

PROTOCOLO PARA LA ELABORACION DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON
INCORPORACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO LLENANTE MINERAL

JEFREY JHON ALEXANDER TAMAYO LOPEZ

LAURA VANESSA BOLIVAR BAUTISTA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTA D.C
2020

PROTOCOLO PARA LA ELABORACION DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON
INCORPORACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO LLENANTE MINERAL

JEFREY JHON ALEXANDER TAMAYO LOPEZ

LAURA VANESSA BOLIVAR BAUTISTA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

Asesor

PhD. EDUARDO JOSE RUEDA CARDENAS

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

BOGOTA D.C

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del Jurado

Olga Luz Atencia Herrera

Firma del Jurado

Cristian A. Rosales

Firma del Jurado

Bogotá, 21, diciembre, 2020



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	9
2.	ACLARACIÓN	9
3.	ESTADO DEL ARTE	11
4.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA	18
5.	MARCO TEORICO	19
	<i>Mezcla Asfálticas en Caliente:</i>	19
	<i>Teorías de Diseño:</i>	19
	<i>Método Marshall:</i>	19
	<i>Métodos de Diseño Superpave:</i>	20
	<i>Lléname Mineral:</i>	20
	<i>Escorias de Alto Horno (BOF):</i>	20
	<i>Escorias de Acero (SS):</i>	21
	<i>Técnica de Equilibrio de Vapor:</i>	22
	Consiste en ubicar una solución salina en un recipiente hermético. la velocidad de intercambio entre partículas gaseosas y líquidas lo impone esta solución y es la que crea el valor de humedad relativa del ambiente.....	22
6.	MARCO CONCEPTUAL.....	23
7.	OBJETIVOS.....	24
	7.1. OBJETIVO GENERAL:.....	24
	7.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:	24
8.	PROTOCOLO DE ENSAYO PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE MEZCLAS MODIFICADAS CON ESCORIA SIDERÚRGICA COMO LLENANTE MINERAL.....	25
	<i>Materiales:</i>	25
	<i>Modificación de los Materiales Asfálticos con la Escoria Siderúrgica:</i>	27
	<i>Procedimientos de Acondicionamiento Bajo Ambientes Húmedos:</i>	27
	<i>Procedimientos Experimentales para a Caracterización de los Materiales Asfálticos:</i>	28
8.	RESULTADOS ESPERADOS	31
9.	CONCLUSIONES.....	33
10.	BIBLIOGRAFIA.....	34

TABLA ESPECIALES

Tabla 1. Tabla Resumen revisión bibliográfica.....	17
Tabla 2. Tabla de sales higroscópicas.	28
Tabla 3. Cantidad de ensayos propuestos.	30

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Curva granulométrica seleccionada para la mezcla asfáltica.	25
Figura 2. Materiales empleados para la fabricación de las muestras tipo a) Mastico y b) FAM	26
Figura 3. Configuración geométrica para los especímenes FAM.....	29
Figura 4. Dimensiones del Espécimen de mezcla asfáltica.	29

GLOSARIO

Mezcla asfáltica: también conocido como hormigón bituminoso, mezcla asfáltica, concreto bituminoso o agregado asfáltico, consiste en un agregado de asfalto y materiales minerales que se mezclan juntos, se extienden en capas y se compactan.

Llenante mineral: Partículas sólidas de procedencia mineral, menores de 75 μm , cuya mayor dimensión no supera el doble de la menor, que se incorporan en una mezcla de agregados para completar su granulometría y mejorar su comportamiento.

Agregado grueso: La grava o agregado grueso es uno de los principales componentes de una mezcla asfáltica, por este motivo su calidad es sumamente importante para garantizar buenos resultados en la preparación de estructuras de pavimento.

Agregado fino: La arena o agregado fino se refiere a la parte del árido o material cerámico inerte que interviene en la composición de una mezcla asfáltica.

Escoria siderúrgica: es un subproducto de la industria de acero formado fundamentalmente por calcio, hierro y silicato de magnesio, que se obtiene por las reacciones químicas que tienen lugar en los procesos de formación de los metales.

Equilibrio de vapor: el equilibrio vapor-líquido (VLE) describe la distribución de una especie química entre la fase de vapor y una fase líquida. La presión de vapor de equilibrio de un líquido depende en general en gran medida de la temperatura.

Modulo dinámico: Es el valor absoluto del Módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal.

Reómetro de corte dinámico: El Reómetro Dinámico de Corte realiza el análisis reológico de ligantes asfálticos requerido por los métodos de caracterización SuperPave Performance Grade (PG). El comportamiento del ligante a diferentes temperaturas y cargas se mide para predecir el rendimiento bajo diferentes condiciones climáticas.

Método Marshall: método de diseño de mezclas asfálticas en caliente desarrollado por el ingeniero Bruce Marshall, el propósito del método Marshall es determinar el porcentaje óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, realizando un análisis de la relación de vacíos-densidad, y una prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas.

Agregados pétreos naturales: Son aquellos procedentes de la explotación de fuentes naturales tales como: depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales.

Cemento asfáltico: es un producto bituminoso semi – sólido a temperatura ambiente, preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante un proceso de destilación, el cual

contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es esencialmente soluble en tricloroetileno.

FAM: mezcla asfáltica fina, es la mezcla de cemento asfáltico y agregados pétreos naturales que no superan el tamaño del tamiz #16 (1.19mm).

Reología: se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales bajo la aplicación de una carga. La **reología** mide la deformación de los cuerpos que no son ni sólidos ni líquidos, es decir, de cuerpos intermedios entre sólido elástico y líquido viscoso.

Humedad relativa: es la medida del contenido de vapor de agua en el aire. Más explícitamente, es la cantidad de vapor de agua presente en el aire expresada como un porcentaje, de la cantidad necesaria para lograr la saturación a una determinada temperatura.

Pavimento Flexible: son aquellos cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o parkings.

1. INTRODUCCION

En Colombia se crean 17 millones de toneladas de residuos firmes que tienen una afectación importante en el medio ambiente en este ámbito, se tiene que los metales hacen el 4%, el vidrio 5% y el resto de porcentaje son otros los cuales hacen parte de estos residuos, es importante nombrar que el territorio tiene un aprovechamiento de estos residuos firmes en el cual en los metales es del 25% y en el vidrio son el 13%. Teniendo presente y más importante nombrar que tenemos 9.300 kilómetros de red vial en donde 74.93% están pavimentadas y el 0.20% no son pavimentados, en las vías pavimentadas el 36.4% están regulares y el 63.6% se encuentran en buen estado y en todos estos porcentajes se tiene presente el arreglo y el chequeo de estas vías por medio de INVIAS el cual es el encargado de la evaluación del estado de las vías de la región.

En el territorio se cuenta con 5 plantas siderúrgicas, en donde 3 de estas plantas se hallan ubicadas en el departamento de Boyacá en donde aportan el 70% de la producción del territorio, y el 30% se divide en medio de las metrópolis de Santiago de Cali y Manizales. Colombia es el tercer territorio con más grande producción de acero, le sigue territorios como Brasil y México donde se ve una producción al año de 1.335.000 toneladas de acero. En todo el mundo el 70% de productos hechos y vendidos en la industria del acero se aplican en la creación.

En ingeniería civil se tiene responsabilidad con el medio ambiente es por esa razón que para esta averiguación recomienda la técnica de adición de la escoria proveniente de la industria siderúrgica y el protocolo de ensayo para evaluar el funcionamiento bajo condiciones de humedad relativa para lograr conseguir este objetivo, se hizo un estudio multiescalar (micro, meso y macro), comprender las 3 escalas de los materiales asfálticos (i.e. Micro -masticos, Meso-mezcla asfáltica fina y Macro-mezcla asfáltica en caliente).Una mezcla asfáltica modificada con este material.

