

**IMPLEMENTACIÓN DE ESCORIA NEGRA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO
(ENHAE) COMO AGREGADO GRUESO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA**

ANGIE DANNIELA NOVOA MENDIVELSO

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
TUNJA
2018

**IMPLEMENTACIÓN DE ESCORIA NEGRA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO
(ENHAE) COMO AGREGADO GRUESO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA**

ANGIE DANNIELA NOVOA MENDIVELSO

Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero Civil

Director: Ingeniero Héctor Mauricio Sánchez Abril, M.Sc.

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
TUNJA
2018

Nota de aceptación:

Firma Director de proyecto

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 10 de Julio de 2018

Dedicado a mi familia

Apoyo constante, Norte y polo a tierra.

Mi motor de empuje y guía en el camino,

Siendo luz en el sendero y refugio en tormentas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por bendecir cada paso dado en el transcurso de mi carrera, al ser el pilar que me brindó sabiduría para llevar a cabo la ejecución del proyecto de manera apropiada y así cumplir con las metas establecidas.

A la empresa IBS de Colombia

Por brindar acompañamiento práctico y analítico, proporcionando no solo los medios y elementos necesarios para la ejecución de los ensayos de laboratorio bajo las normas de calidad de cada uno de los factores en que intervinieron, sino contribuyendo con la donación de materias primas requeridas para la elaboración de los diseños y brindando total asesoría, orientándome ante situaciones desconocidas en el área de pavimentos para alcanzar siempre el mejor resultado al ser una guía demostrando dedicación y compromiso.

Y a todas aquellas personas que unieron esfuerzos para hacer posible la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	15
RESUMEN.....	22
ABSTRACT.....	23
INTRODUCCION	24
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	25
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	25
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	29
1.3 JUSTIFICACIÓN	29
1.4 OBJETIVOS	32
1.4.1 Objetivo general.....	32
1.4.1 Objetivos específicos.....	32
2. MARCO REFERENCIAL	33
2.1 estado del arte internacional.....	33
2.2 estado del arte nacional	37
3. DISEÑO METODOLÓGICO	40
3.1 metodología muestral	41

3.2	metodología CON BASE AL CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS.....	46
3.2.1	Planteamiento del problema de investigación, objetivos y justificación .	46
3.2.2	Recolección y codificación de información	47
3.2.3	Delimitación de alcances y limitantes	48
3.2.4	Determinación de pruebas y ensayos de laboratorio	49
3.2.5	Determinación de materiales	52
3.2.6	Etapas de desarrollo	53
4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	55
4.1	PETROGRAFÍA BÁSICA (MACROSCOPIA).....	55
4.2	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS INV E – 213 – 13.....	63
4.2.1	Escoria negra de horno de arco eléctrico (ENHAE).....	63
4.2.2	Arena de trituración.....	66
4.3	DUREZA, AGREGADO GRUESO.....	67
4.3.3	Determinación del 10% de finos INV E – 224 - 13.....	71
4.4	LIMPIEZA, GRADACIÓN COMBINADA.....	73
4.4.1	Equivalente de arena de suelos y agregados finos INV E – 133 - 13....	73
4.5	GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS, escoria	75
4.5.1	Índice de alargamiento y aplanamiento de los agregados para carreteras INV E – 230 – 13	75
4.5.2	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E – 227 - 13.	77
4.6	GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS, AGREGADO FINO (ARENA)	78

4.6.1	Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) INV E – 239 - 13	78
4.7	DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA.....	79
4.7.1	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall INV E – 748- 13.....	80
4.7.1.1	Granulometría combinada	81
4.7.1.2	Diseño Marshall	83
4.7.2	Propiedades volumétricas.....	87
5.	CONCLUSIONES	93
6.	RECOMENDACIONES.....	95
	BIBLIOGRAFIA.....	96
	ANEXOS	101

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables de investigación	41
Tabla 2. Resultados directos esperados en relación con los objetivos planteados	43
Tabla 3. Pruebas de laboratorio establecidas	50
Tabla 4. Cantidad de material requerido para briquetas	52
Tabla 5. Fuente de obtención de materiales	53
Tabla 6. Clasificación de color de la ENHAE	58
Tabla 7. Resultado de análisis de resistencia con base en los índices de campo de González de Vallejo	62
Tabla 8. Información de granulometría a ENHAE	64
Tabla 9. Resultados granulometría a ENHAE	65
Tabla 10. Información granulometría a arena de trituración	66
Tabla 11. Resultados granulometría a arena de trituración	67
Tabla 12. Material contenido para ensayo en máquina de los ángeles	68
Tabla 13. Resultados de desgaste en máquina de los ángeles	69
Tabla 14. Contenido de ENHAE por tamiz para ensayo en aparato Micro-Deval ..	70
Tabla 15. Resultado ensayo Micro-Deval	71
Tabla 16. Resultados ensayo de determinación del 10% de finos en la ENHAE ...	72
Tabla 17. Datos ensayo "Equivalente de arena"	74
Tabla 18. Información del material	75
Tabla 19. Resultados de alargamiento y aplanamiento	76
Tabla 20. Resultados de caras fracturadas	78
Tabla 21. Resultados de angularidad en agregados finos	79
Tabla 22. Fórmula de trabajo para MDC-19	80
Tabla 23. Información de granulometría combinada para diseño de mezcla asfáltica	82

Tabla 24. Información briquetas ensayadas	84
Tabla 25. Resultado de estabilidad y flujo para briquetas ensayadas	86
Tabla 26. Consolidación final de resultados de diseño de mezcla	92
Tabla 27. Material resultante del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles a ENHAE con 100 revoluciones.....	118

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Forma de los agregados pétreos. i.Redondeada, ii. Irregular, iii. Angular, iv. Lajosa, v. Alargada, vi. Alargada-Lajosa	55
Figura 2. Selección de partículas de ENHAE para análisis visual	56
Figura 3. Redondez y esfericidad de las partículas	57
Figura 4. Muestra de ENHAE.....	57
Figura 5. Evidencia de color en ENHAE	58
Figura 6. Carta de estimación de porcentaje de poros	60
Figura 7. Evidencia de porosidad en ENHAE	61
Figura 8. Curva granulométrica de ENHAE	65
Figura 9. Curva granulométrica arena de trituración.....	67
Figura 10. Explicación de la relación de material para briquetas.....	81
Figura 11. Curva granulométrica combinada para diseño de mezcla asfáltica	83
Figura 12. Peso específico vs. % asfalto - Diseño Marshall	88
Figura 13. % vacíos con aire vs. % de asfalto - Diseño Marshall.....	88
Figura 14. % vacíos en agregado mineral vs. % de asfalto	89
Figura 15. % de volumen lleno de asfalto vs. % de asfalto - Diseño Marshall	89
Figura 16. Estabilidad vs. % de asfalto - Diseño Marshall	90
Figura 17. Flujo vs. % de asfalto - Diseño Marshall	90

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Valores medios mensuales de temperatura, estación UPTC-IDEAM ...	101
Anexo 2. Factor de ponderación estación UPTC-INVIAS	102
Anexo 3. TMPA estación UPTC.....	102
Anexo 4. Información de TPDs estación N°1 Tunja-Ventaquemada	103
Anexo 5. Niveles de tránsito estimados por el INVIAS	103
Anexo 6. Carta de solicitud de material a SIDENAL S.A-Página 1 de 2	104
Anexo 7. Carta de solicitud de material a SIDENAL S.A-Página 2 de 2	105
Anexo 8. Tipo de asfalto por emplear en mezclas asfálticas en caliente de gradación continúa	106
Anexo 9. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.....	106
Anexo 10. Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall	107
Anexo 11. Partículas de ENHAE para análisis macroscópico - Parte 1	107
Anexo 12. Partículas de ENHAE para análisis macroscópico - Parte 2.....	108
Anexo 13. Partículas de ENHAE para análisis macroscópico - Parte 3.....	108
Anexo 14. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 1	108
Anexo 15. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 2	109
Anexo 16. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 3	109
Anexo 17. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 4	109
Anexo 18. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 5	110

