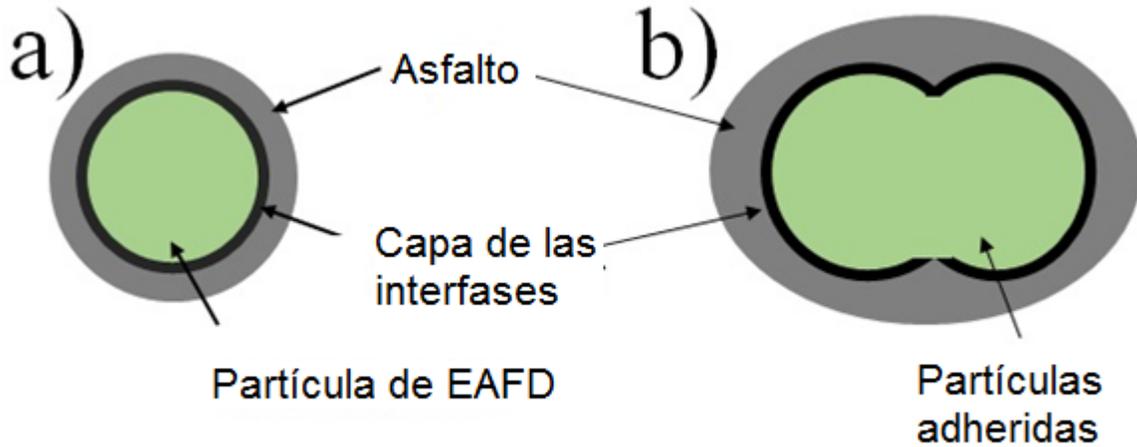


Figura 19. Partícula de EAFD rodeada por una interfase y el asfalto. a) menos de 10% de EAFD, b) más de 10% de EAFD.

Como es de esperarse, cuando aumenta el contenido de EAFD entonces disminuye la distancia entre partículas y la interacción partícula-partícula aumenta, algunas partículas también se adhieren unas a otras, ver Figura 20.

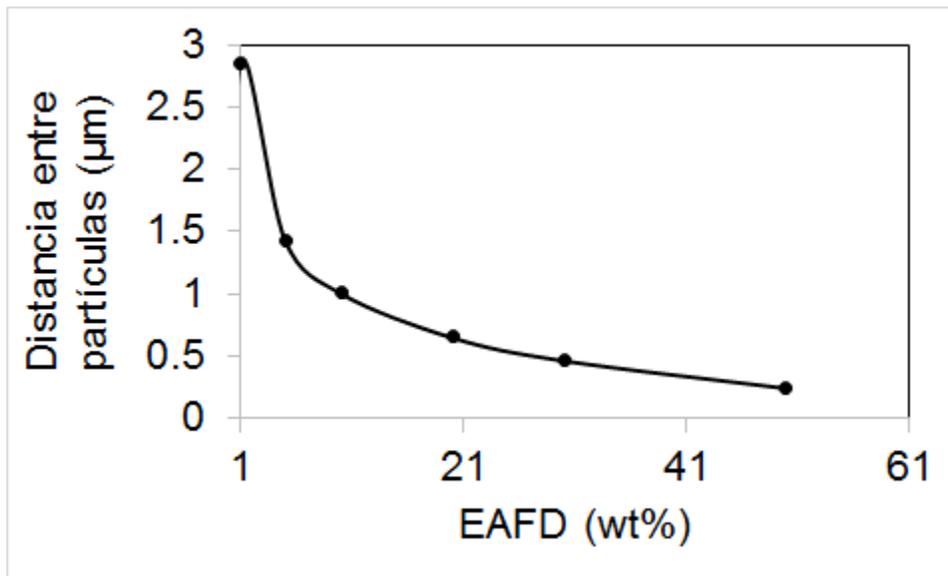


Figura 20. Distancia entre partículas en función del contenido de EAFD.

Por otro lado, la morfología de las partículas es un factor importante para evitar la separación entre el asfalto y las partículas de EAF. Acorde a la literatura, aquellas partículas con morfología angular pueden alcanzar mejor compatibilidad con la matriz polimérica (Antunes et al., 2015). La angularidad de las partículas usadas puede ser vista en la Figura 10b. El sistema formado por el asfalto y las partículas sigue la ley de Stokes, Ecuación 3, debido a que aplica fuerza

Capítulo 4

gravitacional y fuerza de flotabilidad, donde la densidad y el tamaño son características clave, como se observa en la *Ecuación 3*.

$$V = \frac{2(\rho_o - \rho_1)gr^2}{9\eta} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

ρ_o : Densidad del asfalto, 1.02 g/cc.

ρ_1 : Densidad de EAFD, 4,93 g/cc (Barreneche et al., 2013)

g : Constante gravitacional

r : Radio promedio de las partículas de EAFD, 0.27 μm

η : Viscosidad del asfalto base

De acuerdo a la ecuación y los parámetros, la velocidad de caída de las partículas es muy baja, siendo 2.66×10^{-10} cm/s.

El índice de penetración es una medida cuantitativa de cómo cambia la viscosidad con la temperatura. En la Tabla 8 se muestran los valores típicos de PI y su respectiva interpretación.

Tabla 8. Valores típicos de PI en asfalto.

Tipo de asfalto	Índice de penetración (PI)
Asfalto blando	>2
Asfalto convencional para construcción de carreteras	-2 a +2
Asfalto susceptible a cambios de temperatura	<2

Las mezclas realizadas pueden ser aplicadas en construcción de carreteras, debido a que son aptas según la Tabla 8 por lo que se encuentran en el intervalo entre -2 a +2, sin embargo, la mezcla con 10% de EAFD, presenta una desviación muy grande de los datos, pero el valor medio sigue estando dentro del intervalo permitido.

El módulo de rigidez es otro parámetro para determinar el comportamiento del asfalto aplicado en carreteras. Este puede ser medido en un reómetro DSR, pero cuando no se cuenta con equipo para ello, puede ser calculado mediante el monograma de Van der Poel (Poel & Der, 1954), el cual usa el índice de penetración y el punto de ablandamiento hallados en la parte experimental, también es necesario evaluar el asfalto en una determinada temperatura y a una carga de tiempo específica. En la Figura 21 se observa el Monograma de Van der Poel y el resultado del módulo de rigidez en cada una de las mezclas. En este caso, para evaluar el módulo de rigidez se usó una temperatura de 25 °C y un tiempo de carga de 0.02 s. El tiempo de carga de 0.02 s está simulando una carretera con vehículos a una velocidad de 48-64 km/h (Huang, 1993; John Read & Whiteoak, 2003).

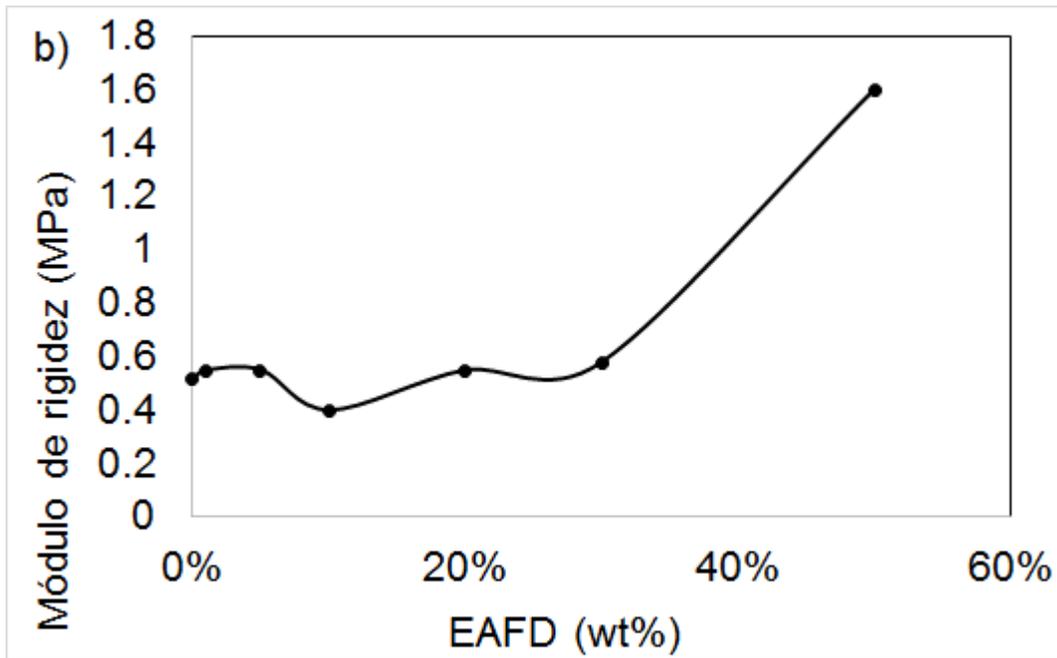
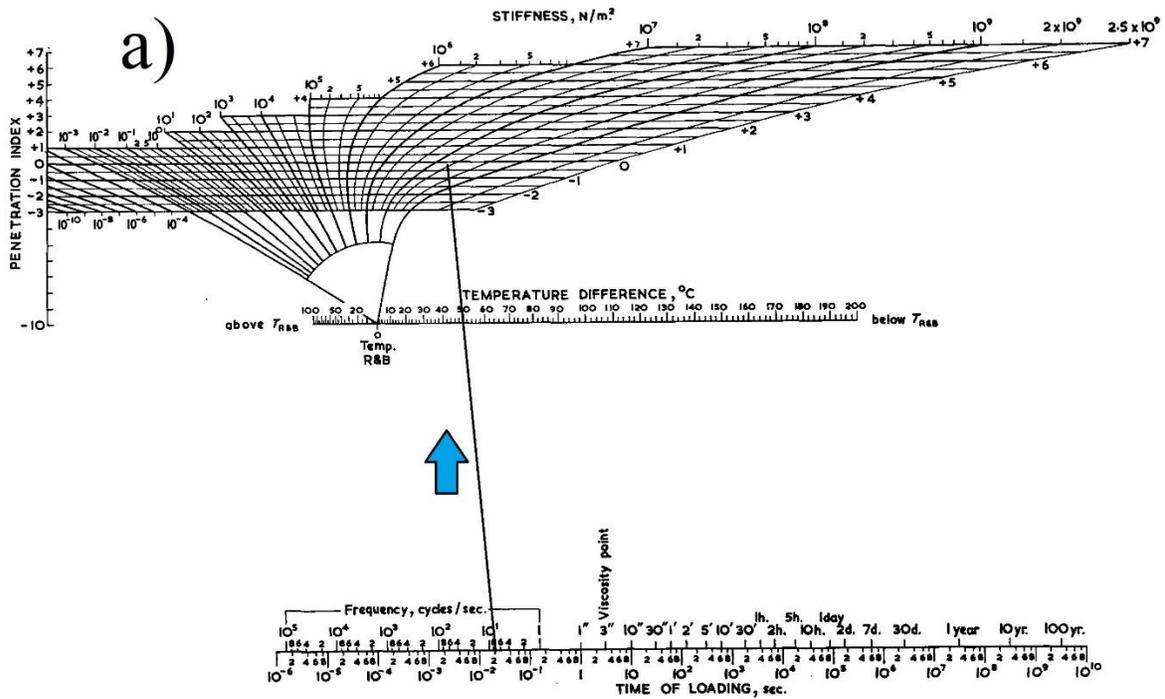
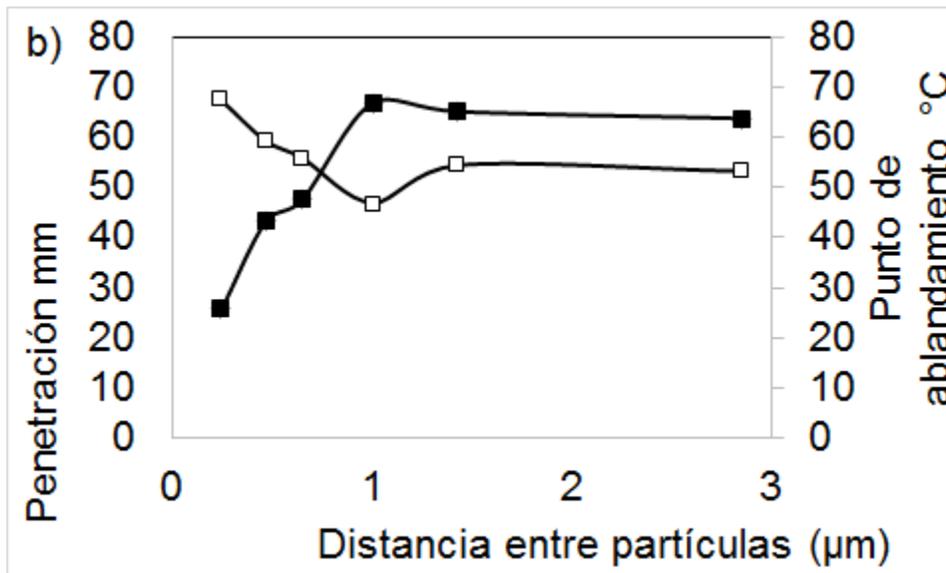
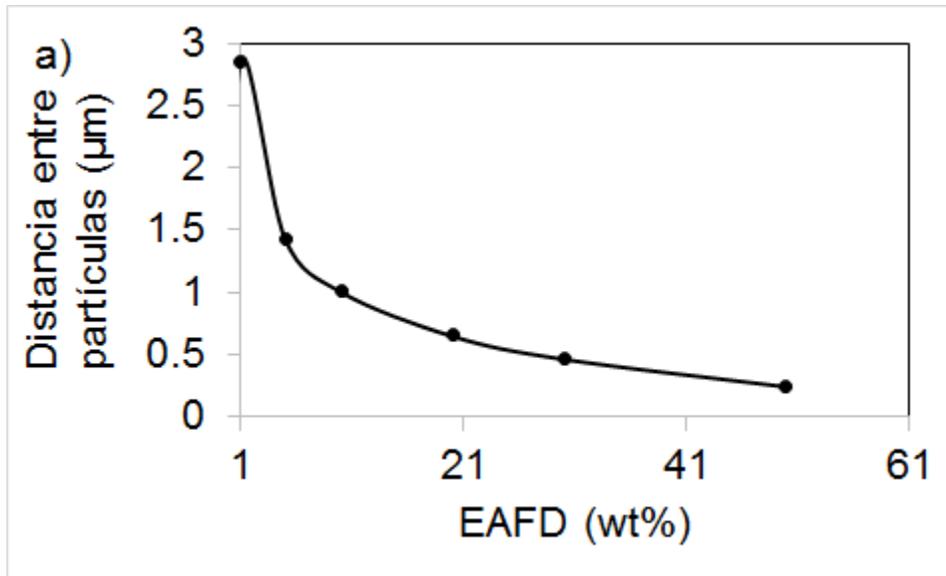


Figura 21. Monograma de Van der Poel, b) módulo de rigidez calculada en base al Monograma de Van Der Poel (Poel & Der, 1954).