El presente documento contiene una revisión bibliográfica sobre el uso de la escoria siderúrgica en la industria de los pavimentos, la metodología de modificación y procedimiento experimental de la mezcla asfáltica en sus diferentes escalas. Finalmente, se presentan los resultados esperados y conclusiones de esta investigación.

2. ACLARACION

El presente trabajo de grado tiene como objetivo plantear un protocolo para la evaluación de las propiedades una mezcla asfáltica cuando esta emplea dentro de su esqueleto mineral escoria de la industria siderúrgica de forma parcial o total como parte del llenante mineral, cuando estas se someten a diferentes ambientes de humedad relativa, esto con el ánimo de analizar el deterioro de las propiedades bajo el efecto de la humedad. Vale la pena recalcar que nuestra intención era realizar los ensayos de laboratorio para determinar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica modificada con escoria, pero en vista que debido a la emergencia sanitaria del COVID-19 no fue posible realizarlo, decidimos realizar un protocolo de ensayo, pero agregamos la evaluación de las propiedades mecánicas teniendo en cuenta el efecto de la humedad, tratando de subsanar el hecho de no poder hacer los laboratorios. De igual forma, es válido tener muy presente que, de una u otra forma, nuestro proyecto tenía que cambiar su enfoque debido a las decisiones que tomó la Universidad Católica de Colombia frente a la emergencia sanitaria.

3. ESTADO DEL ARTE

Este trabajo de investigación da a conocer previas investigaciones relacionadas con el uso de la escoria siderúrgica como material alternativo en la elaboración de mezclas con la idea de poder complementar y hacer una contribución a la bibliografía existente y dar un aporte a nuevas alternativas buscando ayudar con el medio ambiente y dar una mejor disposición final de la escoria siderúrgica.

López Caiza & Alvarez Sánchez (2017). Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito

Esta investigación se centró en la sustitución de agregado grueso, fino y llenante mineral de las mezclas asfálticas por escoria siderúrgica, se realizó el diseño de las mezclas asfálticas por método Marshall, la muestra patrón “A” sin ninguna adición de escoria, las mezclas asfálticas con sustitución de agregados por escoria siderúrgica, la muestra “B” agregado grueso sustituido por escoria, la muestra “C” agregado fino sustituido por escoria, la muestra “D” llenante mineral sustituido por escoria y la muestra “E” en donde todos sus agregados fueron sustituidos por escoria los porcentajes de agregados que fueron sustituidos por escoria fueron 37.80% de agregado grueso, 48.87% de agregado fino, 5.53% de llenante mineral y con un 7.8% de asfalto empleando un cemento asfáltico AC-20 que hace referencia a las especificaciones técnicas que debe cumplir un cemento asfáltico según la norma ASTM D 3381, como resultados los autores indican que una vez realizadas las diferentes mezclas asfálticas con los distintos porcentajes de escoria siderúrgica indican que existen dos escenarios tentativos al momento de hacer la comparación con la muestra patrón “A” para el diseño de mezclas asfálticas con escoria siderúrgica como son las muestras “B” y “E” siendo la muestra “B”. La óptima para el diseño de mezclas asfálticas con escoria siderúrgica esta mezcla presenta una estabilidad adecuada para así poder sostener su estructura ya que se le aplican cargas repetidas haciendo de esta muestra un pavimento idóneo para carreteras, los autores indican que también se escogió esta muestra debido a sus costos de producción bajos respecto a su granulometría por su mínimo proceso de trituración de la escoria. Con respecto a la muestra la cual se reemplazó llenante mineral por escoria siderúrgica los autores indican que no es apta por no cumplir por los parámetros de diseño. En la prueba de deformación (Flujo) supero el límite permitido (López & Álvarez, 2017).

Sánchez (2017). Universidad Distrital Francisco José de Caldas

En esta averiguación el creador realizo un proceso experimental en donde busca evaluar la resistencia de una MDC-19 sustituyendo fracciones gruesas y finas en los agregados naturales por escoria de acero. En la exploración el creador evaluó las propiedades físicas del material por medio del procedimiento Marshall (comportamiento bajo carga monotónica). El creador ha podido evidenciar que la mezcla que mejor funcionamiento tuvo bajo la carga monotónica. Lo experimento la mezcla la cual se le reemplazo la parte fina de los agregados natural por escoria de acero. El autor observa que los valores de estabilidad de la mezcla sin modificar son menores que los valores que indico la muestra en donde se reemplazó la parte fina de los agregados natural por escoria de acero. Lo que crea una gran resistencia a las cargas a las que puede estar sometida, el autor índico que el flujo en la mezcla en donde se reemplazó la parte gruesa y la parte fina por escoria de acero tuvo un aumento. Lo que indica que la mezcla puede ser un poco más rígida esto podría provocar en la mezcla una menor resistencia al ahuellamiento. (Sánchez, 2017).

Ruge Cárdenas, Bastidas Martínez & Rondón Quintana (2019). Archives of civil engineering sciendo

En esta investigación los autores realizan la incorporación escoria de alto horno tratada con cemento portland (BFS-C) y escoria de alto horno (BFS) sin ser tratada con cemento portland a una mezcla asfáltica MDC-19 reemplazando distintos porcentajes del agregado natural por BFS-C Y BFS esto con el fin de evaluar las características físico-mecánicas de las MDC-19. El diseño de las MDC-19 se realizó por medio del método Marshall. Los ensayos que se llevaron a cabo para evaluar las propiedades físico-mecánicas fueron los de tracción indirecta, módulo resiliente y el ensayo de cántabro. Los resultados obtenidos por el ensayo de la prueba de tracción indirecta arrojaron que la relación estabilidad-flujo en condición seca y condición húmeda disminuyo a medida que se iba incrementando el contenido de BFS, esto se debe al aumento de aire que tiene la muestra por los vacíos que se producen. Por otra parte, en la mezcla con BFS-C el cemento portland reduce el contenido de vacíos con aire y la absorción dando un aumento notable en la relación estabilidad flujo. Pero a pesar de eso los autores indican que el contenido de vacíos con aire es mayor que la muestra de control MDC-19 estos incrementos pueden atribuirse a la película de cemento portland que cubre parcialmente la superficie y a la porosidad de las partículas BFS. Se observa que al incorporar BFS-C la relación estabilidad flujo aumenta con respecto a la muestra de control. Pero la relación es más grande en cuanto al contenido de BFS-C en la mezcla es más pequeño. Para los resultados del ensayo de módulo resiliente se retiró la muestra BFS-12.5 y BFS-C-12.5 porque se quería investigar el comportamiento de muestras con grandes cantidades de escorias y la BFS-43 se excluyó debido a los resultados obtenidos en la prueba Marshall y ITS. El incremento en el módulo resiliente oscilo entre el 6 y 26% a una temperatura de 20°C y entre 35 y 72% a una temperatura de 30°C las muestras BFS-21 Y BFS-43 presentaron un

módulo resiliente similar al de la muestra de control MDC-19 a una temperatura de 20°C, pero ligeramente superior a una temperatura de 30°C. En cuanto al ensayo de cántabro las muestras MDC-19 con BFS perdieron gran parte de la masa en el ensayo más que la muestra de control igual resultado arrojó la muestra BFS-C, pero la diferencia fue mucho menor. Este resultado se debe principalmente al hecho de que las partículas BFS-C son más resistentes para la abrasión que se produce por la máquina de los ángeles en las partículas BFS que no son tratadas con cemento portland (Ruge, Bastidas & Rondón, 2019).