Anexo 19. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia, prueba de raya con navaja.....	110
Anexo 20. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia, escoria después de prueba con martillo en roca sin macroporosidad.....	110
Anexo 21. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia, escoria después de prueba con martillo en roca con macroporosidad parte 1.....	111
Anexo 22. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia, escoria después de prueba con martillo en roca con macroporosidad parte 2.....	111
Anexo 23. Resistencia a partir de índices de campo	111
Anexo 24. Prueba de aplanamiento de la ENHAE	112
Anexo 25. Partícula correspondiente a aplanamiento entre 1" - 1 1/2"	112
Anexo 26. Partícula correspondiente a aplanamiento entre 1/4" - 1/2".....	112
Anexo 27. Aplanamiento de escorias negras 1 1/2" - 1"	113
Anexo 28. Aplanamiento de escorias negras 1" - 3/4"	113
Anexo 29. Aplanamiento de escorias negras 3/4" - 1/2"	113
Anexo 30. Aplanamiento de escorias negras 1/2" - 3/8"	114
Anexo 31. Aplanamiento de escorias negras 3/8" - 1/4"	114
Anexo 32. Aplanamiento de escorias negras 2" - 1 1/2"	114
Anexo 33. Alargamiento en ENHAE	115
Anexo 34. Alargamiento en ENHAE 1/2" - 3/4"	115
Anexo 35. Alargamiento en ENHAE 3/8" - 1/2".....	115
Anexo 36. Alargamiento en ENHAE 1/2" - 3/4"	116
Anexo 37. Alargamiento en ENHAE 3/4" - 1".....	116
Anexo 38. Alargamiento en ENHAE 1" - 1 1/2".....	116
Anexo 39. Partículas de ENHAE utilizada para ensayo en máquina de los ángeles	117
Anexo 40. Material resultante del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles a ENHAE con 500 revoluciones.....	117
Anexo 41. Material resultante del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles a ENHAE con 500 revoluciones retenido en el tamiz N°12.....	117

Anexo 42. Material resultante del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles a ENHAE con 500 revoluciones que pasa tamiz N°12.....	118
Anexo 43. Material utilizado para ensayo de caras fracturadas.....	118
Anexo 44. Ensayo de equivalente de arena	119
Anexo 45. Arena de trituración para ensayo de angularidad en finos.....	119
Anexo 46. ENHAE requerida para briquetas	119
Anexo 47. Asfalto para briquetas	120
Anexo 48. Asfalto en el horno para mantener su temperatura.....	120
Anexo 49. Control de temperatura del horno para el asfalto.....	120
Anexo 50. Muestra de arena de trituración para briquetas	121
Anexo 51. Mezcla de arena y escoria para briqueta	121
Anexo 52. Adición de asfalto a mezcla de escoria y arena para briquetas	121
Anexo 53. Proceso de unificación de asfalto con agregados-Parte 1	122
Anexo 54. Proceso de unificación de asfalto con agregados-Parte 2.....	122
Anexo 55. Proceso de unificación de asfalto con agregados-Parte 3.....	122
Anexo 56. Medición de temperatura al inicio del proceso de mezclado.....	123
Anexo 57. Medición de temperatura de la mezcla en el molde (mordaza)	123
Anexo 58. Briquetas ensayadas-Parte 1.....	123
Anexo 59. Briquetas ensayadas-Parte 2.....	124
Anexo 60. Briquetas ensayadas-Parte 3.....	124
Anexo 61. Briquetas ensayadas-Parte 4.....	124
Anexo 62. Briquetas sumergidas en agua	125
Anexo 63. Toma de peso SSS a briquetas	125
Anexo 64. Control de temperatura baño maría	125
Anexo 65. Muestra en baño maría.....	126
Anexo 66. Ensayo de estabilidad y flujo para briquetas.....	126
Anexo 67. Carta de solicitud de acceso a instalaciones para hacer uso de equipos con motivo de realización de ensayos de laboratorio-Parte 1.....	127
Anexo 68. Carta de solicitud de acceso a instalaciones para hacer uso de equipos con motivo de realización de ensayos de laboratorio-Parte 2.....	128

GLOSARIO

ABRASIÓN: Se manifiesta de dos formas distintas: como modificación del aspecto superficial y como remoción de material. Naturalmente, la modificación del aspecto es consecuencia de una alteración de la superficie, atribuida a la pérdida de materia (Abitante 2014).

ACOPIO: Acumulación planificada de materiales destinados a la construcción de una obra (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones 2001)

ADHERENCIA: En el diseño de mezclas asfálticas está relacionado a la afinidad del agregado por el asfalto, es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto (Silene Minaya Gonzalez 2001).

AGREGADO FINO: Material proveniente de la desintegración natural o artificial de partículas cuya granulometría es determinada por las especificaciones técnicas correspondientes. Por lo general pasa la malla N° 4 (4,75 mm) y contiene finos (INVIAS 2013b).

AGREGADO GRUESO: Material proveniente de la desintegración natural o artificial de partículas cuya granulometría es determinada por las especificaciones técnicas correspondientes. Por lo general es retenida en la malla N°4 (4,75 mm) (INVIAS 2013b).

ARENA VERDE: Se utiliza comúnmente en la industria del metal para la fundición de molde en el que el acero fundido, procedente del horno, se vierte (Vega-Zamanillo et al. 2017). Se compone principalmente de arena de sílice (85 - 95%), bentonita (4 - 10%), aditivos (2 - 10%) y agua (2 - 5%) (Vega-Zamanillo et al. 2017)

BRIQUETA: Es un anglicismo con el cual se denomina al espécimen formado empleando un molde de acuerdo a la prueba que se vaya a realizar (American Association of State Highway Officials)

CAPA DE RODADURA: Capa superior de un pavimento que está en contacto con el tránsito (INVIAS 2013c, 2013b)

CEMENTO ASFÁLTICO: Ligante asfáltico producido a partir de residuos del petróleo, con o sin la adición de modificadores orgánicos no particulados (INVIAS 2013c)

CUARTEO: Procedimiento empleado para reducir el tamaño original de una muestra de suelo o agregado pétreo, cuyo objetivo es obtener una muestra representativa del material y de un tamaño acorde a los requerimientos del ensayo a realizar (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones 2001).

DEGRADACIÓN: Es típica la ocurrencia de la degradación cuando se compacta un material granular residual (INVIAS 2013a).

DESINTEGRACIÓN: La separación progresiva de partículas de agregado en el pavimento, desde la superficie hacia abajo o desde los bordes hacia el interior. La desintegración puede ser causada por falta de compactación, construcción de una capa muy delgada en periodos fríos, agregado sucio o desintegrable, muy poco asfalto en la mezcla, o sobrecalentamiento de la mezcla asfáltica (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

DURABILIDAD: La propiedad de una mezcla asfáltica de pavimentación para resistir desintegración por efectos ambientales o de tráfico. Los efectos ambientales incluyen cambios en las características del asfalto, tales como oxidación y volatilización, cambios en el pavimento y en el agregado debido a la acción del agua, incluyendo congelamiento y deshielo (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

DUREZA: La dureza de la arena gruesa y de las partículas mayores se deberá descubrir como “dura”, o mencionar lo que sucede cuando las partículas son golpeadas con un martillo. Por ejemplo: “las partículas de grava se fracturan con

considerable número de golpes de martillo” o “algunas partículas se desmoronan con un golpe de martillo”. “Duras” quiere decir partículas que no se agrietan, fracturan ni desmoronan bajo un golpe de martillo (INVIAS 2013a).

EMULSIÓN ASFÁLTICA: Se definen como emulsiones asfálticas las dispersiones de pequeñas partículas de un ligante hidrocarbonado en una solución de agua y un agente emulsionante de carácter aniónico o catiónico, lo que determina la denominación de la emulsión (ALDUNDIA, LANAK y BIZKAIA 1998).

EQUIVALENTE DE ARENA: Una medida numérica de la contaminación por limo o arcilla en el agregado fino (o suelo), según lo determina este ensayo (INVIAS 2013a).

ESCORIA: Un producto no metálico, compuesto esencialmente por silicatos y aluminio-silicatos de cal y otras bases, que se obtiene simultáneamente, en un alto horno, con la producción del hierro (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

ESPESOR: Es la altura o grosor que tiene una capa de terraplén y/o pavimento (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

ESTABILIDAD: La propiedad de una mezcla asfáltica de pavimentación de resistir deformación bajo las cargas impuestas. La estabilidad es una función de la cohesión y la fricción interna del material (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

FATIGA: Reducción de la resistencia de un material bajo la aplicación repetida de una carga, cuando se compara con la resistencia bajo una aplicación única de esa carga (INVIAS 2013c)

FILLER: Es un aditivo que se usa en caso que el agregado fino no cumpla la granulometría de diseño en una mezcla de asfalto. Por lo general esta proviene de la caliza pulverizada, polvos de roca, cal hidratada, cemento Pórtland, y ciertos

depósitos naturales de material fino (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

FISURA: Quiebre o rotura que afecta a las capas estructurales del pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es igual o menor que 3 mm (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones 2001).