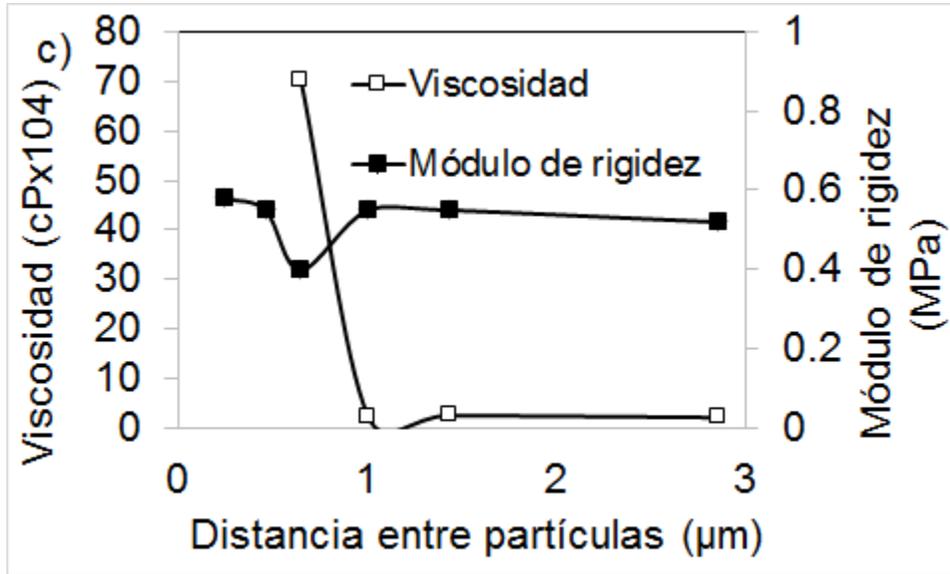
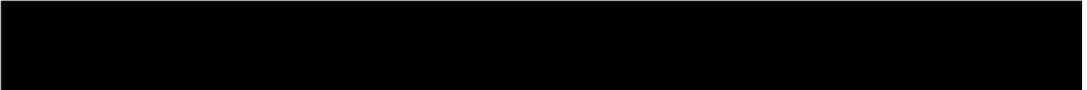


Figura 22. Variación de las propiedades mecánicas con respecto a la distancia entre partículas, a) distancia entre partículas, b) penetración y punto de ablandamiento, c) viscosidad y módulo de rigidez.

Finalmente, la Figura 22, resume la estimación de la distancia entre partículas para varios parámetros. Primero, se observa una disminución de la distancia entre partículas con el aumento del contenido de EAFD, desde 3 µm para 1% hasta 0.5 µm para 50% de EAFD en la Figura 22a, se observa que la distancia llega a 1 µm cuando el contenido de EAFD es 10% y es en esta misma distancia cuando la penetración alcanza un máximo y el punto de ablandamiento un mínimo, para distancias entre partículas mayores a este ambos parámetros se estabilizan, como se observa en la Figura 22b. El resultado más importante se encuentra en la Figura 22c, donde se observa el cambio de viscosidad con distancia entre partículas menor a 1.0 µm y mayor a 1.0 µm, mostrando una alta viscosidad a distancias menores a 1.0 µm y baja viscosidad a distancias mayores 1.0 µm. En este punto el módulo de rigidez presenta un valor mínimo.

Capítulo 5

Análisis de desempeño de concreto asfáltico



5. Análisis de desempeño de concreto asfáltico

5.1. Propiedades mecánicas

Con las probetas cilíndricas de concreto asfáltico se calcularon parámetros como gravedad específica de la mezcla, gravedad teórica total, densidad, porcentaje de vacíos en la mezcla, porcentaje de vacíos en el agregado mineral, porcentaje de vacíos llenos con asfalto y rigidez Marshall (Crespín Molina, Jovel, Santa, & Torres Linares, 2012). Los otros parámetros estabilidad y flujo son obtenidos directamente del ensayo.

5.1.1. Cálculo de gravedades específicas

Los resultados del cálculo de las gravedades específicas se muestran en la Figura 23.

- Gravedad teórica máxima (GTM)

Este parámetro fue calculado considerando el volumen y el peso de las probetas, considerando que no hay vacíos dentro de ellas.

$$GTM = \frac{M}{V} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

M es la masa y V el volumen.

- Gravedad específica bulk (GEB)

$$GEB = \frac{M}{W_{sum} - W_{hum}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

M es la masa

W_{sum} : Es el peso en agua

Capítulo 6

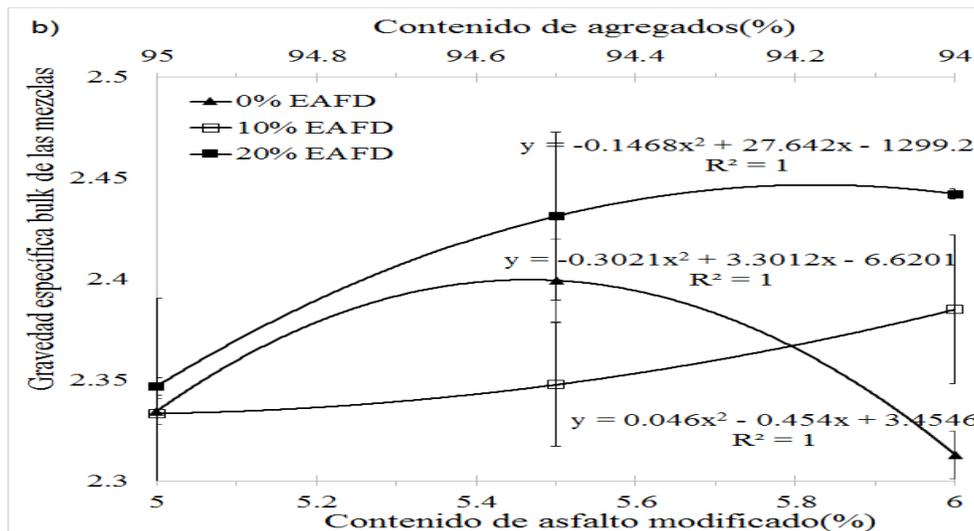
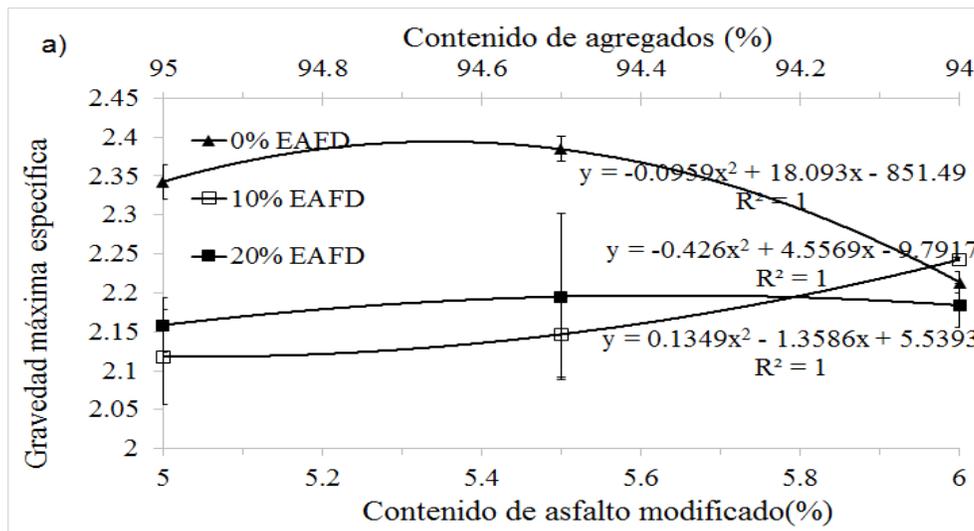
W_{hum} : Es el peso de la muestra luego de haberla sumergido en agua

- Densidad (D)

La densidad es la GEB multiplicada por la densidad del agua que es de 1000 kg/m^3 .

$$D = GEB * 1000 \text{ kg/m}^3$$

Ecuación 6



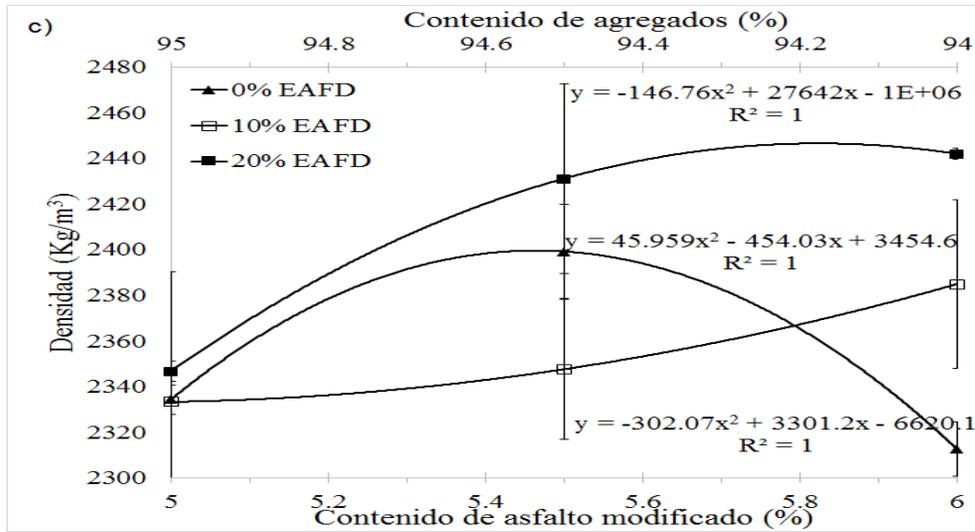


Figura 23. Ensayos de gravedad específica en las muestras. A) Gravedad específica máxima, b) Gravedad específica de la mezcla, c) densidad.

5.1.2. Cálculo de vacíos

Los resultados del cálculo de los vacíos se muestran en la Figura 24.

- % de vacíos de aire (%VA)

Existe una relación entre GTM y GEB ya que la primera considera las probetas como un cilindro macizo, pero entre los agregados y el asfalto quedan espacios de aire, que son calculados a partir de los parámetros de gravedad.

$$\%VA = \frac{GTM - GEB}{GTM} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

- Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Los agregados minerales también contienen pequeños vacíos. Para calcularlo se tiene en cuenta la densidad específica de los agregados la cual es de 2.8.:

$$VAM = 100 - \left(\frac{GEB * \%A}{GEA} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

GEB: Gravedad Específica bulk de la mezcla.

%A: Proporción de los agregados en la mezcla.

GEA: Gravedad Específica de los agregados.