Ochoa Díaz, Grimaldo León, Orjuela Fajardo, & Muñoz León (2018). Revista Espacios

En esta investigación los autores se enfocaron en la utilización de escoria granulada, la cual se utilizó en las MDC-19 para así realizar una muestra tradicional la cual se encuentra especificada en INVIAS para un (NT3) la cual contiene cemento con un grado de penetración 80/100 para así tener un control de esta y por otra parte se realizó una muestra más modificada con escoria granulada con la modificación de arena. En este diseño se utilizó el método de RAMCODES. Para eso el método RACODES se realiza para controlar y el diseño de materiales compactados, el método Marshall tiene rápida aplicación para obtener los porcentajes de un asfalto optimo, estos ensayos muestras un comportamiento satisfactorio en las propiedades mecánicas y volumétricas de la muestra medicada. Todo esto presento un promedio de estabilidad superior en un 10%. En un versus entre una mezcla convencional y otra modificada se sugiere mayor resistencia al ahuellamiento. (Ochoa et al, 2018).

Marcote Católico (2019). Universidad Nacional de Colombia

En esta investigación la autora se enfoca en estudiar los beneficios que tiene la escoria del horno de convertidores en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles. Realizando un diseño y evaluación de dos mezclas una mezcla patrón y otra mezcla modificada ambas mezclas MDC-19. En la mezcla MDC-19 modificada en un 100% de agregados naturales por escoria en forma de arenas gruesas, hicieron prácticas para caracterizar los materiales. También se elaboraron prácticas para poder evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la muestra convencional y la que se modificó. Se evaluó la resistencia a las fallas estructurales, módulo dinámico entre otros. Con la idea de saber las limitaciones y el aprovechamiento de estas muestras que se modificaron con escoria en donde se obtuvo como resultado que las alteraciones en el flujo de las muestras se evidencian en la especificación en la elaboración

de obras viales. La muestra que mostro menor daño fue la que estaba constituida por 100 % de escoria ya que esta tiene la capacidad de mayor contacto la cual frena el movimiento cuando se aplica la carga. Por otra parte, los resultados de resistencia dan un 89.9% la cual es satisfactoria ya que la que exige INVIAS es de un 80% y se puede decir que es excelente idea utilizar escoria para la construcción de pavimentos (Marcote, 2019).

Muniz de Farias, Reyes Lizcano, & Rondon Quintana (2018). Revista Ingenierias Universidad de Medellin

En esta averiguación los autores realizan una revisión bibliográfica sobre otras investigaciones en relación sobre escorias de elevado horno (BFS) y escoria de acero (SS) en mezclas asfálticas, con el propósito de evaluar el potencial en la preparación de pavimentos los autores indican que de la bibliografía consultada no existe en la actualidad una revisión que profundice la utilización de escorias para producir mezclas asfálticas y de esa forma el propósito de este artículo indican los autores es hacer un aporte y que la finalidad importante del análisis es tomar las conclusiones sobre el mismo como punto de inicio para la ejecución de un plan indagación sobre la ejecución de una mezcla asfáltica tibia reciclada con fronteras medioambientales, económicos y técnicos e igualmente el artículo que es una revisión bibliográfica sirve como punto de inicio para los demás estudiosos y conjuntos de indagación la consulten y consideren para futuros estudios sobre el asunto, se investigó además sobre el peligro toxicológico del uso de BFS y SS, generalidades de BFS y SS, características de BFS y SS como sus usos en mezclas asfálticas, con base a la revisión bibliográfica elaborada por los autores se concluye que en la parte técnica y ambiental, las muestras BFS y SS son materiales con elevado potencial de ser utilizadas como sustitutos de agregados naturales para la construcción de estas mezclas , debido a que en diferentes territorios permanecen empleado estas escorias como materiales alternativos para la creación de mezclas asfálticas. En la mayor parte de los estudios las dos escorias cumplieron con les especificaciones mínimas de calidad exigidas para ser empleadas en mezclas asfálticas, presentaron características deseables para ser empleados en proyectos viales como lo son las partículas predominantemente redondeadas con caras angulares, fracturadas y escaso contenido de partículas alargadas y planas (indicadores de un óptimo esqueleto granular más compacto y meno deformable bajo cargas mecánicas) un equivalente de arena elevado (indicador de un material que no va a tener exceso de finos), las partículas finas no presentaron presencia de arcillas y materia orgánica debido a que dichos materiales tienden a disminuir la respuesta mecánica de los materiales granulares en proyectos viales y en caso de las SS la alta resistencia a la abrasión, primordial mente las BFS y SS no representan un peligro ambiental. (Muniz et al, 2018).

Espejel Garcia, Villalobos Aragon, Espejel Garcia & Wenlas Lara (2017). Congreso Mexicano del Asfalto

En esta investigación los autores indagan sobre las propiedades de las escorias y sus usos para mezclas asfálticas. Teniendo en cuenta que es un material de desecho que representa un peligro de contaminación debido a la gran cantidad de metales potencialmente tóxicos (Pb, Zn, As) que puede tener y que representan un gran riesgo para los suelos y acuíferos. Se realizaron pruebas de lixiviación las cuales arrojaron que las escorias no representan un peligro en los seres humanos y el material lixiviado por esta escoria es muy bajo según los estándares lo cual no representa un riesgo para los suelos y los acuíferos. En conclusión, las escorias de elevado horno si tienen la posibilidad de usar como un sustituto del agregado pétreo natural ya que según con sus características físicas aseguran una más grande resistencia a las cargas vehiculares que va a tolerar la mezcla asfáltica. (García et al, 2017).

López Días, Grimaldo León, & Ochoa Días (2018). Universidad Nacional de Colombia

En esta investigación se tuvo como objetivo rectificar el uso de la escoria comúnmente conocida como (BOF) la cual se utiliza como un agregado grueso y ver alternativas del uso de este material, para el desarrollo de este proyecto busca que la construcción de las MDC-19 frente a materiales alternativos. Para lograr lo que se propuso se realizó la caracterización y el análisis de tres mezclas la primera con materiales convencionales para la elaboración de un pavimento asfáltico y las otras dos se sustituyó parcialmente y en su totalidad con BOF y agregado fino en polvo. En esto se hicieron las siguientes prácticas para obtener sus características físicas, sensibilidad de la humedad de las mezclas y la deformación plástica. Donde se puede decir que los resultados las pruebas realizadas del uso del BOF son favorables para utilizarse como agregado fino para modificar parcialmente los agregados que normalmente se le colocaría a una mezcla asfáltica convencional. (López et al, 2018).

Nasimba Chanataxi (2017). Universidad Politécnica Salesiana

En esta investigación se comparó la resistencia a la compresión y la flexión de un hormigón normal el cual se utiliza para la realización de pavimentos rígidos. La mezcla se hizo con un contenido de escoria reemplazando parcialmente como agregado en porcentaje de 5%, 10% y 15%. Teniendo en claro estas dosificaciones se hicieron los cilindros de mezcla de hormigón y vigas estándar donde se le efectuó los ensayos de flexión y compresión. Donde se obtuvo como resultado que la mezcla de hormigón con dosificación del 15% dio los mejores resultados con el ensayo de compresión que fue de 39.02 MPa y en el de flexión fue

de 5.35 MPa. Pero por otro lado también se obtuvo buenos resultados con la mezcla de hormigón convencional. Se debe tener en cuenta que la escoria con el hormigón disminuye las características físicas del hormigón normal como lo son la trabajabilidad y la consistencia del hormigón en su estado fresco. La cual se ve en la disminución del asentamiento de 12 mm en los cilindros y en las vigas de hormigón fue de 20 mm. Para concluir se superó la resistencia especificada de 28 MPa, pero influye la calidad de los materiales y así poder llegar a la resistencia esperada. No obstante, se deben evaluar más las características del hormigón para el uso de este en la construcción de vías en específico el estudio de la reacción álcali-árido del hormigón con escoria de fundición de hierro, este podría determinar las diferentes condiciones de clima que presenta un país como Ecuador (Nasimba, 2017).