FLUJO: Medido en centésimas de pulgada, lo cual representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta (Pruebas de desempeño para mezclas asfáltica)

FLUJO DE TRÁNSITO: Movimiento de vehículos que se desplazan por una sección dada de una vía, en un tiempo determinado (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

GRADOS DE PENETRACIÓN: En los cementos asfálticos es un sistema de clasificación basado en la penetración a una temperatura de 25°C. Existen cinco grados patrones de clasificación: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300 (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

GRANULOMETRÍA: Representa la distribución de los tamaños que posee el agregado mediante el tamizado según especificaciones técnicas (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

GRIETA: Quiebre o rotura que afecta a las capas estructurales del pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es mayor que 3 mm (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones 2001).

HUMEDAD: Porcentaje de agua en suelo o material (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO GLOBAL: Porcentaje en masa de las partículas largas de la fracción. Masa total de las partículas largas, expresada como porcentaje de la masa total seca de las partículas sometidas al ensayo (INVIAS 2013b).

ÍNDICE DE APLANAMIENTO GLOBAL: Masa del total de las partículas planas, expresadas como porcentaje de la masa total seca de las partículas sometidas al ensayo (INVIAS 2013b).

INESTABILIDAD: La pérdida de resistencia a las fuerzas que tienden a ocasionar movimiento o distorsión de una estructura del pavimento (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

INFRAESTRUCUTRA VIAL: Todo camino, arteria, calle o vía férrea, incluidas sus obras complementarias, de carácter rural o urbano de dominio y uso público y privado (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

MÉTODO MARSHALL: Procedimiento para obtener diferentes parámetros de calidad de una mezcla bituminosa (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE: Combinación de agregados pétreos y cemento asfáltico en una planta en la cual los materiales son calentados, dosificados y mezclados para producir la mezcla de pavimentación deseada (Sabogal).

NT1: Nivel de tránsito uno. Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es inferior a 0.5×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño (INVÍAS 2007).

NT2: Nivel de tránsito dos. Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir oscila entre 0.5×10^6 y 5.0×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño (INVÍAS 2007).

NT3: Nivel de tránsito tres. Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es superior a 5.0×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño (INVÍAS 2007).

PAVIMENTO FLEXIBLE: Consisten de una superficie de desgaste o carpeta relativamente delgada construida sobre unas capas (Base y Sub-Base), apoyándose este conjunto sobre la subrasante compactada, de manera que la sub-base, base y superficie de desgaste o carpeta son las componentes estructurales de este tipo de pavimento (Rico 2005).

PAVIMENTO: Estructura construida sobre la subrasante de la vía, para resistir y distribuir los esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por capas de subbase, base y rodadura (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

PETROGRAFÍA: Es la identificación y descripción de las rocas; se incluye como parte de ella el estudio sistemático de las rocas. La petrografía trata de los orígenes de las rocas. Aunque la petrografía es principalmente descriptiva, los orígenes se toman en cuenta en su clasificación que frecuentemente es genética (Guill)

POROSIDAD: Es la relación entre el volumen de huecos de la roca y su volumen total (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

SEGREGACIÓN: Separación de ciertas partículas de un material o mezcla, durante su transporte o colocación (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones 2001).

SIDERURGIA: Comprende una larga serie de fases productivas que van desde la obtención del acero hasta las diferentes líneas de producción (Pinto et al. 2011)

TAMIZ: Aparato, en un laboratorio, usado para separar tamaños de material, y donde las aberturas son cuadradas (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

TAMIZADO: - Operación que consiste en separar por tamaño las partículas de un agregado, mediante tamices (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones 2001).

TEXTURA DE UNA PARTÍCULA DE PÉTREO: Características secundarias de la superficie de la partícula, independiente de la forma y tamaño. Para su descripción se emplean los términos opaca, brillante, suave, áspera, estriada, etc (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones 2001).

TRABAJABILIDAD: La facilidad con que las mezclas de pavimentación pueden ser colocadas y compactadas (Ministerio de transportes y comunicaciones del Perú 2008).

TRÁNSITO: Es la movilización de personas, animales o vehículos por una vía pública o privada abierta al público (Mintransporte, 2016).

VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL: Es el volumen de vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla compactada; incluye los huecos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen total (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones 2001).

RESUMEN

Los diversos procesos metalúrgicos generan una serie de materiales, dentro de los cuales se encuentra la escoria negra, siendo un subproducto proveniente del acero y de los residuos de la fabricación del hierro colado y del acero industrial. Al llevarse a cabo una producción elevada de los mismos, se establece en un contexto predominante la incentivación de su consumo como alternativa potencial de incorporación dentro de la composición de la mezcla asfáltica para posteriormente presentarse la consolidación de los componentes que integran la estructura de la capa de rodadura, a manera de generar un impacto positivo no solo al diseño del mismo, sino en aspectos medioambientales, al brindar un área de implementación de esta tipología de residuos siderúrgicos; todo esto respaldado por una serie de ensayos de laboratorios que incluyan el estudio de la petrografía básica de elemento, y la respuesta frente a diversos condicionamientos físicos y mecánicos reales, implementando muestra de material (ENHAE) proveniente de la Siderúrgica "SIDENAL S.A." localizada en la ciudad de Sogamoso, municipio aledaño a la ciudad de Tunja, de tal manera se garantizará que los resultados obtenidos sean aptos para las condiciones de Tunja- Boyacá para ser implementado en la construcción de pavimentos flexibles con base en la norma INVIAS-13.

Palabras Clave: Escorias negras, mezcla asfáltica, pavimento flexible, siderúrgica.

ABSTRACT

The various metallurgical processes generate a series of materials, among which is the black slag, being a by-product from steel and waste from the manufacture of cast iron and industrial steel. When carried out a high production of the same, is established in a predominant context the incentivation of its consumption as a potential alternative of incorporation within the composition of the asphalt mixture to subsequently present the consolidation of the components that make up the structure of the layer rolling, in order to generate a positive impact not only to the design of the same, but in environmental aspects, by providing an area of implementation of this type of steel waste; all this supported by a series of laboratory tests that include the study of the basic element petrography, and the response to various real physical and mechanical constraints, implementing material sample (ENHAE) from the SIDERNAL "SIDENAL SA" located in The city of Sogamoso, a municipality adjacent to the city of Tunja, will ensure that the results obtained are suitable for the conditions of Tunja-Boyacá to be implemented in the construction of flexible pavements based on the INVIAS-13 standard.

Keywords: Asphalt mix, black slag, flexible pavement, steel.

INTRODUCCION

El creciente aumento en la construcción de infraestructura vial conlleva a buscar alternativas que permitan evidenciar la optimización de materiales en pro de una mejor calidad de las vías. A raíz de ello nace el planteamiento de incursionar en el sector de la pavimentación con la alternativa enfocada al agregado grueso en la mezcla asfáltica que constituye la capa de rodadura, al sustituirse este con escorias negras de horno de arco eléctrico (ENHAE).

Esta sustitución se encuentra sustentada por una serie de ensayos de laboratorio establecidos de acuerdo las estipulaciones del INVIAS 2013 en sus secciones 100 (Suelos), 200 (agregados pétreos) y 700 (materiales y mezclas asfálticas), junto con las especificaciones generales de construcción presentadas en el capítulo 4 (pavimentos asfálticos) y el manual del ministerio de minas para materiales pétreos en estructuras viales, en donde establece los lineamientos de evaluación y análisis.

De igual manera, se establece como alcance un diseño de mezcla basado en el reemplazo del agregado grueso por la escoria garantizando el cumplimiento de los requerimientos mecánicos y físicos, y como contraparte limitante de investigación el componente ambiental, considerando los requerimientos de tiempo para realización del mismo no menor a 20 años, y el componente relacionado a la composición química de la escoria.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Desde el inicio de los tiempos tras la conformación de grupos de personas unidas como integrantes de una sociedad, nace consigo la necesidad de obtener medios terrestres de comunicación para contribuir a un mejor desplazamiento de las mismas, de animales y mercancías, motivo por el cual se empiezan a construir caminos en diversos tipos de piedras que con el pasar del tiempo empezaron a ser insuficientes ante las nuevas solicitudes de servicio para las cuales eran requeridos en su momento, considerando la implementación de nuevos elementos de transporte, como los son los animales de carga y carruajes, por lo cual aumentaron en gran medida las cargas que debían soportar las vías, a raíz de ello se vio la necesidad de cambiar los materiales que constituían los mismos.