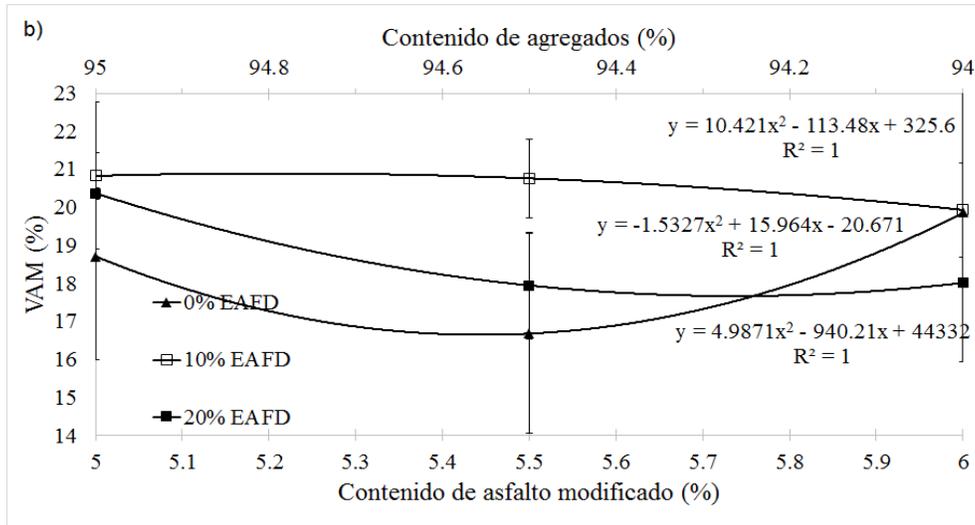
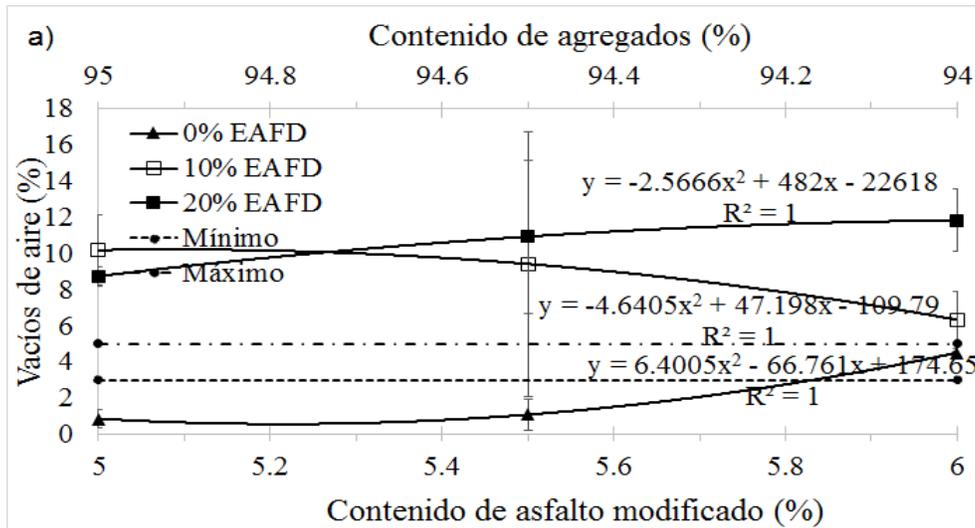
Capítulo 6

- Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Este se calcula con la diferencia entre los vacíos de los agregados y los vacíos de aire:

$$VFA = \frac{VAM - \%VA}{VAM} * 100$$

Ecuación 9



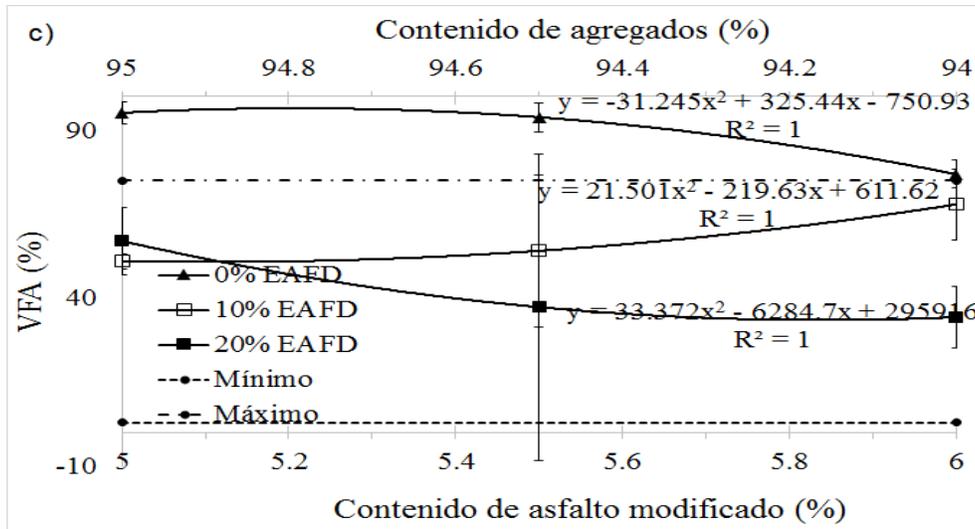
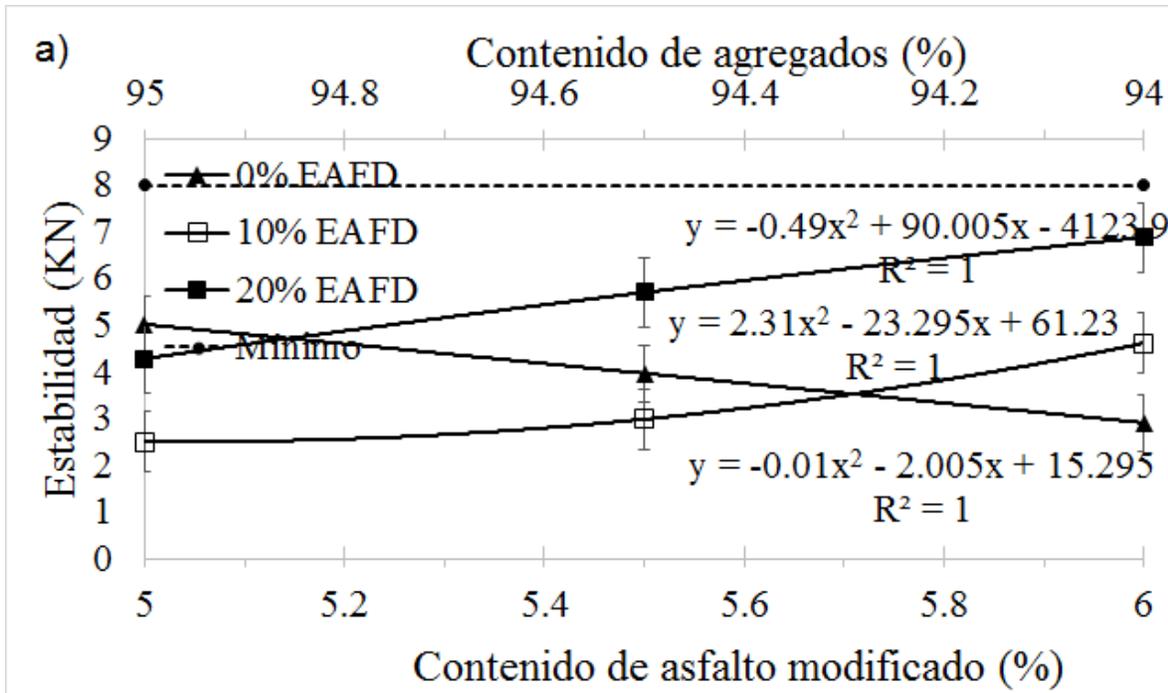


Figura 24. Resultados cálculo de vacíos, a) de aire, b) en el agregado mineral, c) rellenos con asfalto.



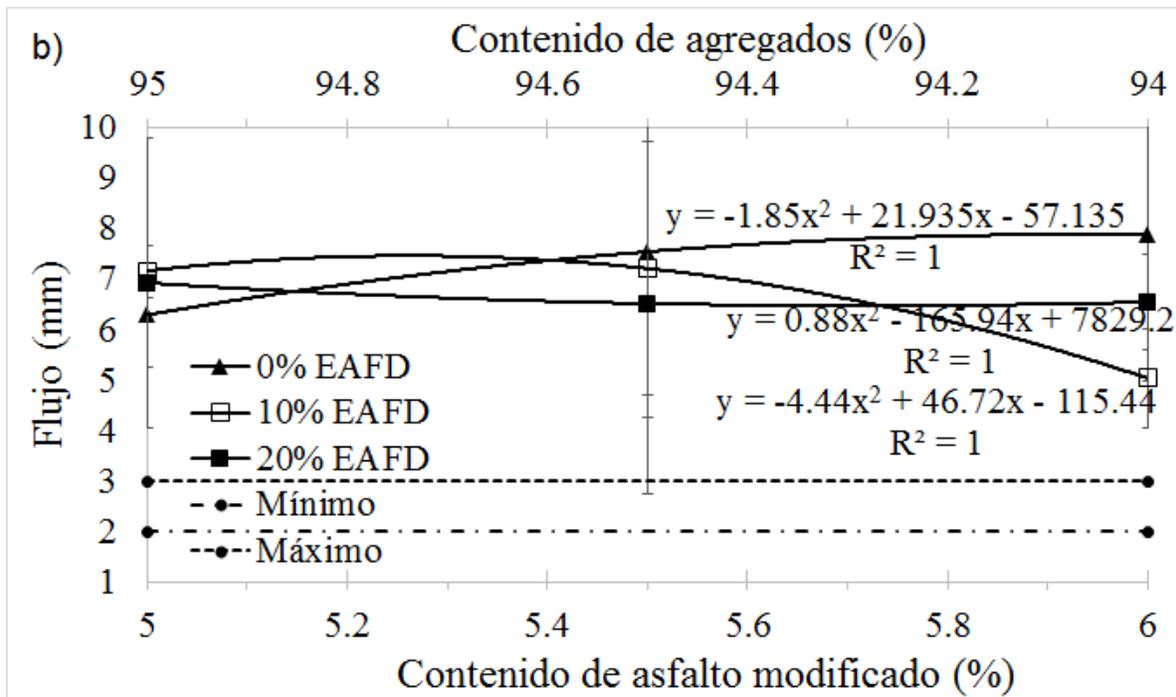


Figura 25. Resultados ensayo Marshall. a) Estabilidad Marshall, b) flujo Marshall.

5.2. Análisis y discusión

La máxima gravedad específica, la gravedad específica bulk y la densidad aumentaron para aquellas mezclas con 10% y 20% de EAFD cuando se incrementó el contenido de asfalto, para mezclas sin modificador, estas mismas propiedades disminuyeron con el aumento de contenido de asfalto, como se observa en la Figura 23, alcanzando un contenido óptimo de 6 % de asfalto con 10% y 20% de EAFD y 5% de asfalto para 0% de EAFD. Un valor óptimo de asfalto, el cual es en el que se alcanzan los resultados máximos, significa que la mezcla tiene mejor compactación y los agregados quedan bien recubiertos por el asfalto.

Los parámetros VA, VMA y VFB son importantes para evitar deformaciones. Para mezclas con 10% de EAFD, los VA y VMA disminuyeron con el aumento de asfalto en la mezcla y VFB aumentó con el incremento de asfalto obteniendo un valor de aproximadamente 68% con 6% de asfalto. Para mezclas con 20% de EAFD, VA aumento su valor y VMA y VFB disminuyeron con el aumento de asfalto. Las muestras sin modificador presentaron incremento de VA, disminución de VMA, pero cuando el contenido de asfalto aumentó, se presentó también un aumento en VMA y VFB disminuyó con el aumento de contenido de asfalto en la mezcla.

La estabilidad muestra un crecimiento para 10% y 20% de EAFD y un decrecimiento para muestras sin modificador, al aumentar el contenido de asfalto, este es el mismo comportamiento que presenta la gravedad específica bulk e indica

que el contenido óptimo de asfalto para mezclas con 10% y 20% de EAFD es de 6% de asfalto modificado con estos porcentajes. La estabilidad en la mezcla, indica la capacidad para soportar cargas, después de que este alcanza un máximo, si se aumenta el contenido de asfalto, comienza a decrecer, porque se forma una capa más gruesa de asfalto alrededor de los agregados. Con respecto al flujo, se observa en todas las muestras un valor más alto que lo indicado por normas, sin embargo, estos valores son menores que aquellos que no tienen modificador, es decir, el residuo EAFD, agregado al asfalto muestra una mejor resistencia a las deformaciones, que aquellas muestran que no se les agregó EAFD. Los resultados se observan en la Figura 25.

Un parámetro más importante, es la rigidez Marshall (RM), calculado a partir de la resistencia y el flujo como se observa en la *Ecuación 10*, este valor es un indicador de la resistencia a la deformación permanente. La Figura 26 muestra el comportamiento de RM cuando se adiciona asfalto a las mezclas con y sin EAFD, con mezclas con 10% y 20% de EAFD este parámetro aumenta mientras que sin modificador disminuye al aumentar el porcentaje de asfalto. El residuo EAFD parece mejorar RM en concreto asfáltico. Ver Figura 26.

La rigidez Marshall es la relación entre la estabilidad y el flujo Marshall y es un indicador de la resistencia a la deformación permanente (Rahman, Ahmeduzzaman, Sobhan, & Ahmed, 2013). Los resultados se observan en la Figura 26.

$$RM = E/F \qquad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

E: Estabilidad

F: Flujo

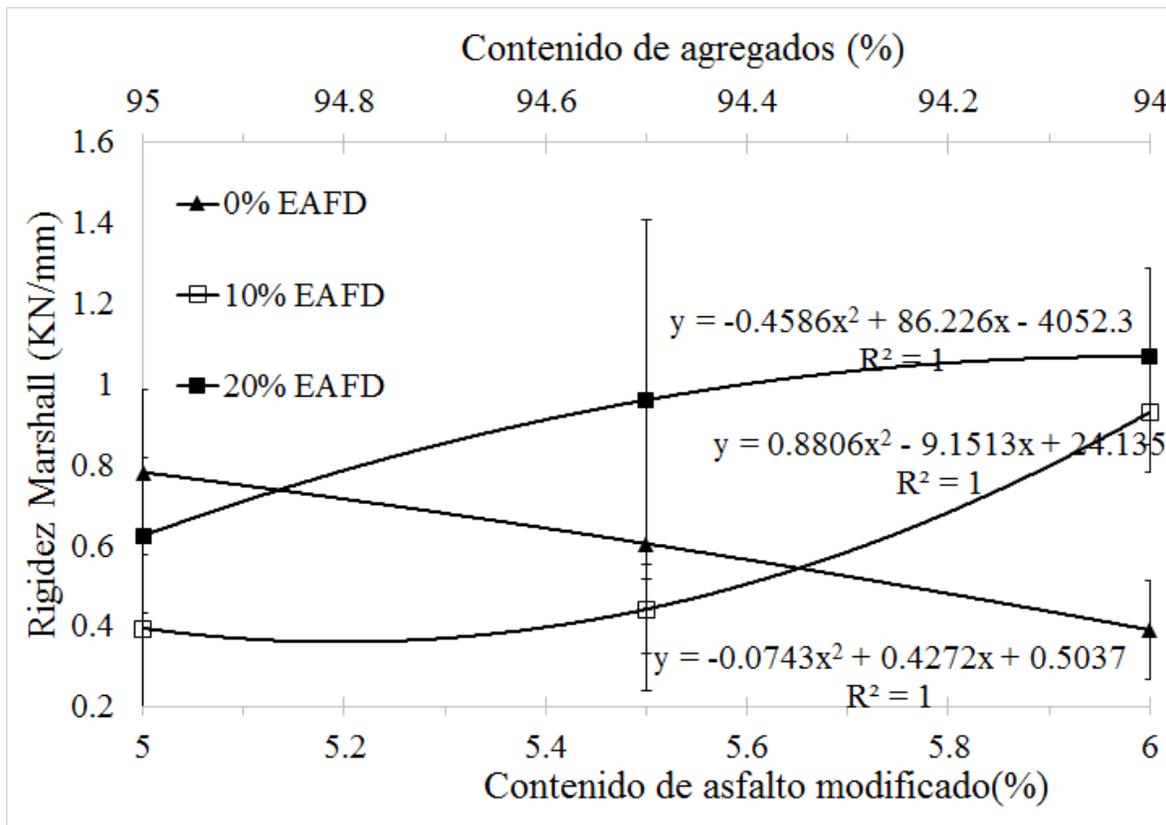


Figura 26. Rigidez Marshall de concretos asfálticos.