Rooholamini, Motevalizadeh, & Sedghi (2019). Tarbiat Modares University

En esta indagación se tuvo como objetivo averiguar el efecto de suplir total y parcialmente los agregados minerales con escoria de horno de arco eléctrico (EAF) donde se ven las características de fractura y temperatura del asfalto en caliente (HMA). Por ello se han realizado pruebas de laboratorio de adherencia semicircular (SCB) y de tracción. La prueba se la han realizado a la muestra EAF que tiene 50% de escoria y para la gruesa se tiene 100% y 50% de gruesa. Por otro lado, además se hicieron pruebas para unión para lograr evaluar la susceptibilidad ante la temperatura en las masillas bituminosas por relleno de escoria. El enfoque mecánico se logró para las fracturas de plástico flexible (EPFM) la cual tiene una estructura de mezcla, aglutinante de asfalto y agregado. Sin embargo, para otras pruebas hace presencia la escoria EAF en las mezclas de asfalto modificado de Sasobit el cual tuvo un impacto sinérgico positivo la cual se obtuvo susceptibilidad a la temperatura de la resistencia a la fractura de asfalto baja la temperatura comparada con el HMA. Se debería continuar llevando a cabo las distintas averiguaciones para ver en los diferentes escenarios como se comportando esta clase de mezclas (Motevalizadeh, et al, 2019).

Tabla 1. Tabla Resumen revisión bibliográfica

Autores	Tipo de escoria	Fracción sustituida (% sustituido)	Ensayos Realizados	Objetivos
López Diaz A, Ochoa Diaz R, Grimaldo León, G	BOF	Agregado grueso y agregado fino (50 y 100%)	Susceptibilidad al agua y resistencia a la deformación plástica	Evaluar la susceptibilidad a la humedad y resistencia a la deformación plástica
Espejel Garcia D, Villalobos Aragón A, Espejel Garcia V, Wenglas Lara G	BFS	Agregado grueso (30%)	Tank test	Comprobar la lixiviación en las mezclas y verificar su comportamiento
Rondón Quintana H, Muniz de Farías M, Reyes Lizcano F,	BFS Y SS	-	-	Revisión bibliográfica
Marcote Católico Andrea	BOF	Agregado fino (50 y 100%)	Tracción indirecta, módulo dinámico, resistencia al ahuellamiento	Evaluar las propiedades mecánicas
Ochoa Diaz R, Grimaldo León E, Orjuela Fajardo M, Muñoz León C	BOF	Agregado fino (100%)	Módulo dinámico	Determinación de módulo dinámico
Nasimba Chanataxi A	Escoria de fundición de hierro	Agregado grueso (5, 10 y 15%)	Comprensión y Flexión	Medir la resistencia de mezclas asfálticas en pavimentos rígidos modificadas con escoria de fundición de hierro
Rondón Quintana H, Ruge Cardenas J, Bastidas Martínez J	BFS	Agregado grueso (12.5, 21 y 43%)	Tracción indirecta, módulo resistente y test cántabro	Medir el impacto en las propiedades físico-mecánicas.
Patiño Sanchez D	SS	Agregado grueso (12.5, 21 y 43%) Agregado fino (13.5, 19.5 y 31%)	Evaluación de las mezclas asfálticas bajo carga monotónica	Comparar la resistencia bajo carga monotónica entre una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada
López Caiza R	Escoria de fundición de hierro	Agregado grueso (37.8 y 100%) Agregado fino (48.87 y 100%) llenante mineral (5.53 y 100%)	Estabilidad Marshall	Determinar propiedades físico - mecánicas de la mezcla asfáltica modificadas con escoria como parte de sus agregados

Fuente: Propia

4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA

En la actualidad la contaminación al medio ambiente es un problema que está afectando a todos y se buscan constantemente soluciones para mitigar el mal ambiental que generan los residuos firmes que la gente está generando ya sean de uso personal o de uso industrial. En Colombia se crean alrededor de 11.006.000 toneladas al año en residuos firmes. Donde comúnmente se puede usar un 40%, empero el Departamento Nacional de Organización de la Tarea de Aumento Verde (DNP) plantea que solo se puede aprovechar un 17%. Empero según estudios si en Colombia se sigue con este crecimiento en residuos en 10 años aumentara en un 20%. (Monterrosa, 2020)

En la ingeniería de pavimentos la búsqueda de dar solución a este problema no es ajeno ya que se han realizado diversos estudios sobre la implementación de materiales alternativos que sirvan como sustitutos parciales o totales de los agregados pétreos naturales que conforman una mezcla asfáltica para así buscar una alternativa y no sobreexplotar los lugares de donde provienen los agregados, esta práctica hoy en día se está encaminando a dar solución de la disposición final de los residuos sólidos para mitigar su daño en el medio ambiente, en la presente investigación se plantea evaluar la incorporación de desechos como lo es la escoria siderúrgica implementado como material alternativo siendo sustituto parcial del llenante mineral. Por un lado, se dice que la escoria de alto horno está conformada por una combinación de material de hierro, cenizas de azufre, cal y magnesia, pero todo esto de carácter ácido. Por esta conformación es un material utilizado para la elaboración de distintos agregados en el mundo de los pavimentos. (ICCET/CSIC., 1993)

¿Cuál es el impacto de las características físico-mecánicas de una MDC 19 al sustituir el 25%, 75% y 100% del llenante mineral convencional por escoria siderúrgica después de ser acondicionada a distintas atmosferas de humedad relativa?

5. MARCO TEORICO

Mezcla Asfálticas en Caliente:

Se define como mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la mezcla de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante. Las porciones relativas de ligante y áridos determinan las características físicas de la mezcla. El proceso de construcción involucra calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, bastante mayor a la ambiental. Enseguida esta mezcla es colocada en la obra. (Zúñiga, 2015).

Teorías de Diseño:

Actualmente se emplean dos métodos para el diseño de mezclas asfálticas:

- Método Marshall: basado en la estabilidad y contenido de vacíos
- Método Superpave: Basado en el contenido de vacíos.

Método Marshall:

El método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas fue llevado a cabo por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. Los ingenieros civiles en Estados Unidos después de diferentes años de búsqueda y estudios de correlación. Lograron mejorar y adicionaron nuevos puntos al diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall. Logrando producir un método de diseño de mezclas asfálticas. El método de diseño original solo se puede utilizar en mezclas asfálticas que tienen agregados con un tamaño más grande de 25mm (1") o menor. Al modificar el método se puede emplear para mezclas asfálticas con tamaños de agregados máximos de 38mm (1.5"). Este método es para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas. Dado que la prueba de la estabilidad es de forma empírica. lo importante en los resultados es poder estimar el comportamiento en campo dado que se pierde cuando se hacen modificaciones a los procedimientos según el método de diseño. el diseño de mezclas asfálticas por método Marshall se fundamenta en utilizar probetas de prueba con una altura de 64mm (2 1/2") y 102 mm (4") de diámetro. Se hace un procedimiento para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica (ASTM D1559). Los aspectos más importantes del método Marshall son la densidad-análisis de vacíos y las pruebas de estabilidad y flujo de las probetas. La estabilidad de la probeta de prueba es la máxima resistencia en newton (N) que la probeta pueda soportar a una temperatura de 60° durante el ensayo. el precio del flujo es la deformación en 0.25mm

(1/100") que le pasa a la probeta al momento de estar sin carga y con la carga máxima. (Garnica et al, 2004).