Hacia 1870, como consecuencia del desarrollo de la industria del petróleo, se comenzaron a emplear betunes de destilación para la fabricación de mezclas, pero no fue hasta finales del siglo XIX, cuando el norteamericano C. Richardson, (KRAEMER et al, 2004) sentó las bases de la tecnología de la pavimentación con mezclas bituminosas, aunque la industria de la fabricación no se desarrolló hasta después de la primera guerra mundial. De la misma forma, durante la II guerra mundial, las técnicas y los equipos para la fabricación de mezclas bituminosas se desarrollaron enormemente, debido principalmente a las necesidades de construcción acelerada de aeródromos militares¹

Siendo allí donde nace el sistema de implementar bitumen como aglomerante de mezcla, permitiendo unificar las piedras y dar una contextura lisa y duradera que influenció para que este se mantuviese como elemento clave en la conformación de

¹ TINO RAMOS, R., 2007. Vías, carreteras y otras calzadas: Breve historia de las mismas. *Cimbra: Revista del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas*.No. 376, pp. 16–25. ISSN 0210-0479.

carreteras con grandes capacidades de carga y mejores condiciones de soporte y funcionalidad, garantizando con su implementación.

“El transporte por carretera a partir de 1920 comenzó un rápido proceso de transformación a nivel mundial, aumentando enormemente el tráfico, especialmente el tráfico pesado, lo que motivó el desarrollo de un procedimiento de diseño de firmes y de nuevas tecnologías, tanto en Europa como en América, para adaptar las carreteras a las nuevas y crecientes necesidades. El más conocido de todos los métodos de dimensionamiento de firmes y prácticas de construcción, es el “AASHO Road Test” llevado a cabo en Ottawa (Illinois, USA) desde 1958 a 1960. Como resultado de dicho ensayo se publicó en 1961 la guía provisional de dimensionamiento AASHO, (AASHO Interim Design Guide). En ella se recogían los resultados de dicho ensayo y se introducían conceptos como nivel de servicio, ejes equivalentes, etc, que luego se han empleado en todo el mundo para el dimensionamiento de firmes. Asimismo la Guía incluía un método empírico de cálculo de espesores de capas en función de la intensidad del tráfico pesado”².

Todo esto contribuyó al crecimiento socio-económico de las ciudades, a tal punto que ha llegado a posicionarse en uno de los factores que mayormente intervienen en el crecimiento económico de los países, trayendo consigo mejoras en las condiciones de vida de las comunidades ubicadas en las zonas aledañas a su ejecución. Al generarse dicho incremento, se evidenció el aumento del parque automotor y consigo la tipología de vehículos destinados a transporte terrestre tanto particular como público, ocasionando que se presente una mayor incidencia vehicular en las vías principales de comunicación terrestre intermunicipal y regional, adicionalmente se denota el incremento a nivel mundial la adquisición de vehículos como lo dice Autocosmos en su artículo denominado: ¿Cuántos autos hay en el mundo? Al mencionar...

Un estudio realizado por la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores (Andemos), mostró que durante el año pasado fueron 94 millones los vehículos que ingresaron al parque automotor mundial,

² Ibíd., p. 24.

completando así un total de 1.350 millones de autos dando vueltas por las calles de la tierra. Según cálculos de esa asociación, se espera que para fin de 2017 se llegue a las 1.450 millones de unidades. El estudio también muestra que el índice de motorización en Latinoamérica se ubicó en el 2016 en 9,6 vehículos nuevos por cada 1.000 habitantes.³

De acuerdo con lo indicado por el portal de noticias del Caribe “Zona Cero”, presenta el informe entregado por el RUNT en donde se afirma en el artículo denominado: “Según el RUNT, Colombia inició el 2018 con 13.6 millones de automotores” que “Las cifras del Registro Único Nacional de Tránsito -RUNT-, arrojan que las matrículas iniciales han presentado un decrecimiento del 13% en 2017 comparado con el 2016. De las 739.631 matrículas iniciales que se realizaron en 2017, el 67% fueron motocicletas, el 18% automóviles y el 15% restante otras clases de vehículos”⁴ De igual manera, de acuerdo con el informe presentados por la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores “ANDEMOS: Marzo 2018 Informe Sector Automotor Colombia” da a conocer la siguiente afirmación: “El mercado acumula 54.369 unidades durante el primer trimestre del 2018, 3,3% menos que el mismo periodo del 2017. Comparando marzo 2018 frente a marzo 2017, se destaca un buen desempeño de los segmentos: Pick Ups con 26,4% de crecimiento, Camiones pesados o Comercial Carga mayor a 10.5t con una variación de 6,0% y Vans con un incremento del 3,4%”⁵ lo cual indica, que a pesar de disminuir gradualmente el porcentaje de adquisición de vehículo, las cifras presentadas son elevadas, indicando que consecuentemente a lo evidenciado en

³ SIZA, Héctor. ¿Cuántos autos hay en el mundo? [en línea]. Autocosmos. Chile (14 de Octubre de 2017), párr. 1-2. [Consultado: 24 de Marzo de 2018]. Disponible en Internet <https://noticias.autocosmos.cl/2017/10/04/cuantos-autos-hay-en-el-mundo>.

⁴ Según el RUNT, Colombia inició el 2018 con 13.6 millones de automotores [en línea]. Zona Cero. Atlántico (09 de Enero de 2018), párr. 1. [Consultado: 24 de Marzo de 2018]. Disponible en Internet <http://zonacero.com/?q=generales/segun-el-runt-colombia-inicio-el-2018-con-136-millones-de-automotores-98405>.

⁵ ANDEMOS: Marzo 2018 Informe Sector Automotor Colombia [en línea]. Asociación Colombiana de Vehículos Automotores. Bogotá D.C. (02 de Abril de 2018). Disponible en Internet <http://www.andemos.org/index.php/2018/04/02/andemos-marzo-2018-informe-sector-automotor-colombia/>

los análisis al parque automotor de Colombia, anualmente presenta una alta participación en el incremento de los niveles de tránsito, siendo participantes activos de la incorporación de diversas tipologías de vehículos a las vías ya existentes, permitiendo observar que al ser un gran porcentaje de los mismos vehículos de carga conlleva al aumento proporcional de las condiciones de esfuerzo que deben soportar las vías del país que en su momento de diseño no presentaban la incorporación de altos niveles de tránsito de los mismos, teniendo en cuenta que dentro de estos vehículos se encuentra la presencia de los mismos con número de ejes y con capacidad de transporte de mayores cargas, generando la aparición de patologías como los son la piel de cocodrilo, agrietamiento en los bordes y/o longitudinales, pulimiento de agregados y el hundimiento en el pavimento.

De manera paralela se evalúa en el ámbito municipal la incidencia del crecimiento poblacional presente en la ciudad de Tunja-Boyacá, evaluando las múltiples necesidades que trae consigo a la población de la zona, dentro de las que se encuentran aspectos socio-económicos, culturales y ambientales. Como punto de convergencia entre las temáticas del crecimiento en el parque automotor en Colombia y el crecimiento poblacional en la ciudad de Tunja, se encuentra un aspecto clave a considerar a la hora de realizar un diseño de mezcla asfáltica para la pavimentación de las vías como lo es “La movilidad”, la cual se ha visto afectada por los factores ya expuestos con anterioridad, generando una problemática en aumento al evidenciarse el deterioro de las vías al igual que una cantidad considerable de calles que no cuentan con pavimentación, siendo importante el enfoque en el aumento de la construcción, mantenimiento y reconstrucción de vías, se destaca la incorporación de pavimentos flexibles en la conformación de los corredores viales, por lo cual, es indispensable generar alternativas que permitan cumplir con los requisitos de calidad y brindar bienestar a los ciudadanos, sin descuidar la seguridad de las mismas. A raíz de lo anterior, se presenta una alternativa que incursiona los residuos generados por las siderúrgicas, como lo es

SIDENAL S.A. y la producción de ENHAE, para lo cual se plantea la implementación de este material como sustituto del agregado contenido por la mezcla asfáltica.