El aumento en la rigidez Marshall afecta directamente el espesor de las capas asfálticas en concretos asfálticos, pues este requiere menos espesor a mayor rigidez, esto puede significar un gran ahorro en grandes cantidades de concreto asfáltico (Kordi & Shafabakhsh, 2017). Para las mezclas con 10% y 20% de EAFD, se observa un aumento de la gravedad específica bulk con el aumento de la cantidad de asfalto y también se observa un aumento en la resistencia Marshall, pues la rigidez también aumenta cuando las mezclas están bien compactadas y los agregados recubiertos totalmente por el asfalto. Para la formulación sin EAFD, también se observa que cuando la gravedad específica aumenta, la rigidez también y viceversa, ver Figura 27.

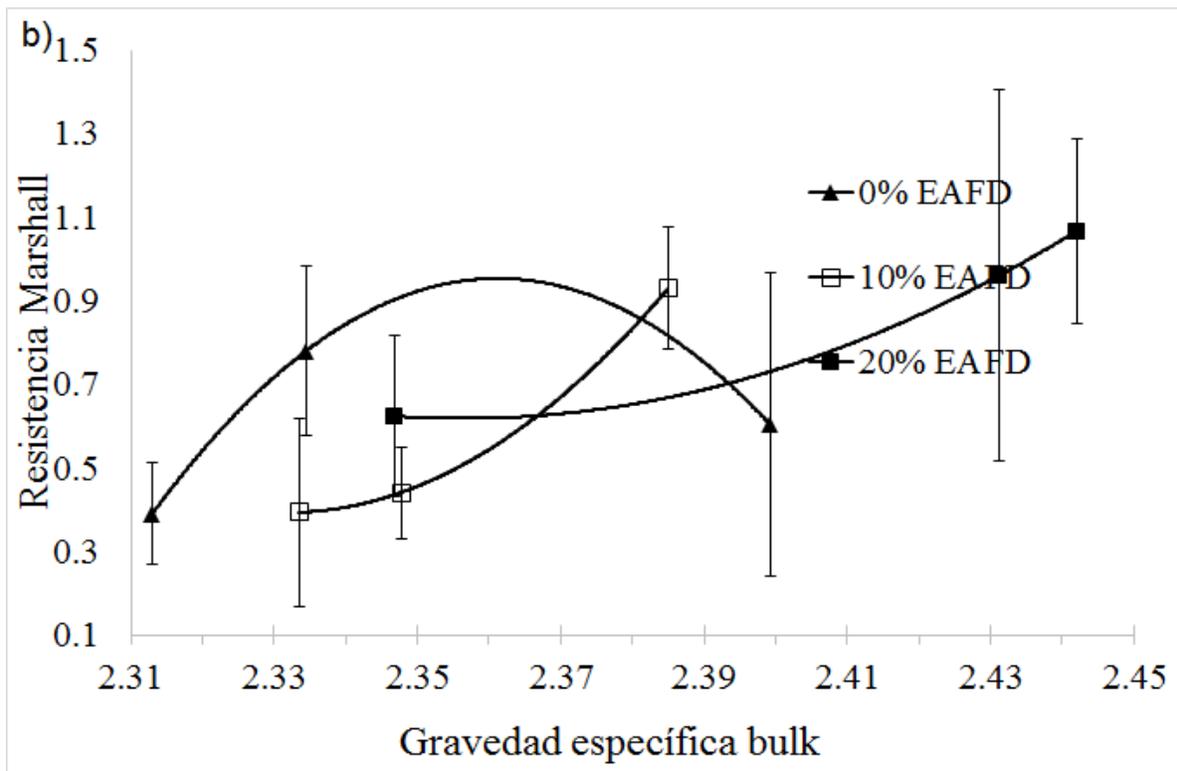
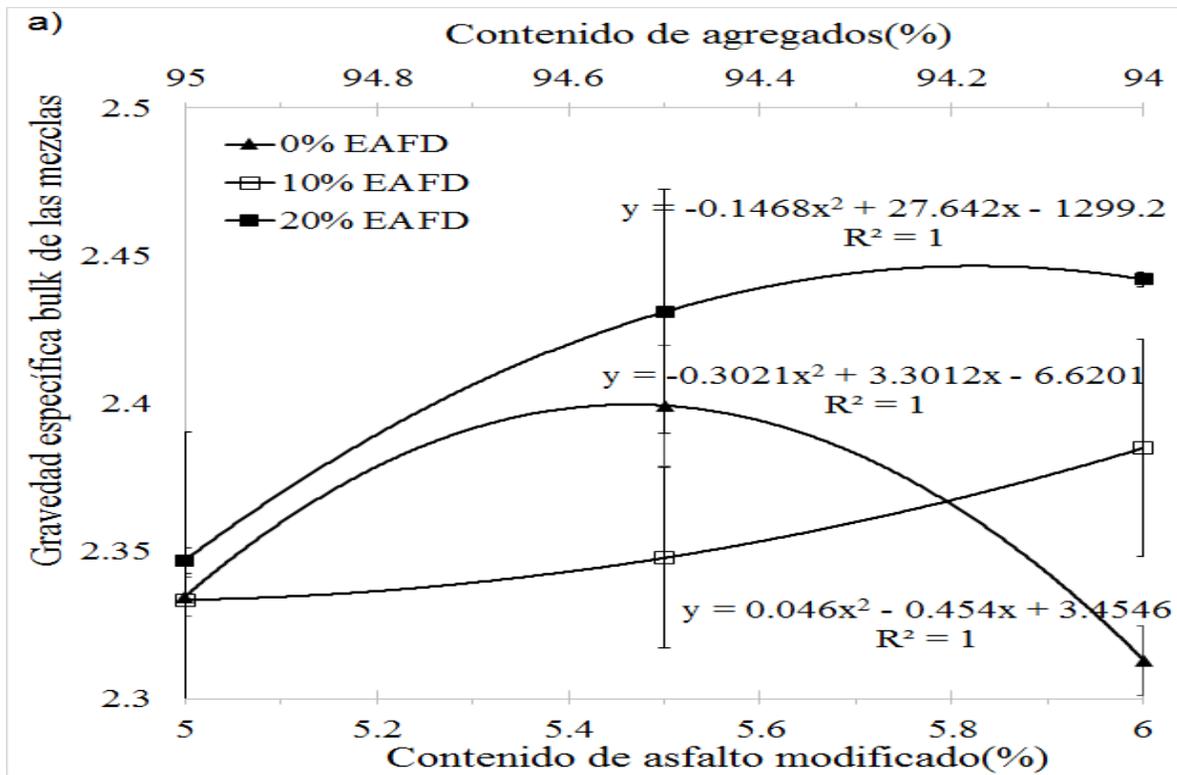


Figura 27. a) Relación de gravedad específica bulk con contenido de asfalto modificado, b) relación de resistencia Marshall con gravedad específica bulk.

Capítulo 6

Con los datos obtenidos del ensayo Marshall, se puede obtener un contenido óptimo de asfalto para las formulaciones estudiadas, para seleccionar este se busca que cumplan los siguientes criterios.

- Máxima estabilidad
- Máxima gravedad específica bulk
- Porcentaje de VA más cercano a 4%
- Porcentaje de VFB más cercano a 75%

La Tabla 9, muestra cuales mezclas cumplen con los criterios descritos.

Tabla 9. Porcentaje óptimo de asfalto que cumple los criterios establecidos.

% EAFD	Propiedad Marshall		
	0	10	20
Máxima estabilidad	5	6	6
Máxima gravedad específica bulk	5.46	6	5.82
%VA cercano a 4%	6	6	5
Porcentaje de VFB más cercano a 75%	6	6	5

El contenido óptimo de asfalto fue calculado con el promedio de contenido asfalto que cumpla con los cuatro criterios mencionados arriba (Sargin, Saltan, Morova, Serin, & Terzi, 2013; Uzun & Terzi, 2012).

Para 0% de EAFD es.

$$\frac{5 + 5,46 + 6 + 6}{4} = 5,61$$

Para 10% de EAFD es 6% de contenido de asfalto.

Para 20% de EAFD es

$$\frac{6 + 5,82 + 5 + 5}{4} = 5,45$$

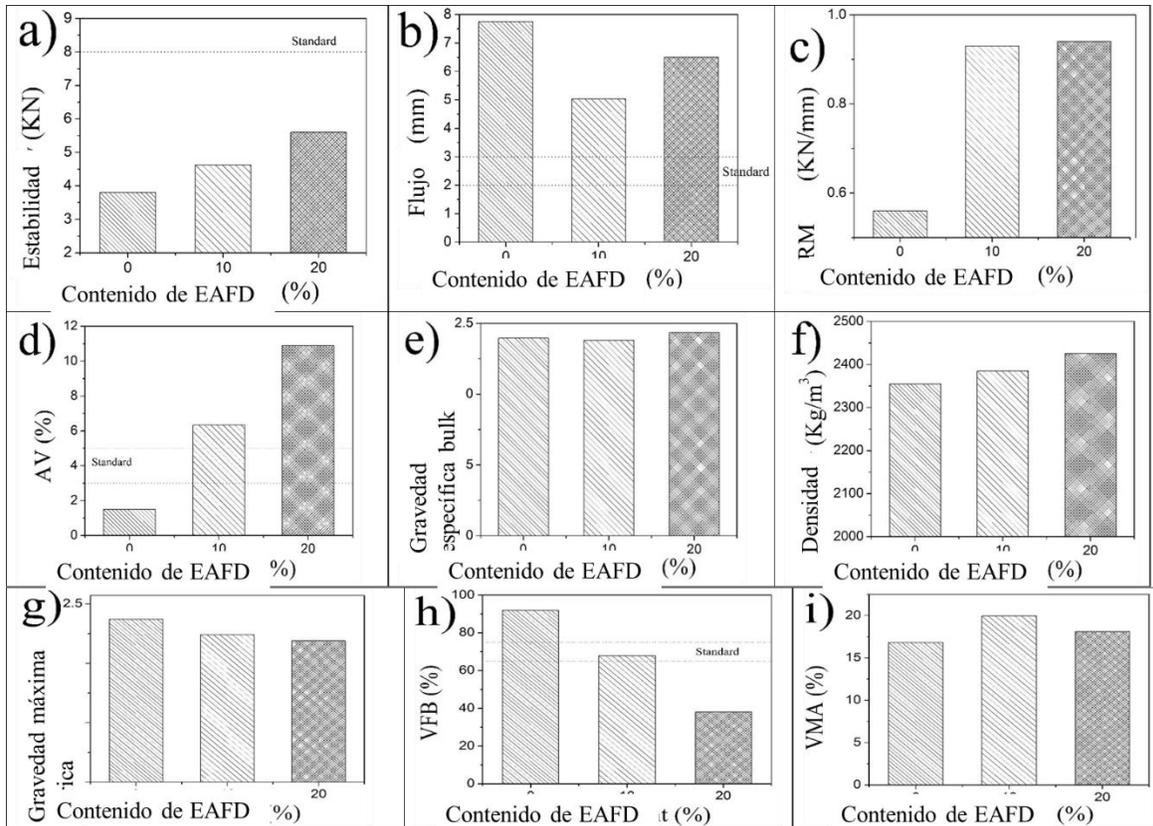


Figura 28. Resultados de ensayo Marshall con contenido de asfalto óptimo para cada contenido de EAFD. a) Estabilidad, b) Flujo, c) RM, d) Porcentaje de vacíos de aire, e) Gravedad específica bulk, f) Densidad, g) Máxima gravedad teórica, h) Vacíos llenos de asfalto, i) Vacíos en agregado mineral.

La Figura 28 muestra los resultados para todas las propiedades evaluadas en el contenido óptimo de asfalto para cada cantidad de EAFD. La línea horizontal de algunas gráficas indica el valor de la norma.