Métodos de Diseño Superpave:

El Strategic Highway Research Program (SHRP) en el año 1987 estableció por orden del Congreso de los Estados Unidos un programa de investigación, con un presupuesto de 150 millones de dólares, con el fin de mejorar el rendimiento y resistencia de los pavimentos en el país, volviéndolos más seguros para el tráfico vehicular y para los transeúntes. Empezando el desarrollo de un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas, el producto final del programa es un nuevo método de diseño llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement). Contempla una nueva tecnología que especifica el cemento asfáltico el agregado pétreo natural e implementa nuevos métodos de diseños para mezclas asfálticas para analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento. Este método evalúa las características de una mezcla asfáltica de forma individual agregados pétreos naturales, cemento asfáltico y su relación cuando están mezclados (Garnica, Delgado, Gómez, Romero & Alarcón, 2004).

Llenante Mineral:

Llenante mineral. Partículas sólidas de procedencia mineral, menores de 75 μm , cuya mayor dimensión no supera el doble de la menor, que se incorporan en una mezcla de agregados para completar su granulometría y mejorar su comportamiento. (Diccionario geotecnia online, 2020).

El llenante mineral dentro de las mezclas asfálticas cumple una función muy importante. Ya que la relación que tiene el llenante mineral con el cemento asfáltico se llama mastic y entre mejor sea el mástico mejor comportamiento tendrá nuestra mezcla asfáltica ya que el cemento asfáltico va a estar mejor adherido a los agregados pétreos naturales y esto nos puede evitar desprendimientos de los agregados pétreos naturales cuando se encuentra en servicio la mezcla asfáltica o si está en prueba de laboratorio la mezcla asfáltica.

Escorias de Alto Horno (BOF):

Las escorias tienen la posibilidad de ser clasificadas en 3 categorías: las ferrosas, como las escorias de elevado horno (BFS por sus siglas en inglés), las no ferrosas y las que se generan por incineración. Las BFS se crean a lo largo del proceso de obtención de hierro. Están formados cuando el mineral de hierro, coque y un fundente (ya sea de roca caliza o dolomita)

se funde ligados en un elevado horno. Cuando el proceso de fundición metalúrgico se completa, la cal en el flujo se ha combinado químicamente con los aluminatos y silicatos de la ceniza de mineral y el coque, formando la escoria de elevado horno. Las escorias al salir de los altos hornos son enfriadas lentamente al aire libre (ACBFS, Air-Cooled Blast Furnace Slag) o rápidamente aplicándoles chorros de agua fría (escorias expandidas). Las primeras son usadas primordialmente en la creación como agregado pétreo (concreto y materiales de relleno, entre otros), a medida que las segundas son más usadas en la producción de cemento. Asimismo, las escorias expandidas, gracias a su más grande porosidad y limitado peso comparativamente con las ACBFS, son usadas en la construcción de concretos y mampuestos ligeros. Las BFS tienen dentro poco hierro (comparativamente con las de acero (SS)), la producción anual de BFS en Japón y Reino Unido es de 24,3 y 4,0 cientos de miles de toneladas, respectivamente. Según, por cada tonelada de hierro producido se produce una proporción de BFS entre 220 y 370 kilogramo, 340 y 421 kilogramo y 260 y 300 kilogramo, respectivamente, la producción de BFS representa casi el 30 % del calor residual liberado por las industrias manufactureras de hierro y acero. Hace 3 décadas, bastante más de 13 cientos de miles de toneladas de BFS eran elaboradas en EE. UU. (Rondón et al, 2018).

Escorias de Acero (SS):

Las escorias de acero se producen en hornos básicos de oxígeno (BOF) y en hornos de arco eléctrico (EAF). Se producen en una cantidad entre el 10 %-15 % y 15 %-20 % en peso de la producción de acero, respectivamente. La BOF se produce soplando oxígeno al hierro fundido, el cual es mezclado con flujos adicionales y chatarra de acero reciclado. El proceso refina el hierro mediante fusión con un fundente, tal como piedra caliza o dolomita, en condiciones oxidantes. Las impurezas del hierro, tales como el carbono y el silicio, se oxidan o se combinan químicamente con la escoria. La EAF se genera durante la producción de aceros más especializados y por lo general presenta mayor cantidad de hierro y menor contenido de óxidos de magnesio y calcio libres que la escoria BOF. Lo anterior las hace ser más densas y resistentes a la abrasión, a cargas monotónicas y por impacto, que las BOF. Adicionalmente, a diferencia del proceso BOF, en las EAF no se utiliza metal caliente. La cantidad de SS de diferentes industrias siderúrgicas es de 150 a 200 kg/tonelada de acero producido. La producción anual de SS en China es de cerca de 17 millones de toneladas. En China cerca de 100 millones de toneladas de SS se generan todos los años y la cantidad de almacenamiento acumulado ha superado los 1,2 billones de toneladas. La producción anual de acero y SS en 2010 en China fue de 626,7 millones de toneladas y 90 millones de toneladas, respectivamente, y la tasa de utilización de SS fue del 22 %. Cincuenta millones de toneladas por año de SS se producen como subproducto en el mundo. En Grecia, las tasas de producción anual de SS se han estimado en 1,6 millones de toneladas. En Irán dicha tasa anual es de 3 millones. En Letonia se producen anualmente entre 100 y 200 mil toneladas de SS. En Brasil, alrededor de 3 millones de toneladas por año de SS son generadas por las fábricas de acero. La industria de fabricación de acero en los Estados Unidos genera de 9 a 16 millones de toneladas de SS al año, de las cuales se utiliza como agregado pétreo en carreteras

y en la construcción de pavimentos aproximadamente entre 50 % y 70 %, y en otras aplicaciones diversas aproximadamente 10 % a 15 %. En Alemania más del 90 % de las escorias son reutilizadas en proyectos viales. En Europa se producen más de 12 millones de escorias al año. En Croacia reportan, la existencia de vertederos con aproximadamente 1,5 millones de toneladas de SS. (Rondón et al, 2018).

Técnica de Equilibrio de Vapor:

Consiste en ubicar una solución salina en un recipiente hermético. la velocidad de intercambio entre partículas gaseosas y líquidas lo impone esta solución y es la que crea el valor de humedad relativa del ambiente.

6. MARCO CONCEPTUAL

Actualmente la constante contaminación del mundo por parte de las personas ha ocasionado un enorme problema generando males en el medio ambiente, para resolver este problema se busca descubrir un mejor destino y reutilización para los residuos sólidos causados por la industria siderúrgica. Dentro de la ingeniería de pavimentos se busca materiales alternativos que logren reemplazar a los agregados pétreos naturales para sustituciones parciales o totales de dichos, para que dichos materiales alternativos iguallen o mejoren las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.

Se han realizado diversos estudios en cuanto a evaluar las propiedades mecánicas que pueden brindar las escorias siderúrgicas implementadas como material alternativo en mezclas asfálticas dando una posible solución al problema de disposición final de estos residuos sólidos de la industria siderúrgica y mitigar el daño ambiental que estos puedan generar al medio ambiente. Para la presente investigación se emplea este material alternativo como sustitutos parciales del llenante mineral de una mezcla asfáltica MDC-19.