1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

A raíz de la problemática expuesta anteriormente, surge el siguiente interrogante de investigación: ¿Las escorias negras de horno de arco eléctrico (ENHAE) contribuyen a optimizar las condiciones mecánicas de la mezcla asfáltica (capa de rodadura)? Y de ser acertada la respuesta, ¿Cuáles son los factores que benefician su capacidad de respuesta dentro de una mezcla asfáltica?

1.3 JUSTIFICACIÓN

La implementación de las escorias negras de horno de arco eléctrico (ENHAE) como sustituto del agregado grueso contenido por la mezcla asfáltica permite disminuir la necesidad existente de incurrir en el consumo de agregados pétreos, los cuales recaen en una problemática ambiental considerando los procesos de extracción, de igual manera se considera que es un recurso natural no renovable, siendo motivo para impulsar la investigación de nuevos materiales con capacidad de cumplir las funciones de la grava, conllevando a establecer la importancia de utilizar sustitutos que permitan cumplir con las mismas e incluso mayores solicitudes a las que son sometidos los materiales convencionales.

CEDEX, explica como la escoria negra cuenta con una alta composición manganeso y silicio⁶ estructura compacta a tal punto de presentar mayor densidad relativa en comparación con las materias primas convencionales, siendo este indicativo de

⁶ Ministerio de Fomento., Ministerio de medio ambiente rural y marino., Centro de estudio y experimentación de obras públicas., y CEDEX, 2011. Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. *Cedex*, vol. 2.3, p. 1.

gran importancia en cuanto a considerar dosificaciones y el costo de carga al momento de transportarse, adicionalmente este aspecto propio de las ENHAE potencializa las propiedades para así optimizar su uso como componente de la mezcla bituminosa, permitiendo que presente una buena capacidad de comportamiento frente a su funcionamiento como material integrado dentro de la mezcla. De igual manera, generaría mayor dinamismo en el ámbito de la innovación e incorporación de sistemas de reutilización y aprovechamiento de residuos provenientes de actividades siderúrgicas.

Para ello, se establece el diseño de mezcla basado en el reemplazo del 100% de la totalidad del agregado grueso por la ENHAE para así determinar un comparativo que permita evaluar el comportamiento del material en relación con la grava convencional, y así obtener como resultado el nivel de calidad de cada una para ser implementado bajo las condiciones de tráfico concernientes a la ciudad de Tunja-Boyacá.

Este planteamiento de investigación nace a raíz de la importancia que tiene en el campo de la ingeniería civil enfocada a los pavimentos flexibles, la innovación en relación a materiales y/o procesos que permitan hacer más eficiente la composición estructural de los sistemas viales. A partir de este fundamento, se enfatiza la propuesta de implementar el subproducto de los procesos siderúrgicos (ENHAE) para sustituir de manera total los agregados pétreos que conforman la mezcla asfáltica.

Al proyectar la investigación con base en estos principios de desarrollo, se evalúa los problemas socio-económicos que se presentan al llevarse a cabo la construcción de esta tipología de vías, y se acondiciona la metodología y los objetivos con el fin de dar solución y brindar garantías de calidad y perdurabilidad, por medio de la realización de pruebas que condicionen el funcionamiento real al que se va a ver

sometido el material contenido en la mezcla asfáltica al conformar la capa de rodadura en un pavimento flexible.

A partir de la investigación realizada con anterioridad acerca de los antecedentes investigativos que abarcan la temática en análisis, se evidencia la presencia de alcances que demuestran la viabilidad de implementarse las escorias negras presentadas en el contenido del proyecto dentro de una construcción vial real, considerando la documentación internacional que demuestra la factibilidad del material como componente de la mezcla asfáltica, con un mínimo valor de impacto ambiental ya que “el uso de escoria en contacto con el suelo debe superar un cambio en la composición del suelo inferior al 1% en un período de tiempo de 100 años, considerándose en este caso que la utilización de escoria supone un riesgo aceptable para el medio ambiente”⁷, tal como se plantea en la investigación presentada en “El libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: Escorias de acería” en el cual estudian la viabilidad técnica y ambiental del reciclaje de las mismas dentro del campo de la construcción de edificios y vías. Permitiendo denotar que al realizar dosificaciones que cumplan con la metodología Marshall, se puede crear un diseño de mezcla asfáltica que cumpla con las condiciones de calidad requeridas en el campo.

Del mismo modo, se denota que dentro de las limitantes condicionadas por la investigación se pueden llegar a presentar la estandarización de los factores de depósito y transporte de los residuos, considerando que el cambio en los métodos de realización puede llegar a generar alteraciones en el tamaño y forma del mismo, conllevando a generar leves variaciones en los resultados. Esta limitación se puede subsanar por medio de los análisis petrográficos básicos (macroscopía óptica), los

⁷ IHOBE. AND EUSKADI. LURRALDE ANTOLAMENDU, E. eta I.S., 1999. ESCORIAS DE ACERÍAS. *LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES*, p. 59.

cuales se condicionarán para el entorno establecido de acuerdo al manejo que se le da desde la fabricación por la Siderúrgica SIDENAL. De igual manera, se establece que el componente de valoración del impacto ambiental se va a limitar a la contribución de la reducción en los niveles de contaminación y deterioro ambiental, creando una alternativa que incorpore residuos provenientes de subproductos siderúrgicos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general. Determinar la estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas tipo MDC-19 fabricadas con ENHAE como sustituto del agregado grueso para un nivel de tránsito NT3.

1.4.1 Objetivos específicos.

1.4.2.1. Determinar el porcentaje óptimo de asfalto que se genera con el reemplazo del agregado grueso por ENHAE a partir del análisis de estabilidad y flujo determinadas para la mezcla asfáltica tipo MDC-19 fabricada para tránsito tipo NT3.

1.4.2.2. Identificar la incidencia de las propiedades petrográficas de las escorias negras observadas por macroscopía en su comportamiento respecto al asfalto.

2. MARCO REFERENCIAL

Los registros investigativos seleccionados como base para conformar los pilares de estudio acerca de las escorias negras como componente del pavimento, haciendo énfasis en la mezcla asfáltica, presentan un gran hincapié en los estudios de caracterización del material y las propuestas de dosificación de los mismos, a tal punto que cumplen con los requerimientos de implementación de pruebas condicionadas a respaldar los juicios de diseño, permitiendo dar forma y orientar esta investigación en pruebas con mayores niveles de exactitud en sus resultados.

2.1 ESTADO DEL ARTE INTERNACIONAL

A nivel internacional los estudios se encuentran enfocados a determinar metodologías de estudio que certifiquen de manera analítica y experimental el comportamiento de las escorias de acerías por medio de ensayos de laboratorio que condicionan el entorno de prueba de manera similar a las condiciones reales en campo, permitiendo un estudio y análisis certero de las propiedades de la mezcla asfáltica con contenido de escorias, como se evidencia con estos registros investigativos:

Se denotan avances investigativos relacionados con la implementación de escorias en mezclas asfálticas, como el que se evidencia en el artículo “Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag” realizado en el año 2017 y publicado en el 2018 por el diario Cleaner Production, en donde indican la importancia de introducir nuevos mecanismos que contribuyan a disminuir la huella de carbono existente por la producción de sustancias como el asfalto, incluyendo aspectos de análisis como lo son la capacidad de respuesta, siendo motivo para que se plantearan como metodología de estudio afirmando que...

Se llevaron a cabo el ensayo de huella de rueda de Hamburgo y el módulo elástico sobre muestras en la escoria WMA de BOF en comparación con escoria BOA HMA y otro tipo de mezcla WMA preparada con agregados naturales. Los resultados mostraron que la escoria WF de BOF proporcionó una resistencia significativa al daño por humedad a corto plazo y, por lo tanto, podría considerarse como una mezcla bituminosa duradera en comparación con las mezclas de asfalto convencionales. Además, la escoria de acero BOF HMA / WMA exhibió comportamientos mecánicos superiores en comparación con las mezclas de caliza HMA / WMA, lo que implica que la escoria de acero podría ser una alternativa efectiva como material de pavimento.⁸

Comprobado con la realización de ensayos concernientes a la evaluación del módulo resiliente de prueba, análisis de la susceptibilidad a la humedad, y el hundimiento por carga de rueda.