Se puede observar en los resultados de estabilidad Marshall (Figura 28a) que el comportamiento del concreto asfáltico mejoró con la adición de EAFD, la línea horizontal, indica el valor mínimo para estabilidad, aunque la muestra no haya cumplido con el valor mínimo indicado en la norma. La estabilidad Marshall fue mejorada en un 21.57% cuando el contenido de asfalto es de 10% y de 47.36% para concreto con 20% de EAFD, en base a la mezcla con asfalto no modificado. Este comportamiento podría ser explicado por el hecho de que las partículas actúan como un rigidizante en el concreto asfáltico llenando los vacíos entre los agregados y como un puente entre el cemento asfáltico y los agregados (Fu, Jones, Harvey, & Halles, 2009). Como se había mencionado en el capítulo anterior las partículas de EAFD pueden absorber componentes polares del asfalto sobre su superficie (Liang,

2013; Loaiza et al., 2017), sin embargo, después de 10% de EAFD, empiezan a regir otros mecanismos que gobiernan la interacción partícula-partícula, en esta etapa, las partículas comienzan a pegarse unas a otras para formar parte del esqueleto con los otros agregados. La Figura 29 muestra una representación del asfalto modificado interactuando con los agregados en la mezcla.

Se puede ver en la Figura 28b, que el flujo Marshall decreció y luego incrementa con la adición de EAFD, el valor del flujo especificado en la norma se encuentra entre dos y tres mm, aunque en este caso ninguna de las mezclas cumple con la norma. La rigidez Marshall fue calculada mediante la relación estabilidad/flujo, se encontró que la rigidez aumenta cuando se incrementa el contenido de EAFD, sin embargo, se observa el mismo valor para 10% y 20% de EAFD, los resultados pueden verse en la Figura 28c.

La densidad de las mezclas se incrementó con la adición de EAFD, debido al hecho de que las partículas de EAFD tienen alta densidad, contenido de vacíos de aire también se incrementó, aunque ninguna de las mezclas cumplió con la norma, la cual se encuentra entre 3% y 5%, esto puede ser visto en Figura 28d. La gravedad específica bulk disminuyó y luego incrementó, la Figura 28e muestra este resultado. En la Figura 28g, se puede ver el resultado para la gravedad máxima específica, la cual disminuyó con la adición de EAFD. La Figura 28h representa el porcentaje de asfalto que alcanzó a llenar los vacíos en la mezcla, dado que la mayoría del asfalto cubrió las partículas de EAFD debido a su mayor área superficial, entonces, la cantidad de vacíos llenados se redujo.

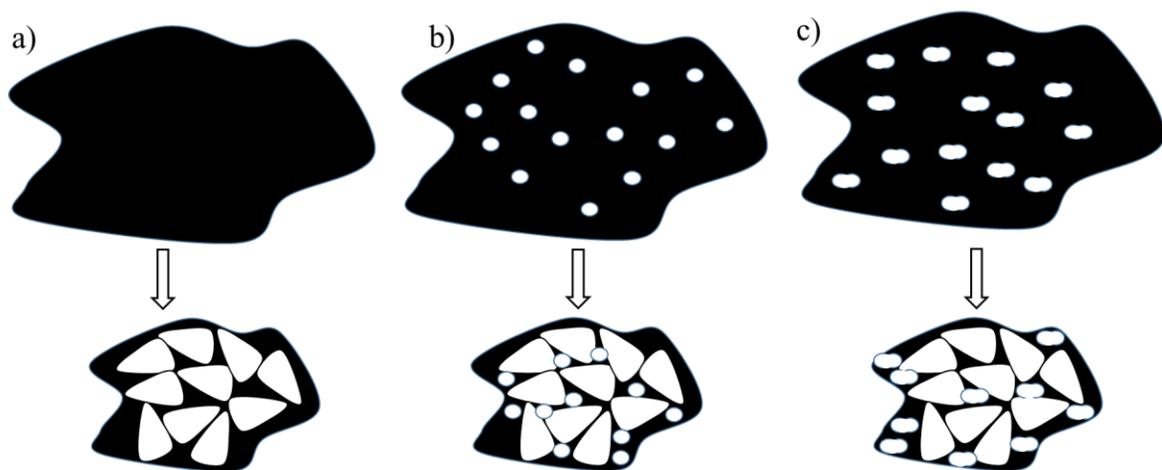


Figura 29. Mecanismo de asfalto modificado y agregados a) 0% de EAFD, b) 10% de EAFD, c) 20% de EAFD.

Capítulo 6

Análisis estadístico



6. Análisis estadístico

6.1. Cemento asfáltico

Para resumir los datos se calculan medidas estadísticas básicas generales para cada una de las variables de respuesta estudiadas y cada uno de los niveles estudiados en el factor porcentaje de EAFD, los resultados se encuentran en la Tabla 10.

Tabla 10. Medidas estadísticas principales de las variables respuesta en el cemento asfáltico.

Grupo	Media	SD	Recuento	CV	DAM	Mínimo	Máximo	Rango
Punto de ablandamiento								
0%	49.2	0.28	2	0.57	0.2	49.2	49.6	0.4
1%	53.2	1.69	2	3.18	1.2	52.0	54.4	2.4
10%	46.75	5.16	2	11.04	3.65	43.1	50.4	7.3
5%	54.45	3.6	2	6.62	2.55	51.9	57.0	5.1
20%	55.85	2.89	2	5.19	2.05	53.8	57.9	4.1
Todos	51.93	4.27	10	8.22	2.4	43.1	57.9	14.8
Penetración								
0%	64.06	1.77	3	2.77	1.2	62.5	66.0	3.5
1%	63.8	3.29	3	5.15	1.5	60.1	66.4	6.3
10%	66.96	0.41	3	0.62	0.2	66.5	67.3	0.8
5%	65.16	1.61	3	2.48	1.2	63.7	66.9	3.2
20%	47.63	1.36	3	2.85	0.6	46.1	48.7	2.6
Todos	61.52	7.46	15	12.12	2.0	46.1	67.3	21.2
Viscosidad								
0%	239000	4242.64	2	1.77	3000	236000	242000	6000
1%	234000	8485.28	2	3.62	6000	228000	240000	12000
10%	256000	4242.64	2	1.65	3000	253000	259000	6000

5%	274000	32526.9	2	11.87	23000	251000	297000	46000
20%	702500	88388.3	2	12.58	62500	640000	765000	125000
Todos	341100	193643	10	56.77	14000	228000	765000	537000

Para el cemento asfáltico se realizó un análisis ANOVA. Se determinaron los estadísticos descriptivos más significativos del análisis de varianza. Este da como resultado las tablas ANOVA, donde se muestra el valor P, para cada una de las variables. Los resultados se muestran en la Tabla 11.

H₀: No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

H₁: Para al menos un par de tratamientos existen diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 11. ANOVA para las variables independientes.

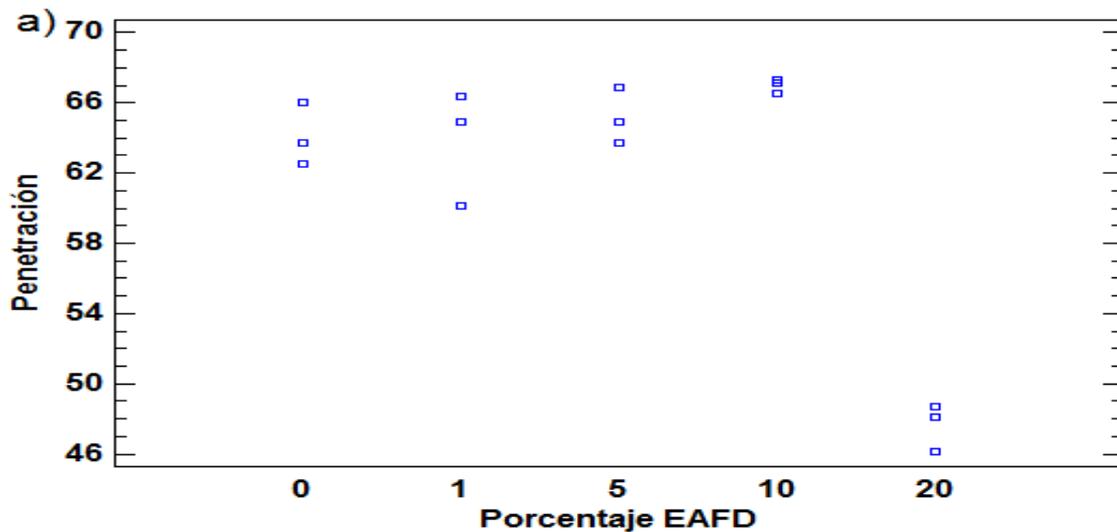
Penetración por Porcentaje EAFD					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	742.463	4	185.616	49.81	0.0000
Intra grupos	37.2667	10	3.72667		
Total (Corr.)	779.729	14			
Punto de ablandamiento por Porcentaje EAF dust					
Entre grupos	113.126	4	28.2815	2.77	0.1466
Intra grupos	51.015	5	10.203		
Total (Corr.)	164.141	9			
Viscosidad por Porcentaje EAF dust					
Entre grupos	3.28498E11	4	8.21246E10	45.73	0.0004
Intra grupos	8.9785E9	5	1.7957E9		
Total (Corr.)	3.37477E11	9			

La tabla ANOVA descompone la varianza de la variable en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. El valor-P de la prueba-F determina si hay o no diferencia estadísticamente significativa entre

Capítulo 6

un nivel de porcentaje de EAFD y otro, con un nivel del 95% de confianza. Para el caso de la Penetración la razón-F es de 49.81 y el valor-P es de 0.00. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Penetración entre un nivel de Porcentaje EAFD y otro, es decir, se rechaza la Hipótesis H_0 . Para el Punto de ablandamiento la razón F es de 2.77 y el valor-P es de 0.14, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Punto de ablandamiento entre un nivel de Porcentaje EAF dust y otro, por lo tanto, no se rechaza la Hipótesis H_0 . La razón-F de la viscosidad es de 45.73 y el valor-P es de 0.0004, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de viscosidad entre un nivel de Porcentaje EAFD y otro, por lo tanto, se rechaza Hipótesis H_0 .

La Figura 30 muestra la dispersión entre los datos hallados para la penetración en la Figura 30a, punto de ablandamiento Figura 30b y viscosidad Figura 30c. Las gráficas muestran una relación existente para todas las variables con relación al contenido de EAFD, para la penetración esta relación parece ser compleja, lo mismo que para la viscosidad, pero para el punto de ablandamiento esta relación es positiva.



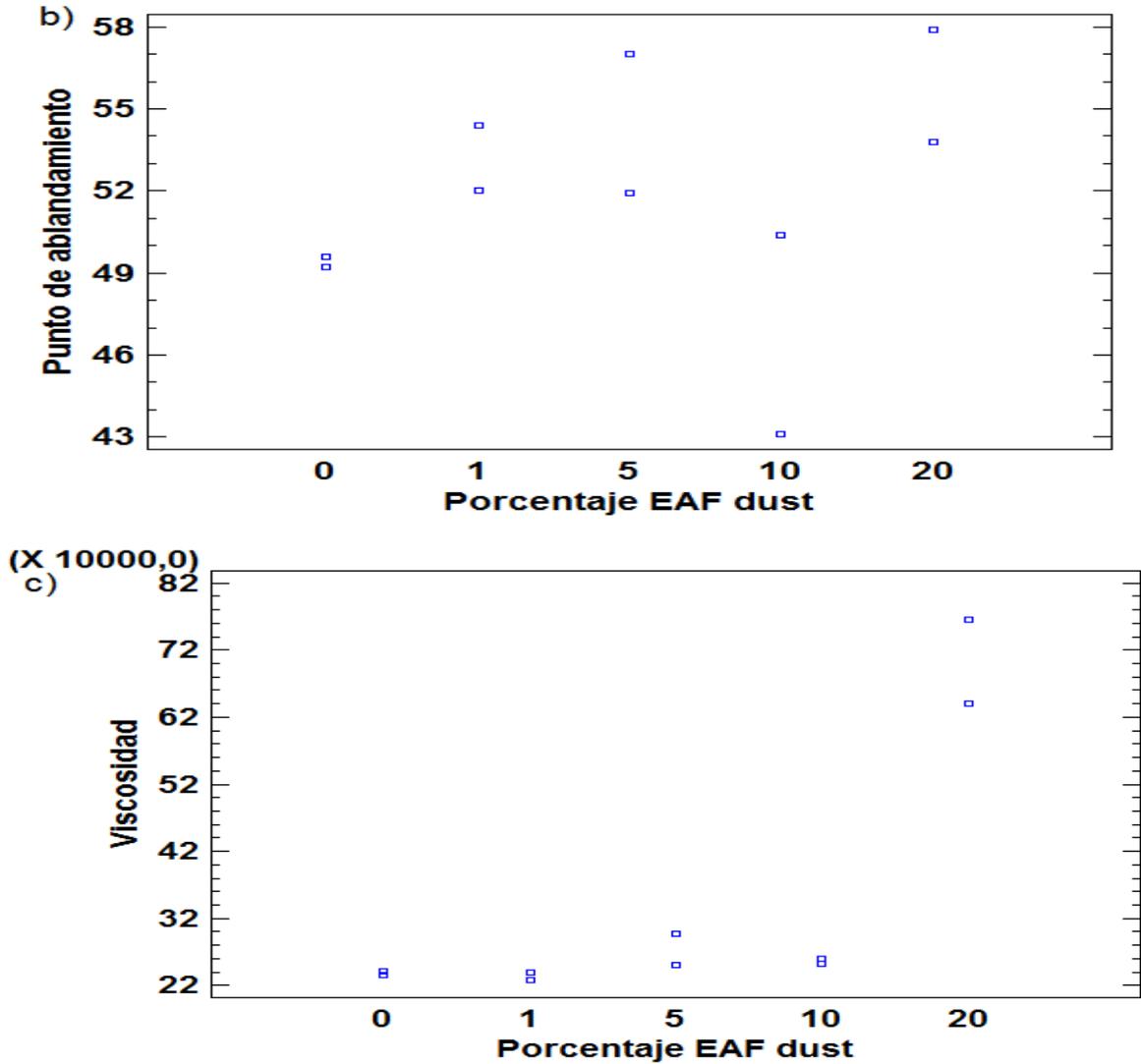


Figura 30. Gráficos de dispersión para las variables respuesta.