Se realizarán ensayos de caracterización de los agregados pétreos naturales para evaluar si cumplen con las especificaciones técnicas que pide el INVIAS que se estipulan en el artículo 450 para un grado de tránsito elevado (NT3), se llevara a cabo el diseño de la mezcla asfáltica por procedimiento Marshall según los criterios de diseño exigidos por el INVIAS, teniendo presente la granulometría requerida para la mezcla asfáltica MDC-19 y teniendo presente que se trabajara con el sector medio de la explicación granulométrica. Se realizarán ensayos para evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica como lo son la resistencia a la tracción indirecta, módulo resiliente y deformación persistente lo anterior para revisar que los materiales alternativos empleados en estas mezclas asfálticas cumplen con las exigencias mínimas estipuladas por las especificaciones dando así solución a la disposición final de los residuos de escoria siderúrgica mitigando su mal ambiental.

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL:

Proponer un protocolo enfocado en tres etapas para el diseño de una mezcla asfáltica MDC-19 con sustitución parcial del llenante mineral por escoria siderúrgica.

7.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

1. Consultar bibliografía existente sobre el uso de la escoria siderúrgica en el diseño de mezclas asfálticas.
2. Proponer un protocolo para el diseño de una mezcla asfáltica MDC-19 con incorporación parcial de escoria siderúrgica como llenante mineral.
3. Proponer un protocolo para el acondicionamiento a la humedad relativa de muestras asfálticas modificadas con escoria siderúrgica por medio de la técnica de equilibrio de vapor.

8. PROTOCOLO DE ENSAYO PARA EVANUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE MEZCLAS MODIFICADAS CON ESCORIA SIDERÚRGICA COMO LLENANTE MINERAL

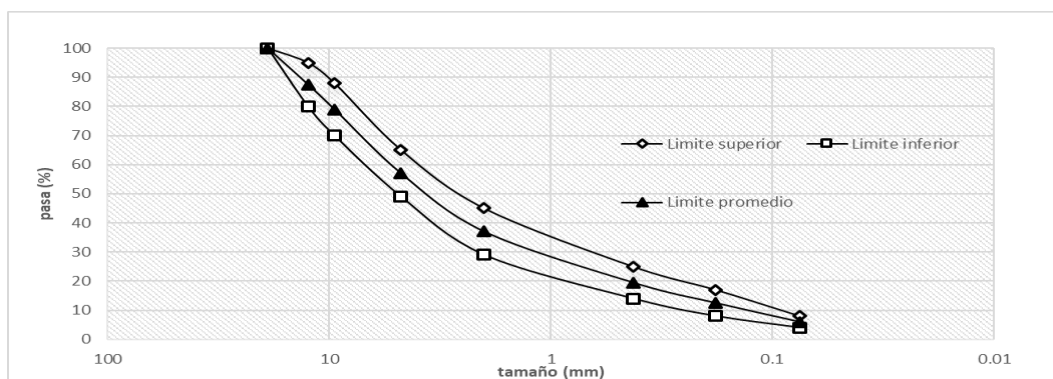
Teniendo en cuenta que el objetivo que este trabajo es proponer una metodología experimental para evaluar la influencia que tiene el contenido de escoria siderúrgica como sustituto (Parcial o completo) del llenante mineral en una mezcla asfáltica. La metodología propuesta contempla el proceso de fabricación, acondicionamiento y evaluación de las propiedades mecánicas de los tres materiales en los cuales se puede descomponer una mezcla asfáltica (Mastico, FAM y Mezcla Asfáltica).

Las características de los materiales empleados y los procedimientos experimentales propuestos en esta investigación se describen a continuación.

Materiales:

Para el desarrollo de la metodología de análisis se seleccionó una curva granulométrica (Figura 1) con tamaño máximo nominal (NMAS) de 9.525 mm y propone trabajar con un ligante asfáltico con penetración 60-70 [1/10 mm] de la refinería colombiana de Barrancabermeja. A partir de estos dos materiales se derivan las tres escalas de análisis que comprende esta investigación.

Figura 1. Curva granulométrica seleccionada para la mezcla asfáltica.



Fuente: Propio

En cuanto al material de escoria siderúrgica este material es el desecho del proceso siderúrgico que conlleva la construcción del acero, la industria del acero en Colombia se

centra en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Risaralda, Santander, Tolima, Cauca y Valle del Cauca paralelamente el territorio cuenta con 6 plantas de acero y 10 plantas de laminación teniendo un total de 5 organizaciones de construcción del acero que son las encargadas de abastecer el mercado nacional e internacionales aquellas organizaciones son:

1. Acerías paz del rio
2. Gerdau Diaco
3. Sidenal
4. Sidoc
5. Ternium

Los tipos de escorias siderúrgicas que podemos encontrar son

1. Escoria de alto horno
2. Escoria de convertidores
3. Escoria de horno de arco eléctrico

La primera escala corresponde a un análisis micro realizado sobre el mástico (Figura 2), el cual se puede definir como la mezcla de asfalto y llenante mineral. Para su elaboración, se plantea las siguientes dos relaciones entre el volumen del llenante mineral y del asfalto: 0.3 y 0.45, las cuales se identificarán como ‘mástico 0.30’ y ‘mástico 0.45’, respectivamente (Figura 2a). La fabricación de este material se realizará empleando la metodología propuesta por Underwood y Kim (Underwood & Kim, 2011). La segunda escala de análisis es a nivel meso, en donde se emplearán especímenes de FAM (mezcla de material granular inferior al tamiz N 16 y asfalto). Para su diseño se propone el diseño de la mezcla asfáltica completa, de donde se emplea la información de la granulometría de la porción inferior a 1.18 mm (Tamiz N 16). Para determinar el porcentaje de asfalto de esta mezcla fina (figura 2b), se aplica la metodología propuesta por Cavalcanti de Sousa (Sousa, 2010), la cual propone tomar la fracción de la granulometría que pasa el tamiz No16 después de fabricada la mezcla asfáltica completa y sobre este material realizar el proceso de extracción de asfalto (Sousa 2010), con el propósito de determinar el contenido de asfalto correspondiente a la porción de FAM. Por último, se lleva a cabo el análisis de las propiedades sobre una mezcla asfáltica (I.N.V.E- Art. 450) que cumple con las especificaciones colombianas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Para su diseño se emplea la metodología Marshall.

Vale la pena aclarar que los materiales empleados para la fabricación de las muestras de ensayo en cada uno de los niveles de análisis serán los mismos, con el objetivo de permitir una relación apropiadas entre sus propiedades.

Figura 2. Materiales empleados para la fabricación de las muestras tipo a) Mástico y b) FAM



Fuente: Eduardo J. Rueda, Silvia Caro. Caracterización multi-escalar del módulo dinámico de corte en mezclas asfálticas

Modificación de los Materiales Asfálticos con la Escoria Siderúrgica:

Teniendo presente la escoria tan solo va a ser reemplazada como parte del llenante mineral. Es válido nombrar que el llenante mineral es la parte del agregado que pasa el tamiz No 200. Por ende, se tomarán 0, 25, 75 y 100 % como los porcentajes de escoria para elaborar los materiales asfálticos. Se pretende tomar dichos 4 contenidos de escoria con el fin de examinar si hay una alteración de la predominación de este material en las características mecánicas de los materiales asfálticos analizados en esta indagación, y de ser de esta forma descubrir la dosis óptima de este material.