En el año 2017 se presenta una posterior publicación en el diario Cleaner Production del artículo denominado “Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing”, investigación que dio inicio con la evaluación comparativa de densidades resultantes de la escoria y la grava convencional, para analizar parámetros primordiales que conllevan a entender su comportamiento como componente de la mezcla asfáltica al ser sometidos a pruebas de conductividad térmica, temperatura de la superficie, y finalmente la prueba de tiempo de descongelación calentamiento por microondas; a raíz de los resultados presentados tras la ejecución de estas series de pruebas en laboratorio, se llega a la conclusión de que...

Finalmente, la temperatura de la superficie, la conductividad térmica y la uniformidad de calentamiento de la mezcla de asfalto que contiene diferentes contenidos escoria de acero se ensayaron. Los resultados muestran que los tamaños de partícula de 9,5 mm, 2,36 mm y 0,6 mm son considerados como los tamaños más eficaces. La conductividad y el calentamiento con microondas para uniformidad térmica de mezclas asfálticas básicamente disminuyen con el

⁸ AMELIAN, S., MANIAN, M., ABTAHI, S.M. y GOLI, A., 2018. Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag. *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, p. 1. ISSN 09596526.

aumento de contenido de escoria de acero; mientras que la temperatura de la superficie presenta una tendencia contraria. En consecuencia, el contenido en volumen de escoria de acero sugerido es 40% y 60%.⁹

En el año 2017 se presenta la “Evaluación de rigidez Marshall, tracción indirecta y módulo resiliente en mezclas asfálticas con RAP y escoria de cobre”(Raposeiras et al. 2017), de manera reciente encontramos una metodología innovadora basada en los pavimentos asfálticos reciclados (RAP) la cual considera variables como la durabilidad y su relación con la pérdida de las propiedades del material con el paso del tiempo, pero aun así demuestra la presencia de condiciones mecánicas adecuada para llegar a implementarse en proporciones que alcanzan el 40% de su combinación en la elaboración de probetas por el método Marshall, todo esto presenta un precedente importante al denotar que las capacidades de estabilidad y flujo mejoran notoriamente, contribuyendo a establecer la factibilidad del diseño.

La Revista de la Construcción publica para el años 2017 un artículo denominado “Analysis of the use of cupola furnace slags, green sand and reclaimed asphalt pavement in asphalt concrete mixtures for low intensity traffic” demuestra una investigación realizada en pro de analizar el rendimiento de la mezclas asfáltica al contener diversas dosificaciones de materias alternativas como lo son las escorias de horno de cubilote, arena verde (Arena compuesta por sílice, bentonita, aditivos y agua) y el pavimento asfáltico recuperado (RAP) por medio del diseño de mezcla con la metodología Marshall, en la cual se verifica la estabilidad y flujo de la misma al estudiar el contenido de vacíos existente, esto realizado incluyendo porcentajes del material convencional como lo es la caliza, dando como resultado que “la piedra caliza obstaculizó significativamente el rendimiento de estas mezclas, los resultados de laboratorio muestran que pueden emplearse con éxito en la construcción de

⁹ GAO, J., SHA, A., WANG, Z., TONG, Z. y LIU, Z., 2017. Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. *Journal of Cleaner Production*, vol. 152, p. 429. ISSN 09596526.

caminos de baja intensidad de tráfico como aglomerante”¹⁰. Lo anterior conlleva a afirmar que el comportamiento de la mezcla está condicionado por las condiciones de reemplazo del material, en donde se indica que este no puede superar un 10% del contenido total, considerando que de ser así resulta difícil manejar la granulometría apropiada para efectuar su incorporación.

Para el año 2013 se estructura una ficha técnica sobre las “Escorias de acería de horno; eléctrico, arco. Escorias de acería de horno de arco eléctrico” (Fomento, Rural y CEDEX 2011) cuenta con el objetivo primordial de dar a conocer la manera en que interviene el proceso de fusión del horno detallado, generando un residuo líquido que presentaba marcas de escoria negra, las cuales se aglomeraban en las puertas del horno. La investigación avanzó a tal punto de evaluar propiedades químicas y físicas del material, y creando bases sólidas para plantear una continuación investigativa de manera detallada.

En el año 2004 se da a conocer el resultado de una investigación enfocada a la construcción de pistas forestales con única capa de rodadura en donde se realizó la “Valorización de escorias de acería en la construcción de pistas forestales” en donde explican la evaluación del comportamiento que presentaba los diferentes tipos de escorias en proporciones de 3:1 o 4:1, fueron varias las pruebas realizadas hasta llegar al punto en que se identificó el comportamiento óptimo en las proporciones demarcadas incluyendo contenido de los dos tipos de escorias, una a

¹⁰ VEGA-ZAMANILLO, A., CALZADA-PÉREZ, M.A., LASTRA-GONZÁLEZ, P., INDACOECHEA-VEGA, I. y FERNÁNDEZ ORTEGA, J.A., 2017. Analysis of the use of cupola furnace slags, green sand and reclaimed asphalt pavement in asphalt concrete mixtures for low intensity traffic. *Revista de la construcción* [en línea], vol. 16, no. 2, p 229. ISSN 0718915X.

manera de agregado grueso y el otro como agregado fino, dando no solo un buen aspecto a la zona de implementación, sino mejorando el uso de recursos¹¹.

Alrededor del año 2002 se dio a conocer el “Estudio de la inestabilidad en escorias negras de horno de arco eléctrico” enfocado a contextualizar acerca la producción que se tiene de esta y haciendo hincapié en el mal manejo de estos elementos, a tal punto que llegar a terminar en depósitos o vertederos no autorizados. A partir de esto se empieza a estudiar la posibilidad de inestabilidad volumétrica debido a determinados compuestos no deseados que cuentan con propiedades expansivas. Tras realizar los estudios pertinentes, se evidencia que la presencia de estos compuestos está en rangos insignificantes o nulos, siendo indicativo de que no genera afectaciones.¹²

2.2 ESTADO DEL ARTE NACIONAL

En relación con la información recopilada a nivel nacional, se enfatiza en el análisis de las condiciones de funcionalidad de las escorias negras como agregado grueso en la parte de diseños de concreto, tal como se evidencia a continuación:

En el año 2018 en la seccional Bogotá de la Universidad Santo Tomás, se publica la tesis de maestría denominada “Evaluación de la resistencia mecánica bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica de una mezcla asfáltica tibia fabricada con sustituciones parciales de agregado pétreo por escoria de alto horno” en donde exponen el estudio experimental sobre el comportamiento de la mezcla asfáltica con contenido de escoria para sustituir el agregado tanto grueso como fino para

¹¹ ANSORENA, J., IZCO, F., MERINO, D. y TAMÉS, P., 2001. Valorización de escorias de acería en la construcción de pistas forestales (I). *sustrai*. 70, p 54.

¹² ROJAS, M.F., ROJAS, M.I.S.D.E. y URÍA, A., 2002. Estudio de la inestabilidad en escorias negras de horno de arco eléctrico. *Materiales de construcción*, vol. 52, no. 267, p 79. ISSN 04652746.

incorporarse dentro de una mezcla con cemento asfáltico 60-70 y bajo una fórmula de trabajo correspondiente a mezcla asfáltica densa en caliente MDC-25, las cuales fueron expuestas a pruebas “bajo carga monotónica (ensayos Marshall y tracción indirecta) y dinámica (módulo resiliente y deformación permanente) de una mezcla asfáltica tibia reciclada fabricada a partir de la incorporación de un aditivo denominado HUSIL al asfalto”¹³ dando como resultado final un aumento en su rigidez y en su capacidad de resistir el daño ante

Para el año 2014 se conoce el artículo publicado en la revista colombiana de materiales que trata acerca de las “Propiedades del concreto con sustitución de escoria de horno de cubilote como agregado fino y escoria granulada” generando variaciones en las dosificaciones de agregado grueso, las cuales abarcaban los rangos de 0%, 50%, 75% y 100%, y caracterizando la propiedades del material, para determinar la resistencia adquirida, la cual cumplió con las expectativas en cuanto a resistencia y disminución del peso al generarse el reemplazo.¹⁴

Al llegar el año 2012 se publica la tesis doctoral enfocada en la “Selección de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la escoria en el sector siderúrgico” el cual tuvo como objetivo buscar y plantear nuevas tecnologías que brinden el espacio para crear estrategias de aprovechamiento de la escoria. Este se enfocó en la revisión bibliográfica, en la recolección de experiencias generadas

¹³ RUIZ, J., 2018. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA BAJO CARGA MONOTÓNICA Y LA RIGIDEZ BAJO CARGA CÍCLICA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA FABRICADA CON SUSTITUCIONES PARCIALES DE AGREGADO PÉTREO POR ESCORIA DE ALTO HORNO. S.I.: Universidad Santo Tomás.