La Figura 31, muestra los resultados de penetración Figura 31a, punto de ablandamiento Figura 31b y viscosidad Figura 31c. Esta gráfica muestra la media de cada una de las variables. Los intervalos mostrados están basados en el procedimiento de comparación múltiple de Bonferroni.

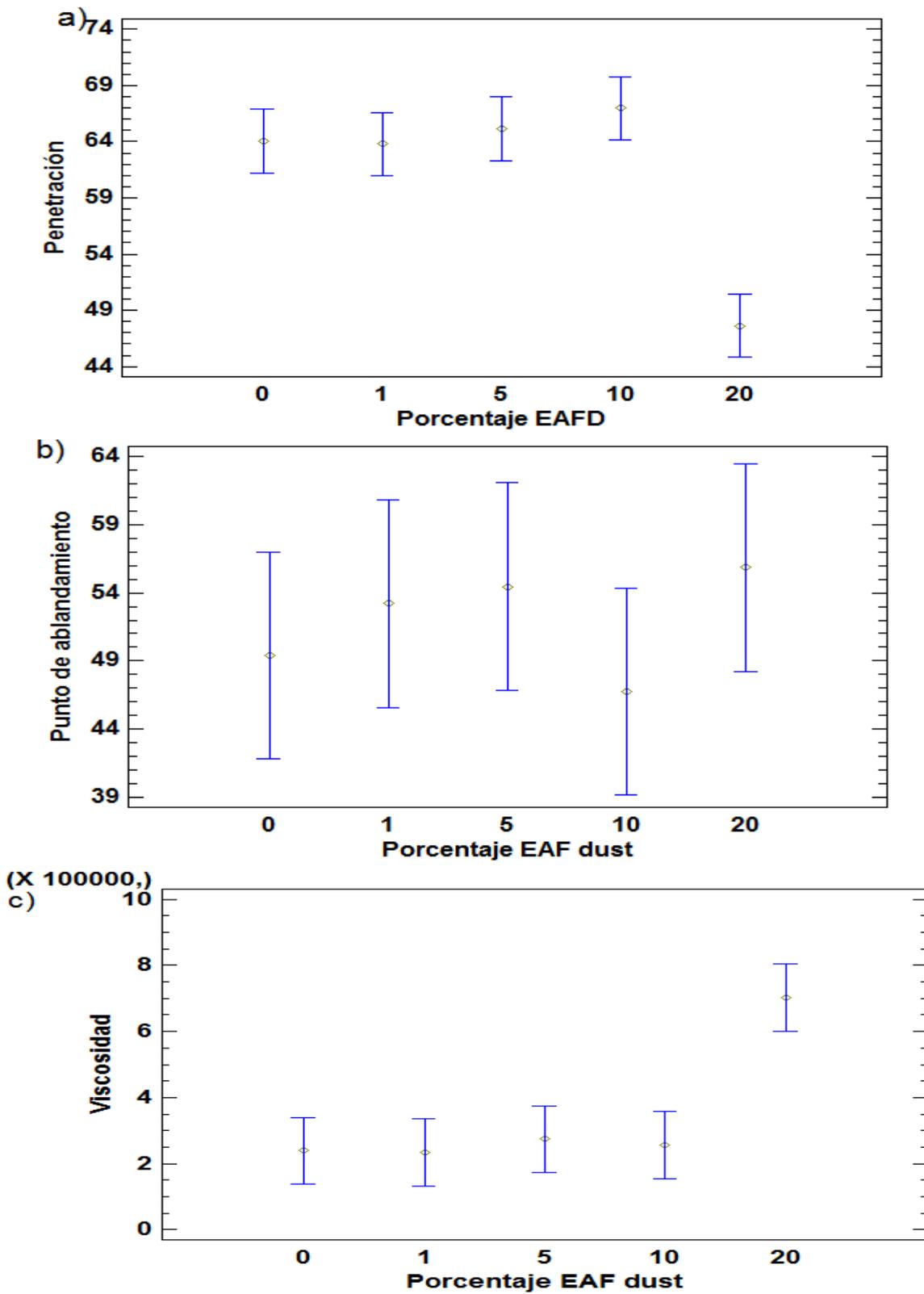


Figura 31. Gráficos de medias para las variables respuesta.

El análisis ANOVA hace una relación entre los niveles de los factores y establece significancias entre cada uno de ellos, el análisis ANOVA se muestra en la *Tabla 12*, la cual indica la significancia entre los niveles del factor porcentaje de EAFD, los resultados indican que no hay diferencias significativas entre los niveles 0-1, 0-5 y 0-10, solo existe significancia entre 0-20, 1-20, 5-20, 10-20.

Tabla 12. Análisis ANOVA para las variables respuesta, con un solo factor variable.

Respuesta viscosidad			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 1		5000	108931
0 - 5		-35000	108931
0 - 10		-17000	108931
0 - 20	*	-463500	108931
1 - 5		-40000	108931
1 - 10		-22000	108931
1 - 20	*	-468500	108931
5 - 10		18000	108931
5 - 20	*	-428500	108931
10 - 20	*	-446500	108931

Respuesta Penetración			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 1		0.266667	3.51203
0 - 5		-1.1	3.51203
0 - 10		-2.9	3.51203
0 - 20	*	16.4333	3.51203
1 - 5		-1.36667	3.51203
1 - 10		-3.16667	3.51203
1 - 20	*	16.1667	3.51203
5 - 10		-1.8	3.51203
5 - 20	*	17.5333	3.51203
10 - 20	*	19.3333	3.51203

Respuesta Punto de ablandamiento			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 1		-3.8	8.21101
0 - 5		-5.05	8.21101
0 - 10		2.65	8.21101
0 - 20		-6.45	8.21101
1 - 5		-1.25	8.21101
1 - 10		6.45	8.21101

1 - 20	-2.65	8.21101
5 - 10	7.7	8.21101
5 - 20	-1.4	8.21101
10 - 20	* -9.1	8.21101

* indica una diferencia significativa.

6.2. Diseño de experimentos

Se eligió realizar un diseño de experimentos del tipo diseño factorial de 3 niveles: 3^2 el cual estudiará los efectos de 2 factores en 24 corridas. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Esto aportará protección contra el efecto de variables ocultas. Los niveles del factor contenido de EAFD fueron elegidos de acuerdo al análisis ANOVA que se realizó a la masa asfáltica, dado que los niveles 1wt% y 5wt% no muestran diferencias significativas con respecto al asfalto base, estos niveles fueron omitidos del diseño de experimentos. Los niveles del factor contenido de asfalto fueron elegidos de acuerdo a valores referencia tomados de la literatura. Las corridas del diseño de experimentos se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Diseño factorial para concreto asfáltico 3^2 .

Diseño factorial 3^2		
BLOQUE	Contenido modificador	Contenido asfalto
1	20	6
1	0	6
1	10	5,5
1	10	6
1	20	5
1	10	5,5
1	10	5,5
1	10	5,5
1	20	5,5
1	10	5
1	0	5
1	0	5,5
2	20	6
2	0	6
2	10	5,5
2	10	6

2	20	5
2	10	5,5
2	10	5,5
2	10	5,5
2	20	5,5
2	10	5
2	0	5
2	0	5,5

6.3. Concreto asfáltico

El diseño de experimentos fue validado mediante análisis MANOVA, los resultados se encuentran en la Tabla 14.

H₀: No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

H₁: Para al menos un par de tratamientos existen diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 14. Análisis MANOVA para las variables respuesta del concreto asfáltico.

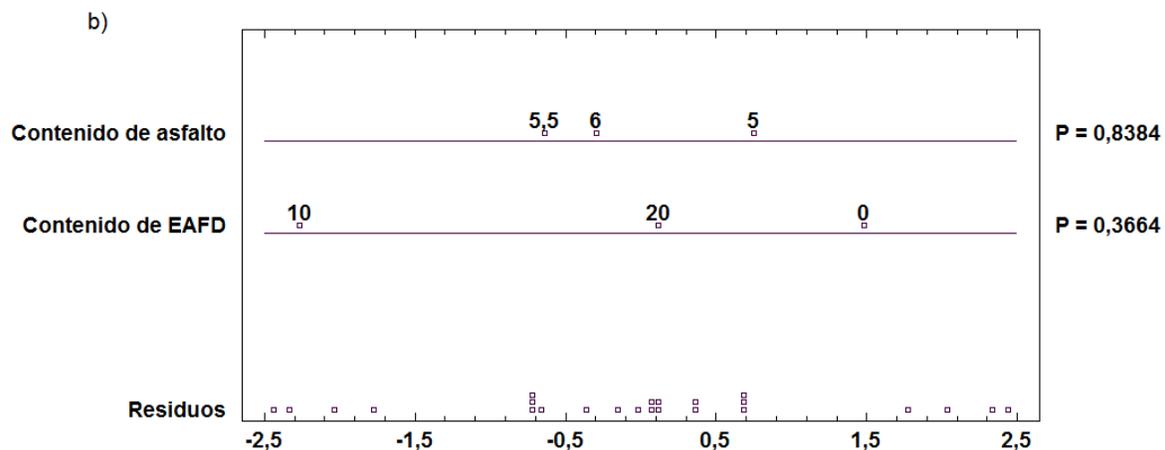
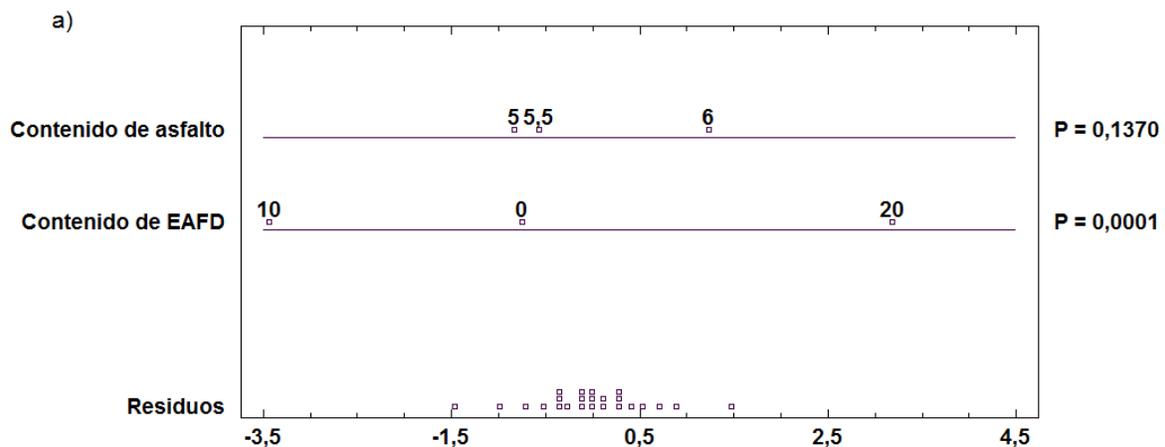
Estabilidad					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Contenido de asfalto	8.26	1	8.26	12.05	0.0029
B: Contenido de EAFD	2.29	1	2.29	3.35	0.0848
AA	15.32	1	15.32	22.34	0.0002
AB	11,1392	1	11,1392	16.24	0.0009
BB	0.90	1	0.90	1.32	0.2659
Flujo					
A: Contenido de asfalto	0.99	1	0.99	0.34	0.56
B: Contenido de EAFD	0.58	1	0.58	0.2	0.66
AA	7.88	1	7.88	2.69	0.11
AB	1.93	1	1.93	0.66	0.42
BB	1.28	1	1.28	0.44	0.51
Rigidez					
A: Contenido de asfalto	0.25	1	0.25	0.21	0.65

Capítulo 6

B: Contenido de EAFD	0.12	1	0.12	0.10	0.75
AA	0.09	1	0.09	0.08	0.78
AB	0.34	1	0.34	0.29	0.59
BB	0.37	1	0.37	0.31	0.58

La tabla ANOVA separa la variabilidad de las variables respuesta para cada uno de los efectos, entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que existe una diferencia estadísticamente significativa entre un nivel y otro en el contenido de asfalto, entonces se rechaza la Hipótesis H_0 , la cual asegura que no existen diferencias significativas entre los tratamientos, con un nivel de confianza del 95%.

El ANOVA gráfico se muestra en la Figura 32, el cual muestra los efectos de cada factor escalados de tal modo que pueden ser comparados con la variabilidad de los residuos. Para cada factor, se muestran las diferencias de los niveles medios estimados con respecto a la media global estimada.