El proceso de modificación se va a hacer por vía seca, lo que supone que el contenido de escoria va a ser incorporado en el esqueleto mineral, para luego ser añadido el asfalto para la construcción de la mezcla.

Procedimientos de Acondicionamiento Bajo Ambientes Húmedos:

Teniendo presente que este trabajo no solo busca establecer el impacto que el material de escoria de siderurgia en las mezclas asfálticas sobre sus características mecánicas (Módulo dinámico), sino además sobre su funcionamiento ante fronteras del medio ambiente, este protocolo de ensayo incluye un proceso de acondicionamiento a diferentes valores de humedad relativa. Dichos ambientes a diferentes valores de humedad relativa han sido creados usando la técnica de equilibrio de vapor (ASTM Standard E104-02), la cual se basa en localizar una solución salina en un recipiente hermético. La rapidez de trueque entre partículas gaseosas y líquidas lo ordena esta solución y es la que crea el costo de humedad relativa del ambiente. Para la preparación de la solución salina se debería usar agua destilada

y alguna de las sales higroscópicas. En la tabla 2 se muestran las sales recomendadas para usar en esta indagación junto con la concentración de sal para elaborar la solución.

Tabla 2. Tabla de sales higroscópicas.

Sal		Humedad Relativa [%]	Concentración de sal [g / 100ml de agua]
Silica*	SiO ₂	8	380
Cloruro de calcio	CaCl ₂	31	97
Carbonato de Potasio	K ₂ CO ₃	46	115
Cloruro de sodio	NaCl	80	36
Agua destilada**	H ₂ O	100	0

* Agua no requerida

** Sal no requerida

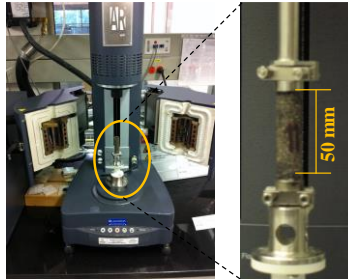
Fuente: Propia

El proceso de acondicionamiento humedades relativas de cada uno de los elementos empleados en las diferentes escalas se controla mediante la técnica gravimétrica; es decir, mediante la medición de las diferencias de peso de las muestras a lo largo del tiempo. Se considera que una muestra ha alcanzado una condición de estado estable cuando la diferencia de peso de dos medidas consecutivas se considera insignificante (es decir, menos del 0,01%). Alcanzado este estado, se prosigue con la caracterización mecánica de las muestras asfálticas.

Procedimientos Experimentales para a Caracterización de los Materiales Asfálticos:

La caracterización de las propiedades viscoelásticas para los materiales correspondientes a las dos primeras escalas de análisis (i.e., mastico y FAM) se realiza mediante la utilización de un reómetro de corte dinámico. Teniendo en cuenta la consistencia del mastico, se emplea la geometría de platos paralelos. Esta geometría consiste en ubicar una delgada lámina del material viscoelástico entre dos platos de acero, sobre la cual se aplican esfuerzos o deformaciones a torsión. Debido a la diferencia en rigidez del mastico se emplea la geometría de 8 mm de diámetro y 2 mm de altura. La determinación de las propiedades de los especímenes tipo FAM se realizó empleando la geometría de sólidos del reómetro. Los especímenes FAM de ensayo son cilindros de 50 mm de altura y 13 mm de diámetro (Figura 3). La fabricación de estas muestras consiste en la preparar de una probeta de 150 mm de diámetro y 90 mm de altura en el compactador giratorio Superpave, sobre la cual se realiza la extracción de los pequeños cilindros mediante el uso de una broca.

Figura 3. Configuración geométrica para los especímenes FAM



Fuente: Eduardo J. Rueda, Silvia Caro. Caracterización multi-escalar del módulo dinámico de corte en mezclas asfálticas

A diferencia de los dos primeros materiales, la caracterización de la mezcla asfáltica se realiza en un equipo MTS (Mechanical Testing System). Este equipo se caracteriza por su capacidad para reproducir una amplia variedad de trayectorias de esfuerzos, siendo capaz de aplicar esfuerzos axiales de tensión-compresión.

Figura 4. Dimensiones del Espécimen de mezcla asfáltica.



Fuente: <http://www.sitecal.com.bo/files/8.%20METODO%20DE%20DISENO%20MARSH%20ALL.pdf>

El método experimental se basa en usar los equipamientos MTS para decidir las características viscoelásticas lineales de los materiales asfálticos ($|E^*|$) bajo esfuerzos de corte, frente a variaciones de temperatura del ensayo y frecuencia de aplicación de carga. Debido al uso de 2 grupos para la decisión de las características, el reómetro para ensayar el mastico y la FAM, y el MTS para la mezcla asfáltica, se emplearan 2 configuraciones diferentes de ensayo. La metodología empleada en el reómetro se basa en decidir $|G^*|$ frente a un barrido de frecuencias en un rango de 1 Hz y 20 Hz, en intervalos de 1 Hz, y un barrido de temperaturas entre 25°C y 75°C, en intervalos de 10°C. La caracterización de las características de la mezcla asfáltica se hace implementando un barrido de frecuencias

(I.N.V.E -754-07) de 1 Hz hasta 16 Hz, en intervalos de 2 Hz, y un barrido de temperaturas a partir de 5°C hasta 60°C, en intervalos de 15°C.

En conclusión, la metodología propuesta busca evaluar el cambio en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en sus tres niveles de análisis, así como también busca evaluar la influencia que tiene el contenido de este material en el desempeño de sus propiedades. La tabla 3 contabiliza la cantidad de ensayos que se tendrán que realizar para poder evaluar el efecto que tiene la escoria siderúrgica en una mezcla asfáltica. Es válido tener en cuenta que para el cálculo de estas cantidades se considera que se evaluarán 4 contenidos de escoria y 5 valores de humedad relativa. También es importante tener en cuenta que la volumetría influye de forma importante en las propiedades mecánicas de los materiales, es importante la determinación de la gravedad máxima teórica (Gmm) (I.N.V.E.-735-07) de las mezclas asfálticas y la gravedad específica bulk (Gmb) (I.N.V.E.-733-07), ya que con estos dos valores es posible determinar el contenido de vacíos de la mezcla.

Tabla 3. Cantidad de ensayos propuestos.

Material	Ensayo	Total
Mastico	Reología G*	60
	Reología G*	60
FAM	Gravedad máxima teórica (Gmm)	12
	Gravedad específica Bulk (Gmb)	12
Mezcla asfáltica	Módulo Dinámico E*	60
	Gravedad máxima teórica (Gmm)	12
	Gravedad específica Bulk (Gmb)	12

Fuente: Propia

8. RESULTADOS ESPERADOS

Como resultado de este trabajo se presenta el protocolo de elaboración y evaluación de la del comportamiento mecánico para una mezcla asfáltica MDC 19 cuanto esta es modificada con diferentes porcentajes de escoria como parte del llenante mineral. Pero teniendo en cuenta que los procedimientos experimentales no fueron realizados debido a la actual situación por la cual está pasando el mundo entero, decidimos realizar un análisis de los resultados que esperamos basados en las investigaciones analizadas en este trabajo.