¹⁴ QUITIAN, G. y ROJAS, N., 2013. Propiedades del concreto con sustitución de escoria de horno de cubilote como agregado fino y escoria granulada. *Revista Colombiana de materiales*, vol. 5, no. Cm, p 19. ISSN 18792456.

sobre la utilización del residuo, evaluando las tecnologías existentes para identificar alternativas de aplicación y analizables por medio del multicriterio.¹⁵

En el año 2010 se realizó el proyecto investigativo enfocado al “Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá” en el cual establecieron la viabilidad técnica del material por medio de la realización de ensayos de laboratorio en diseños de mezclas de concreto por variaciones en los porcentajes, correspondientes al 0%, 25%, 50%, 75% y 100% basados en la Norma Técnica Colombiana NTC 673. De igual manera, analizaron el sector comercial y financiero para cerciorarse de las condiciones requeridas para su comercialización; estableciendo que cumplía con los requisitos legales y de imagen para tener unos mejores índices de acogido, al verse reflejado la calidad de los procesos que implementaban.¹⁶

¹⁵ SERNA, A., 2012. Selección De Tecnologías Apropriadas Para El Aprovechamiento De La Escoria. , pp. 1–54.

¹⁶ PARRA, L.M. y SÁNCHEZ, D.P., 2010. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica DIACO. Municipio tuta Boyacá. *Universidad de la Salle*, p 9.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

A partir de los requerimientos que trae consigo la ejecución de la investigación, para que el alcance de objetivos y resultados expuestos garanticen la certeza de los mismos, fue indispensable una estructuración de la metodología investigativa con base en los objetivos planteados y la naturaleza de los datos presentados en el transcurso de su realización, teniendo en cuenta que el desarrollo del proyecto incursionó dentro de caminos en los que se aplicaron y estudiaron de manera detallada cada una de estas en relación con las variables medidas por medio de los ensayos de laboratorio.

La manera en que se relacionó ha sido la siguiente: En primer medida una estimación experimental enfocada en la realización de ensayos de laboratorio que constatan los parámetros y aspectos que intervienen en la funcionalidad de la ENHAE y la mezcla asfáltica, a fin de crear un diseño experimental de mezcla asfáltica que permita llevar un control de su comportamiento y al mismo tiempo analizarlos por medio de la creación de muestras significativas de análisis para cada tipo de ensayo, a raíz de ello, se procede a realizar una evaluación descriptiva que permite detallar el comportamiento de las variables estudiadas, recurriendo a la información suministrada por la metodología cualitativa, a fin de consolidar un informe del comportamiento de estas y su afectación dentro de la investigación, de acuerdo a esto se procedió a realizar la observación cualitativa con principios fundamentados en el análisis de manera separada de las variables, para posteriormente integrar las estimaciones realizadas y por consiguiente, consolidar un resultado final, contribuyendo a interpretar la totalidad de la investigación para poder realizar la correlación de datos, con base a la metodología enfocada en establecer la relación existente entre las variables del proyecto, a fin de brindar información que permita analizar el comportamiento de las mismas y crear así estrategias de optimización.

3.1 METODOLOGÍA MUESTRAL

Las solicitaciones de uso en la capa de rodadura como componente de un pavimento tri-capa tiene altos criterios de calidad en cuanto a su componente de agregado grueso. A partir de esto se fija como variable independiente el contenido de ENHAE, al estimar que este factor modificará los resultados obtenidos en el análisis del comportamiento de la mezcla siendo siempre variable el resultados al estudiar la dosificación; al igual que la arena y asfalto, siendo dispuestas para pruebas requeridas que permiten garantizar la calidad del diseño de mezcla asfáltica, teniendo como fundamento que los tres son componentes de la misma.

De acuerdo a lo anterior, se establece de manera clara como variables independientes las propiedades físicas (Tamaño, forma, color, textura, estructura, porosidad) y mecánicas (dureza, limpieza gradación combinada, geometría de las partículas) considerando que incorpora el material para analizarlo sin sufrir variaciones en el resultado obtenido al estudiar diversas partículas dentro de la misma muestra; por otra parte, las propiedades mecánicas presentadas por la estabilidad y flujo se establecen como variable dependiente al considerar que de acuerdo con las tipología de tamaños y contenido que presentará el material como el componente de mezcla asfáltica generará modificaciones en los resultados, evidenciadas en las características como lo son:

Tabla 1. Variables de investigación

VARIABLES	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Contenido de escoria negra de horno de arco eléctrico	Independiente	Dosificación por fracción de tamaño del contenido de escoria negra dentro del diseño de la mezcla asfáltica.
Arena y asfalto	Independiente	Agregado fino de la mezcla asfáltica

Petrografía (macroscopía)	básica	Independiente	<ul style="list-style-type: none"> - Forma, angularidad y tamaño - Color - Textura - Estructura visual (homogénea, bandeada, nodulosa o brechoide) - Porosidad - Resistencia
Dureza		Independiente	Propiedades mecánicas: <ul style="list-style-type: none"> - Resistencia. - Porcentaje de finos.
Limpieza, combinada	gradación	Independiente	Propiedades físicas: <ul style="list-style-type: none"> - Equivalente de arena
Geometría de las partículas de la escoria		Independiente	Propiedades físicas: <ul style="list-style-type: none"> - Partículas fracturadas. - Aplanamiento y alargamiento.
Geometría de las partículas, agregado fino		Independiente	Propiedades físicas: <ul style="list-style-type: none"> - Angularidad agregado fino
Mezcla asfáltica		Dependiente	Propiedades mecánicas: <ul style="list-style-type: none"> - Estabilidad. - Flujo.

Fuente: Autor

A continuación se presenta la correlación entre los “objetivos planteados” y los “ensayos y/o pruebas involucradas” en la ejecución del proyecto, a fin de establecer la manera en que contribuyen a dar resolución a los objetivos establecidos al principio de la investigación, resaltando su importancia dentro de la misma y permitiendo consigo una retroalimentación enfocada en consolidar los conocimientos adquiridos y reforzarlos por medio de la experiencia que trae la realización constante de ensayos de laboratorio y la inclusión de nuevas alternativas de materiales como lo es la ENHAE.

Tabla 2. Resultados directos esperados en relación con los objetivos planteados

OBJETIVOS PLANTEADOS	ENSAYOS Y/O PRUEBAS INVOLUCRADAS	RESULTADOS DIRECTOS (RELACIÓN OBJETIVOS - ENSAYOS Y/O PRUEBAS INVOLUCRADAS)	CARACTERISTICAS DEL NUEVO CONOCIMIENTO
<p>Establecer el comportamiento de estabilidad y flujo de las escorias negras de horno de arco eléctrico como sustituto del agregado grueso dentro de la mezcla asfáltica MDC-19 con nivel de tránsito NT3.</p> <p>Evaluar la capacidad que tiene el reemplazo del agregado grueso por escoria negra en su funcionamiento</p>	<p>Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall (Estabilidad y flujo)</p>	<p>La realización del diseño de la mezcla asfáltica por medio del método Marshall, permite identificar el comportamiento de las mezclas con diferentes contenidos de asfalto para establecer de ellas cuentan con las condiciones de estabilidad y flujo, de acuerdo con la relación de vacíos y contenido de asfalto presente en la misma, siendo evidencia por medio de pruebas de laboratorio para escoger el diseño final.</p>	<p>La inclusión de la escoria negra dentro del diseño de la mezcla asfáltica brinda altos niveles de experiencia en el campo de diseño innovador, al considerar la realización de múltiples ensayos de laboratorio y cálculos que permiten identificar los diseños de mezclas óptimos, llevando consigo a aumentar el entendimiento y correlación de los factores influyentes, permitiendo una mayor capacidad de análisis y razonamiento en el área.</p>