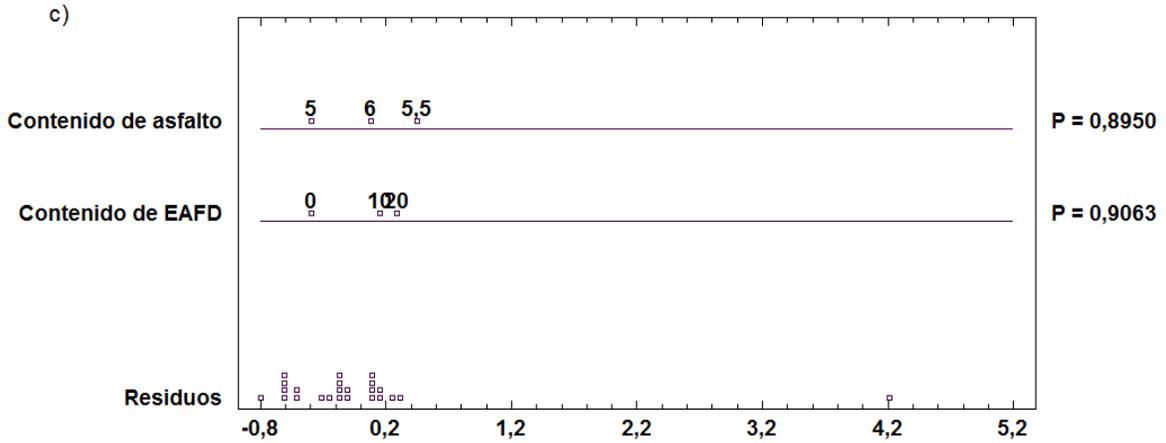
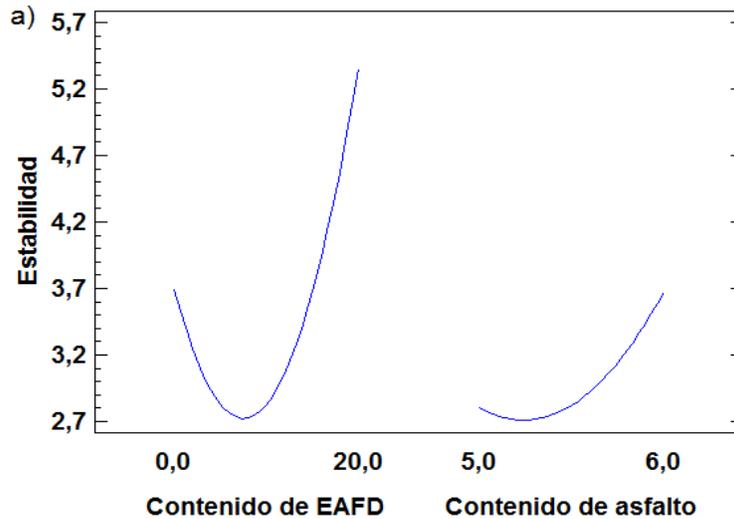


Figura 32. ANOVA gráfico de los resultados, a) ANOVA gráfico para estabilidad, b) ANOVA gráfico para flujo, c) ANOVA gráfico para rigidez.

La Figura 33 muestra los estimados de Flujo como una función de cada factor experimental. En cada gráfica, el factor de interés se varía de su nivel bajo a su nivel alto, mientras que los demás factores se mantienen constantes en sus valores centrales.



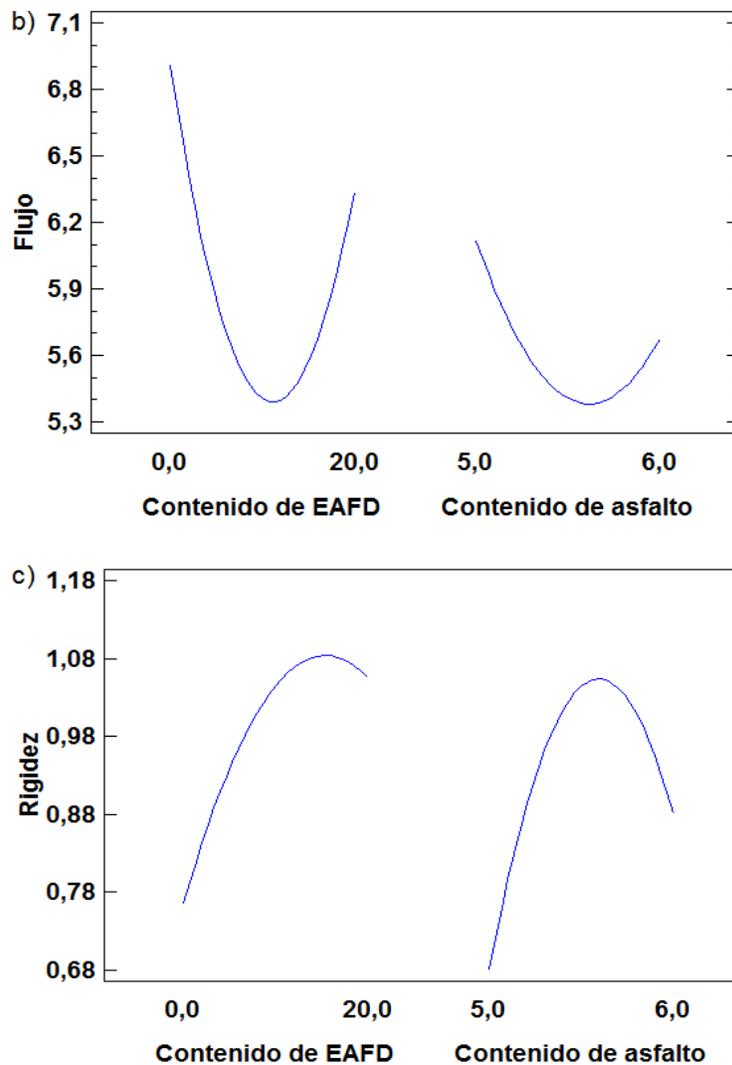


Figura 33. Gráfico de efectos de las variables, a) variable respuesta estabilidad, b) variable respuesta flujo, c) variable respuesta rigidez.

La Figura 33 muestra mayor variabilidad en cuanto a estabilidad y flujo con respecto al contenido de EAFD, lo que quiere decir que es un factor más predominante en la variable respuesta que el contenido de asfaltos, siendo mayor la estabilidad con un contenido de 20wt% de EAFD y menor el flujo con 10wt% EAFD. La rigidez al ser un cociente entre la estabilidad y el flujo, es consecuencia directa de estos, sin embargo, el contenido de asfalto parece ser un factor más predominante, maximizando los valores en 10wt% de EAFD y 5.5wt% de asfalto.

El análisis ANOVA hace una relación entre los niveles de los factores y establece significancias entre cada uno de ellos, el análisis ANOVA para las variables respuesta en el ensayo Marshall se muestra en la *Tabla 15*, la cual indica la significancia entre los niveles del factor porcentaje de EAFD, los resultados

indican que no hay diferencias significativas entre los niveles 0-10 pero si las hay entre los niveles 0-20 y 10-20 para la variable respuesta estabilidad con respecto al contenido de EAFD, con respecto al contenido de asfalto no existen diferencias significativas entre los niveles de acuerdo al análisis ANOVA.

Tabla 15. Análisis ANOVA para las variables respuesta con 2 factores.

Respuesta Estabilidad por contenido de EAFD			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 10		0.70	0.87
0 - 20	*	-1.66	0.93
10 - 20	*	-2.36	0.87
Respuesta Estabilidad por contenido de asfalto			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
5.0 – 5.5		-0.18	0.87
5.0 – 6.0		-0.87	0.93
5.5 – 6.0		-0.69	0.87
Respuesta flujo por contenido de EAFD			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 10		1.29	1.90
0 - 20		0.57	2.04
10 - 20		-0.72	1.90
Respuesta flujo por contenido de asfalto			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
5.0 – 5.5		0.50	1.90
5.0 – 6.0		0.44	2.04
5.5 – 6.0		-0.06	1.90
Respuesta rigidez por contenido de EAFD			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 10		-0.21	1.35
0 - 20		-0.29	1.45
10 - 20		-0.07	1.35
Respuesta rigidez por contenido de asfalto			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
5.0 – 5.5		-0.29	1.35

Capítulo 6

5.0 – 6.0	-0.20	1.45
5.5 – 6.0	-0.09	1.35

* indica una diferencia significativa.

Capítulo 7

Conclusiones



7. Conclusiones

- En este trabajo se demostró la efectividad del EAFD en mezclas con asfalto, logrando obtener disminución de la penetración y aumento del punto de ablandamiento.
- Cuando el asfalto se mezcla con porcentajes mayores a 50 % de EAFD, este se aglomera dejando una mezcla poco homogénea.
- Las mezclas hasta 10% de EAFD presenta buena estabilidad de almacenamiento pues las imágenes SEM muestran un buen atrapamiento de EAFD en el asfalto.
- Se lograron mezclas de hasta 20wt% de EAFD con óptima trabajabilidad, lo que constituye un gran porcentaje de EAFD hasta 6000 toneladas que no finalizaría en las fuentes hídricas o suelos de Colombia.
- El índice de penetración para todas las formulaciones se encuentra en el rango de -2 a 2, lo que significa que pueden ser usados para construcción de carreteras.
- Se realizaron predicciones de distancia entre partículas en la masa asfáltica usando teoría de compuestos, las cuales mostraron las relaciones existentes entre el asfalto y EAFD cuando se ha adicionado 10% en peso de este último.
- De acuerdo al análisis estadístico, las formulaciones de masa asfáltica con 1% y 5% de EAFD, no presentan diferencias significativas con respecto a las mezclas si modificador.
- Las mezclas con agregado mostraron mejoras en cuanto a propiedades mecánicas como estabilidad, flujo y rigidez, sin embargo, estas no son suficientes para cumplir con normas técnicas si se considera el uso para construcción de carreteras, debe considerarse otras aplicaciones del asfalto modificado con EAFD donde estas propiedades no sean un factor crítico o podría considerarse su uso en construcción de carreteras, siempre y cuando sea para tráfico liviano o de uso peatonal.
- EAFD es un material tóxico por la cantidad de metales pesados que contiene, pero puede ser estabilizado mediante su uso en el asfalto y a aplicaciones de infraestructura.
- EAFD tiene un complejo efecto sobre el asfalto, debido a las múltiples interacciones físico-químicas de cada uno de estos dos materiales, los cuales por si solos ya tienen una compleja y variada composición química.
- Las empresas productoras y procesadoras de asfalto podrían llegar a ahorrar un 20% en peso de asfalto usando EAFD como aditivo y 19.6% en volumen. Las empresas procesadoras de aceros también se verían beneficiadas por la comercialización de un desecho que no se le está dando uso.

Bibliografía



Bibliografía

- Al-Suhaibani, A., Al-Mudaiheem, J., & Al-Fozan, F. (1992). Effect of filler type and content on properties of asphalt concrete mixes. *Effects of Aggregates and Mineral “filler” S on Asphalt Mixtures Performance. American Society for Testing and Materials, ASTM STP, 1147*, 107–130.
- Alsheyab, M. A. T., & Khedaywi, T. S. (2013). Effect of electric arc furnace dust (EAFD) on properties of asphalt cement mixture. *Resources, Conservation and Recycling, 70*, 38–43. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.10.003>
- Antunes, V., Freire, A. C., Quaresma, L., & Micaelo, R. (2015). Influence of the geometrical and physical properties of filler in the filler–bitumen interaction. *Construction and Building Materials, 76*, 322–329. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.008>
- Bacinschi, Z., Rizescu, C.-Z., Stoian, E. V., Ungureanu, D. N., Poinescu, A. A., & Ittu, C. (2012). Processing and recycling experiments of dust from electric arc furnace. *Advanced Materials Research*. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.378-379.719>
- Bafghi, M. S., Karimi, M., & Adeli, M. (2013). A kinetic study on the carbothermic reduction of zinc oxide from electric arc furnace dust. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering, 10(4)*, 18–30. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84890500717&partnerID=40&md5=0c262971a226ff7140fa7111ddf8b909>
- Barreneche, C., Fernández, A. I., Niubó, M., Chimenos, J. M., Espiell, F., Segarra, M., ... Cabeza, L. F. (2013). Development and characterization of new shape-stabilized phase change material (PCM)—Polymer including electrical arc furnace dust (EAFD), for acoustic and thermal comfort in buildings. *Energy and Buildings, 61*, 210–214. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.026>
- Best, T. E., & Pickles, C. A. (2001). Selective reduction of electric arc furnace dust in carbon monoxide. *Iron and Steelmaker (I and SM), 28(11)*, 55–70. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0035502292&partnerID=40&md5=19e76386ffa2c656d3f78664d545810a>
- Camareno, M. V., & Esquivel, L. G. R. (2006). Tecnología de inmovilización de desechos peligrosos en Costa Rica. *Tecnología En Marcha, 19(3)*, 3–8.
- Canteras el Cerro. (n.d.). Retrieved March 20, 2017, from <http://www.canteraselcerro.com/filler-antienvjecimiento-de-mezclas-bituminosas/>
- Carneiro, J. O., Azevedo, S., Teixeira, V., Fernandes, F., Freitas, E., Silva, H., & Oliveira, J. (2013). Development of photocatalytic asphalt mixtures by the

- deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 38, 594–601. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.005>
- Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909–3914.
- Clopotel, C. S. (2012). Filler reinforcement mechanisms in asphalt mastics. *Dissertation Abstracts International*.
- Colorado, H. A., Garcia, E., & Buchely, M. F. (2016). White Ordinary Portland Cement blended with superfine steel dust with high zinc oxide contents. *Construction and Building Materials*, 112, 816–824. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.201>
- Crespín Molina, R. A., Jovel, C., Santa, I. E., & Torres Linares, P. A. (2012). Aplicación del método marshall y granulometría superpave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño. Universidad de El Salvador.
- Davis, C., & Castorena, C. (2015). Implications of physico–chemical interactions in asphalt mastics on asphalt microstructure. *Construction and Building Materials*, 94, 83–89. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.026>
- De Araújo, J. A., & Schalch, V. (2014). Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(3), 274–279. <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.003>
- DeArmitt, C., & Hancock, M. (2003). 8Filled Thermoplastics.
- Delvasto, P., Aldao, B. I., & Ravotti, D. S. (2011). Caracterización de polvos de acería eléctrica producidos en Venezuela y evaluación preliminar de su lixiviabilidad con ácidos orgánicos diluidos. *DYNA (Colombia)*, 78(169). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84898703616&partnerID=tZOtx3y1>
- Doğan, M. (2006). Effect Of Polymer Additives On The Physical Properties Of Bitumen Based Composites. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.
- Domínguez, E. A., & Ullman, R. (1996). “Ecological bricks” made with clays and steel dust pollutants. *Applied Clay Science*, 11(2–4), 237–249. [http://doi.org/10.1016/S0169-1317\(96\)00020-8](http://doi.org/10.1016/S0169-1317(96)00020-8)
- EPA. (n.d.). EPA. United States Environmental Protection Agency. Retrieved from <http://nlquery.epa.gov/epasearch/epasearch?querytext=electrical+arc+furnace+dust&typeofsearch=epa&doctype=all&originalquerytext=electrical+arc&areaname=&faq=true&filter=sample4filt.hts&fld=&sessionid=84FBB3A025163DA0A9EABE14D81B87F0&referer=http%3A%2F%2Fw>
- Frost, J. D. (2010). *Characterization and Behavior of Interfaces: Proceedings of Research Symposium on Characterization and Behavior of Interfaces*, 21

September 2008, Atlanta, Georgia, USA. IOS Press.

- Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., & Halles, F. A. (2009). Investigation of the curing mechanism of foamed asphalt mixes based on micromechanics principles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 29–38.
- Grupo Arlam. (n.d.). ¿Cómo se hace el acero? Retrieved from <http://www.arlam.com.mx/¿como-se-hace-el-acero/>
- Gu, H., Tadakamalla, S., Huang, Y., Colorado, H. A., Luo, Z., Haldolaarachchige, N., ... Guo, Z. (2012). Polyaniline stabilized magnetite nanoparticle reinforced epoxy nanocomposites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(10), 5613–5624.
- Huang, Y. H. (1993). *Pavement analysis and design*.
- Hwang, J.-Y., Sun, X., Huang, X., & Peng, Z. (2010). Recovery of iron and zinc from electric furnace dust using a microwave processing method. In *TMS Annual Meeting* (Vol. 1, pp. 473–480). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77952413403&partnerID=40&md5=a74789cb721423c0819624cee8b1ddac>
- Infrared spectroscopy for organic chemist. Web resources. (n.d.). Retrieved from <https://toeholds.files.wordpress.com/2010/09/ir-illustrated.png>
- Instituto Nacional de Vías. (2014). INVIAS.
- Khedeywi, T. S., & Alsheyab, Mohammad A, T. (2014). Laboratory Investigation to Evaluate the Effect of Electric Arc Furnace Dust (EAFD) on properties of Asphalt Concrete. *Environment and Natural Resources Research*, 4, 9.
- Kordi, Z., & Shafabakhsh, G. (2017). Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃. *Construction and Building Materials*, 134, 530–539. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.202>
- Lapiente Aragón, R. (n.d.). Materiales Bituminosos. In *Temas de química (II)*.
- Lenz, D. M., & Martins, F. B. (2007). Lead and zinc selective precipitation from leach electric arc furnace dust solutions. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 12(3), 503–509. <http://doi.org/10.1590/S1517-70762007000300011>
- Liang, J.-Z. (2013). Reinforcement and quantitative description of inorganic particulate-filled polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 224–232. <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.019>
- Loaiza, A., Cifuentes, S., & Colorado, H. A. (2015). Efecto de adiciones de polvos de acería en el asfalto. In *VIII CILA: Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto 2015*. (pp. 406–413). Bariloche, Argentina.
- Loaiza, A., Cifuentes, S., & Colorado, H. A. (2017). Asphalt modified with superfine electric arc furnace steel dust (EAF dust) with high zinc oxide content. *Construction and Building Materials*, 145, 538–547. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.050>

- Ma, N. (2016). Recycling of basic oxygen furnace steelmaking dust by in-process separation of zinc from the dust. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4497–4504. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.009>
- Machado, J. G. M. S., Brehm, F. A., Moraes, C. A. M., Santos, C. A. Dos, Vilela, A. C. F., & Cunha, J. B. M. da. (2006). Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 953–60. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.044>
- Madías, J. (n.d.). Reciclado de polvos de horno eléctrico. *Actualización Tecnológica*.
- Marín Hernandez, A. (2004). *Asfaltos modificados y pruebas de laboratorio para caracterizarlos*. Instituto Politécnico Nacional.
- Mattus, A. J. (1988). Asphalt solidification of mixed wastes. In *Waste management'88*.
- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Rubio-Gámez, M. C., & Segarra-Martínez, M. (2014). The use of additives for the improvement of the mechanical behavior of high modulus asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 70, 65–70. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.115>
- Noticias UNO. (2014, June 29). Noticias UNO. Bogotá. Retrieved from <http://noticiasunolaredindependiente.com/2014/06/29/noticias/por-mal-estado-de-vias-aumentan-muertes-por-accidentes-en-bogota/>
- Oreščanin, V., Mikelić, L., Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Užarević, K., Medunić, G., ... Lulić, S. (2007). Leaching properties of electric arc furnace dust prior/following alkaline extraction. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 42(3), 323–329. <http://doi.org/10.1080/10934520601144576>
- Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2006). Thermo-rheological properties and storage stability of SEBS/kaolinite clay compound modified asphalts. *European Polymer Journal*, 42(2), 446–457. <http://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.07.004>
- Pérez, M., & López, J. (2013). Estado del Conocimiento de Asfaltos Modificados en Colombia y su Influencia en la Pavimentación. *Ingeniator*, 4, 17.
- Pfeiffer, J. P. H., & Van Doormaal, P. M. (1936). The rheological properties of asphaltic bitumens. *Journal Institute Petroleum*, 22, 414–440.
- Pickles, C. A. (2009). Thermodynamic analysis of the selective chlorination of electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2–3), 1030–1042. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.110>
- Poel, V., & Der, C. (1954). A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *Journal of Applied Chemistry*, 4(5), 221–236.

- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., Antonelli, F., Vlachovicova, Z., & Zanzotto, L. (2004). Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 280(2), 366–73. <http://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.043>
- Portafolio. (2014, April). En Colombia, la producción es mucho menor a la demanda.
- Rahman, M. N., Ahmeduzzaman, M., Sobhan, M. A., & Ahmed, T. U. (2013). Performance evaluation of waste polyethylene and PVC on hot asphalt mixtures. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(5), 97–102.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). Chapter 7 Mechanical testing and properties of bitumens. In *The Shell Bitumen Handbook* (pp. 119–156). Thomas Telford Publishing.
- Read, J., Whiteoak, D., & Bitumen, S. (2003). *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=bA1tIkRjL8kC>
- Ruiz, O., Clemente, C., Alonso, M., & Alguacil, F. J. (2007). Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO. *Journal of Hazardous Materials*, 141(1), 33–36. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.079>
- Salazar Delgado, J. (2013). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01. 22: 047). *Métodos Y Materiales Vol. 1 Núm. 1*.
- Salihoglu, G., Pinarli, V., Salihoglu, N. K., & Karaca, G. (2007). Properties of steel foundry electric arc furnace dust solidified/stabilized with Portland cement. *Journal of Environmental Management*, 85(1), 190–7. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.004>
- Sargın, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 390–397. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029>
- Srivastava, A., & van Rooijen, R. (2001). *Bitumen performance in hot and arid climates*. Vercommet.
- Tápanes Robau, D., Alvarez Palacios, T., & Charles Senguden, T. A. (2001). Utilización del polvo de acería de horno de arco eléctrico. *Ingeniería Mecánica*, 11, 7.
- Tsilika, I., & Komninou, P. (2007). Structural characterization of Na₂O–CaO–SiO₂ glass ceramics reinforced with electric arc furnace dust. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(6), 2423–2431. <http://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.09.011>
- Universidad de los Andes. (2005). *Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas*. Bogotá, Colombia.

- Uzun, İ., & Terzi, S. (2012). Evaluation of andesite waste as mineral filler in asphaltic concrete mixture. *Construction and Building Materials*, 31, 284–288. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.093>
- Veytskin, Y., Bobko, C., Castorena, C., & Kim, Y. R. (2015). Nanoindentation investigation of asphalt binder and mastic cohesion. *Construction and Building Materials*, 100, 163–171.
- Vieira, C. M. F., Sanchez, R., Monteiro, S. N., Lalla, N., & Quaranta, N. (2013). Recycling of electric arc furnace dust into red ceramic. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 88–92. <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2012.09.001>
- West, R. C., Rada, G. R., Willis, J. R., & Marasteanu, M. O. (2013). *Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content*. Transportation Research Board.
- World Steel Association. (2015). *Monthly Crude Steel Production 2014-2015*.
- Zeng, D., Liu, S., Wang, G., Qiu, J., & Chen, H. (2014). Utilization of industrial waste electric arc furnace dust as iron oxide sorbent for hydrogen sulfide removal. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 9(5), 737–742. <http://doi.org/10.1002/apj.1819>
- Zhang, D., Karki, A. B., Rutman, D., Young, D. P., Wang, A., Cocke, D., ... Guo, Z. (2009). Electrospun polyacrylonitrile nanocomposite fibers reinforced with Fe₃O₄ nanoparticles: fabrication and property analysis. *Polymer*, 50(17), 4189–4198.
- Zhang, F., & Hu, C. (2015). The research for structural characteristics and modification mechanism of crumb rubber compound modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 76, 330–342. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.013>
- Zhang, H., Zhang, Z., Friedrich, K., & Eger, C. (2006). Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content. *Acta Materialia*, 54(7), 1833–1842.
- Zhou, X., Wang, F., Yuan, X., Kuang, M., Song, Y., & Li, C. (2015). Usage of slurry oil for the preparation of crumb-rubber-modified asphalt emulsions. *Construction and Building Materials*, 76, 279–285. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.064>

Apéndice

Publicaciones y

congresos



Apéndice. Publicaciones y congresos derivados del trabajo de investigación de maestría.

ARTÍCULOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS

Autores: Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry A.

Título: Asphalt modified with superfine electric arc furnace steel dust (EAF dust) with high zinc oxide content.

ISSN: 09500618

Nombre revista: Construction and Building Materials

Volumen: 145 Páginas: 538-547

Año de publicación:2017

Autores: Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry A.

Título: Influence of Electric Arc Furnace Dust in asphalt concrete.

En proceso de evaluación

Nombre revista: Construction and Building Materials

Año de publicación:2017

Congresos

Autores: Loaiza, Alexandra; Colorado, Henry A.

Título: Portland Cement Paste with Pulverized Coconut fiber.

Tipo de participación: Presentación oral

Congreso: 3rd Pan American Material Congress

Lugar: San Diego, California, USA

Fecha: Febrero 26- Marzo 2, 2017

Autores: Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry A.

Título: Structure-Property Relation of Asphalt Blende with Electric Arc Furnace Dust (EAFD).

Tipo de participación: Poster

Congreso: 146th TMS Annual Meeting and exhibition

Lugar: San Diego, California, USA

Fecha: Febrero 26- Marzo 2, 2017

Autores: Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry A.

Título: Effect of Electric Arc Furnace Dust in Asphalt.

Tipo de participación: Presentación oral

Congreso: MS&T, Materials, Science and Technology

Lugar: Salt Lake City, Utah, USA

Fecha: Octubre 23-27, 2016

Autores: Loaiza, Alexandra; Flórez, Raúl; Castaño, Carlos H; Colorado, Henry A.

Título: Phosphate Cement Blended with Samarium Oxide as Irradiation Shielding Materials.

Tipo de participación: Poster

Congreso: MS&T, Materials, Science and Technology

Lugar: Salt Lake City, Utah, USA

Fecha: Octubre 23-27, 2016.

Autores: Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry A.

Título: Efecto de adiciones de polvos de acería en el asfalto.

Tipo de participación: Poster

Congreso: VIII CILA, Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto

Lugar: Bariloche, Río Negro, Argentina

Fecha: November, 16-20, 2015.

Autores: Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry A.

Título: Evaluación de polvos de acería como mineral de relleno para el pavimento asfáltico.

Tipo de participación: Poster

Congreso: VIII CIM, Congreso Internacional de Materiales

Lugar: Paipa, Boyacá, Colombia

Fecha: Octubre 28-30, 2015

Autores: Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry A.

Título: Steel Slag as Ceramic Reinforcement for Polymeric Thin Films.

Tipo de participación: Poster

Congreso: MS&T, Materials, Science and Technology

Lugar: Columbus, Ohio, USA

Fecha: Octubre 4-8, 2015.

Membresía en organizaciones internacionales

Delegada de la Organización para President Council of Student Advisor (PCSA).

Sociedad Americana de Cerámicos (ACerS).

2015-2017

Delegada de la división de cerámicos

Sociedad Americana de Cerámicos (ACerS).

2016-2017.

PREMIOS

Mejor poster en Recycling and Sustainability Division

Autores: Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry A.

Título: Structure-Property Relation of Asphalt Blende with Electric Arc Furnace Dust (EAFD).

Congreso: 146th TMS Annual Meeting and exhibition

Lugar: San Diego, California, USA

Fecha: Febrero 26- Marzo 2, 2017.