- Se espera que esta indagación y el protocolo postulado sienten las bases para una búsqueda en la que se lleven a cabo los ensayos necesarios para revisar si la escoria siderúrgica, como sustituto parcial del llenante mineral, en una mezcla asfáltica pueda tener un impacto positivo en las características físico-mecánicas y de manejo de la mezcla asfáltica.
- Se espera que el uso de la escoria siderúrgica en mezclas asfálticas dé un nuevo lugar de disposición final a este tipo de desechos de la industria siderúrgica, que como se expuso en esta investigación en Colombia es cada vez más grande. Por ende, este tipo de desechos que terminan en lugares como canteras de residuos de construcción y aunque el riesgo de toxicidad a los suelos por escoria siderúrgica es pequeño a medida que se incrementan los desechos este riesgo podría incrementar y con esta alternativa de uso de la escoria siderúrgica no solo se da un mejor lugar de disposición final de este material también se baja es riesgo de que pueda contaminar el suelo por ser dispuesta en canteras de residuos de construcción.
- Se espera que la adaptación a la humedad por medio de la técnica de equilibrio de vapor no tenga impactos negativos en las mezclas asfálticas con incorporación parcial y total de escoria siderúrgica como llenante mineral, ya que este ensayo es someter las muestras a un escenario más real a las condiciones que se encuentra en la vida real cuando una mezcla asfáltica está en funcionamiento bajos cargas de servicio.
- Se espera que la sustitución parcial del llenante mineral de la mezcla asfáltica por escoria siderúrgica tenga impactos positivos en sus propiedades físico-mecánicas, esto basado en la revisión bibliográfica que se llevó a cabo en donde se pudo evidenciar que al sustituir parcialmente los agregados de una mezcla asfáltica en cualquiera de sus partes (agregado grueso, agregado fino, llenante mineral) las propiedades físico-mecánicas mejoraron. Se evidencio este impacto positivo solo cuando los agregados de la mezcla fueron sustituidos parcialmente en la mezcla asfáltica.

- Establecer un documento con el protocolo para el diseño y análisis de la susceptibilidad a la humedad, empleando tres escalas de los materiales asfálticos cuando estos son modificados con escoria de la industria siderúrgica como reemplazo total o parcial del llenante mineral.

9. CONCLUSIONES

- En este trabajo de investigación se propuso una nueva alternativa de uso de la escoria siderúrgica como llenante mineral en una mezcla asfáltica para poder ser evaluado a diferentes niveles de escala, para así determinar su influencia en las propiedades de una mezcla asfáltica.
- En la ingeniería civil se tiene responsabilidad con el medio ambiente, es por eso que para esta investigación se propone la técnica de adición de la escoria proveniente de la industria siderúrgica y el protocolo de ensayo para evaluar el desempeño bajo condiciones de humedad relativa. Este protocolo abarca las 3 escalas de los materiales asfálticos (i.e. Micro-masticos, Meso-mezcla asfáltica fina y Macro-mezcla asfáltica en caliente).
- Con respecto a la muestra, en la cual se reemplazará el llenante mineral por escoria siderúrgica podría ser más rígida, lo cual provocaría en la mezcla una mayor resistencia al ahuellamiento y se podría estar deteriorando su vida a la fatiga. Por lo tanto, surge como un siguiente paso el evaluar el desempeño tanto a fatiga como a ahuellamiento una vez se logre determinar cuál es la influencia de este material en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.
- Teniendo en cuenta que en el protocolo aquí propuesto se emplea un asfalto con penetración 60/70 y de acuerdo con la conclusión anterior, donde existe la posibilidad que la escoria haga un poco más rígida la mezcla, se recomienda realizar este mismo ensayo, pero con un asfalto clasificado como 80/100, una vez se conozcan los resultados en el asfalto 60/70.
- Las escorias de alto horno si se pueden utilizar como un sustituto del agregado pétreo natural porque de acuerdo con sus propiedades físicas aseguran una mayor resistencia a las cargas vehiculares que va a soportar la mezcla asfáltica. Esto se evidenció en consultas bibliográficas que se realizaron.
- Se debe seguir realizando las diferentes investigaciones para ver en los diferentes escenarios cómo se comporta este tipo de mezclas para seguir observando su comportamiento bajo cargas de servicio.
-

10. BIBLIOGRAFIA

1. Lopez Caiza, D. R., & Alvarez Sanchez , N. E. “Mejoramiento de la Carpeta Asfáltica a Base de Escoria Siderurgica para Pavimentos Flexibles (Mezcla Asfáltica)”. Quito: Universidad Politecnica Salesiana Sede Quito, 2017.
2. Sanchez, d. F. “evaluacion de la resistencia bajo carga monotonica de una mezcla asfaltica, fabricada con escoria de acero”. Bogota dc: universidad distrital francisco jose de caldas, 2017.
3. Rondon Quintana, H. A., Ruge Cardenas, J. C., & Bastidas Martinez, J. G. “Evaluation of hot-mix asphalt containing portland cement treated blast furnace slag”. Archives of civil engineering sciendo, 2019, 193-207 p.
4. Ochoa Diaz, R., Grimaldo Leon, G. E., Orjuela Fajardo, M., & Muñoz Leon, C. “Analysis of use granulated slag in asphalt mixtures manufacturing for pavements”. Revista Espacios, 2018 , 2-14 p.
5. Marcote Catolico, C. A. “Evaluacion del desempeño mecanico de mezclas asfalticas con escorias de acero”. Bogotá D.C: Universidad Nacional De Colombia, 2019.
6. Rondon Quintana, H. A., Muniz de Farias, M., & Reyes Lizcano, F. A. (2018). “Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfalticas”. Revista Ingenierias Universidad de Medellin, 2018, 71-97 p.
7. Espejel Garcia, D., Villalobos Aragon, A., Espejel Garcia, V. V., & Wenlas Lara, G. “Uso y reciclaje de escoria de alto horno en bases para pavimentos”. Congreso Mexicano del Asfalto, 2017, 1-7 p.
8. López Días, A., Ochoa Días, R., & Grimaldo León, G.E, (2018). "Use of bof slag and blast furnace dust in asphalt concrete: an alternative for the construction of pavements".Medellin: Universidad Nacional De Colombia, 2018, 1-7 p.
9. Nasimba Chanataxi, D.A. "aplicación de la escoria de fundición de hierro como agregado en las mezclas de hormigón para pavimentos rígidos”. Quitó: Universidad Politécnica Salesiana, 2017, 1-20 p.
10. Monterrosa, H., (2020). Toneladas de residuos que genera anualmente. Colombia: La República. <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/colombia-podria->

aprovechar-cerca-de-40-de-los-116-millones-de-toneladas-de-residuos-que-genera-al-ano-2813141

11. ICCET/CSIC. Escorias de alto horno: composición y comportamiento. España: Consejo Superior De Investigación Cientificas,1993, 1-12 p.
12. Rosa Zuñiga, C. "*mezcla asfáltica en caliente*". Santiago De Chile: Laboratorio Nacional De Vialidad, 2015.
13. P. Cavalcanti de Sousa, Automated Protocol for analysis of dynamic mechanical analyzer data from fine aggregate asphalt mixes, 2010.
14. Astm Standard E104-02, Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions, American society for testing materials, 2012.
15. I.N.V.E-754-07, Modulo dinamico de mezclas asfálticas, Instituto Nacional de Vias, 2013.
16. I.N.V.E-733-07, Gravedad Especifica Bulk y Dencidad de Mezclas Asfálticas Compactadas no Absorventes Empleando Espcimenes Saturados y Superficies Seca, Instituto Nacional de Vias, 2013.
17. I.N.V.E.-735-07, Gravedad Especifica Maxima Teorica (Gmm) y Densidad de Mezclas Asfálticas Para Pavimentos, Instituto Nacional de Vias, 2013.
18. I.N.V.E-Art. 450, Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua (Concreto Asfáltico) Artículo 450-13, Instituto Nacional de Vías, 2013.