<p>Identificar las propiedades que condicionan la funcionalidad de las escorias negras en mezclas asfálticas.</p>	<p>Petrografía (macroscopía) Dureza Durabilidad Geometría de las partículas</p>	<p>La evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la escoria negra tomando como base su petrografía enfocada a estudiar y analizar sus características y demás aspectos que generan alteraciones en las mismas, partiendo del punto de realizar la misma tipología de estudios practicados a las muestras convencionales del agregado grueso para vías, permitiendo conocer la capacidad del mismo para cumplir los requerimientos de uso a los cuales será sometido.</p> <p>Los estudios propios del material granular (escoria negra) permite adquirir conocimientos enfocados a establecer las posibles alteraciones que sufre el material frente a las diversas sollicitaciones en mezclas asfálticas, y entender de manera analítica el condicionamiento que deben tener para cumplir con las sollicitaciones de uso.</p>
---	---	---

Fuente: Autor

Para la evaluación de las variables se consideran muestras significativas de briquetas que tendrán como finalidad de fabricación, la determinación del diseño de mezcla asfáltica a implementar, considerando los rangos establecidos por los fundamentos de diseño de acuerdo al método Marshall, en donde establece que el diseño debe considerar porcentajes de contenido de asfalto dentro de las briquetas a ensayar en rangos que oscilan entre el 4,5% y 7,0 con intervalos de 0,5% entre los mismos, a fin de obtener un mejor comportamiento y certeza de las condiciones de contenido asfáltico para establecer el diseño óptimo .

De igual manera, se establece que la Mezcla Densa en Caliente (MDC-19) brinda mayores rangos de estimación de espesores; todo esto, siguiendo los estándares que determinan parámetros como la granulometría que debe cumplir la muestra.

Adicionalmente, se incorporan en el diseño factores ambientales como la temperatura de la zona, por medio de la información suministrada por el IDEAM de las temperaturas medias ponderadas anuales presentadas por la ciudad de Tunja por medio del registro recolectado de la estación N° 24035130 - UPTC (Anexo 1) con un registro histórico correspondiente a los años presentes entre 1964 y 2017, presentando una TMPA de 13,13°C (Anexo 3); de esta manera, se establece un tipo de cemento asfáltico como material para elaborar la mezcla en caliente con una penetración de 80-100; teniendo en cuenta que la realización de ensayos de laboratorio relacionados con la mezcla asfáltica se realizaron en la empresa “IBS de COLOMBIA” quienes prestaron sus instalaciones para ingresar y realizar los ensayos allí, al igual que brindaron donativos de la totalidad del material constituyente de la mezcla asfáltica (exceptuando la ENHAE) se tuvo en cuenta lo presentado en la NOTA 1 de la tabla 450-8 “Tipo de asfalto para emplear en mezclas asfálticas en caliente con gradación continua”(Anexo 8) indica que para temperaturas medias anuales de la región menores del 15°C y un nivel de tránsito NT3, es permitido realizar la recomendación en el proyecto a ejecutar a cerca de implementar un cemento asfáltico de grado de penetración 60-70 si es de consideración un diseño para un nivel de tránsito elevado o agresivo¹⁷, adicionalmente teniendo presente que bajo el diseño de TMAP de la región para Tunja da un cemento asfáltico 80-100, que al momento de obtener directamente de planta, la disposición del mismo fue bastante tediosa debido que se los tiempos de entrega son demasiado extensos, y por consecuente se optó por usar cemento asfáltico 60-70, siendo apto para su implementación con base a las condiciones

¹⁷ INVIAS, 2013. Especificaciones generales de construcción de carreteras., pp. 440.

ambientales y climáticas del sector. Consecuentemente, se incorpora la información suministrada por el INVIAS sobre los valores correspondientes al volumen de tránsito con mayor incidencia en movilidad presentado por la estación N°71 “Sector Tunja-Ventaquemada” presentados entre los años 2007 y 2017 (Anexo 4), estimando los porcentajes contenidos en la distribución de incidencia en la tipología de camiones, dando como resultado un requerimiento de $3,8 \cdot 10^7$ ejes equivalentes de 8,2 ton en el carril de diseño durante 15 años, correspondiente a una clasificación de Nivel de Tránsito 2 (NT2) de acuerdo a los rangos establecidos por el INVIAS (Anexo 5), teniendo en cuenta que los porcentajes de tipología de camiones no son certeros, se optó por manejar un nivel de tránsito 3 (NT3), a fin de brindar consigo una mayor cobertura de los alcances y beneficios que trae la implementación del diseño.

3.2 METODOLOGÍA CON BASE AL CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

3.2.1 Planteamiento del problema de investigación, objetivos y justificación

El planteamiento del tema de investigación nace a raíz de la importancia que tiene en el campo de la ingeniería civil enfocada a los pavimentos flexibles, la innovación en relación a materiales y/o procesos que permitan hacer más eficiente los sistemas viales. A partir de este fundamento, se enfocó la propuesta de implementar el sub-producto de los procesos siderúrgicos (ENHAE) para sustituir de manera total los agregados pétreos (grava) que conforman la mezcla asfáltica.

Al proyectar la investigación con base en estos principios de desarrollo, se tiene presente mejorar las condiciones de esta tipología de vías, teniendo en cuenta el deterioro de la malla vial y el incremento en costos que representa las acciones de reparación y mejoramiento, a raíz de esto se dispone la metodología y los objetivos con el fin de dar solución y brindar garantías de calidad y perdurabilidad, por medio de la realización de pruebas que condicionen el funcionamiento real al que se va a

ver sometido el material, para verificar la capacidad de las ENHAE como agregado grueso en la mezcla asfáltica.

3.2.2 Recolección y codificación de información

Se evidencia la importancia de establecer mecanismo de recolección de información, para lo cual se hace enfoque en libros, bases de datos (Scielo, Science), tesis de grado (Especialización y maestría) y fichas técnicas realizadas por empresas (CEDEX), considerando la certeza y fiabilidad de la información presentada en los textos implementados en el estudio, al establecerse el nivel profesional que se requiere en ámbitos académicos e investigativos ante la publicación de estos resultados de las diversas técnicas evaluadas en cada uno de ellos.

La información establecida como base investigativa histórica relacionada con la implementación de escorias negras como sustituto de agregado grueso en las mezclas asfálticas, se seleccionó de tal modo que incluyera en su contenido parámetros como el manejo de la escoria negra, las mezclas bituminosas reutilizadas (RAP), escorias en morteros, impactos ambientales del material e implementaciones realizadas en vías de otros países; A partir de allí se establece la importancia de realizar una serie de ensayos de laboratorio para evaluar las propiedades físico-mecánicas por medio de la revisión de estabilidad y flujo que presenta el mismo, evaluando el nivel de respuesta en cuanto a su implementación bajo condiciones reales.

Para obtener un manejo óptimo, un fácil entendimiento y ubicación de la información recolectada, se establecen dos secciones como líneas de estudio del estado de arte encontrado a nivel nacional e internacional, como lo son: Documentación internacional y documentación nacional, las cuales se presentan de manera ordenada partiendo del principio de dar a conocer las investigaciones globales, para

posteriormente hacer énfasis en las locales (nacionales), llevando una secuencia cronológica.

3.2.3 Delimitación de alcances y limitantes

A partir de la investigación realizada con anterioridad acerca de los antecedentes investigativos que abarcan la temática estudia, se evidencia la presencia de alcances que evidencian la probabilidad de implementarse el contenido del proyecto dentro de una construcción vial real, considerando la documentación internacional que demuestra la factibilidad del material como componente de la mezcla asfáltica, con un mínimo valor de impacto ambiental que es del uno por ciento (1%) por cada 100 años de uso de la carretera¹⁸, tal como se plantea en la investigación presentada en *“El libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: Escorias de acería”* en el cual estudian la viabilidad técnica y ambiental del reciclaje de las mismas dentro del campo de la construcción de edificios y vías. Permitiendo denotar que al realizar la dosificación que cumplan con la metodología Marshall, se puede crear un diseño de mezcla asfáltica que cumpla con las condiciones de calidad requeridas en el campo.

Dentro de las limitantes condicionadas por la investigación se pueden llegar a presentar la estandarización de los factores de depósito y transporte de los residuos, considerando que el cambio en los métodos de realización puede llegar a genera alteraciones en el tamaño y forma del mismo, conllevando a generar leves variaciones en los resultados, las cuales no se encuentran incluidas como parámetro de investigación al no ser directamente un determinante de las condiciones del material dentro de la mezcla asfáltica. Esta limitación se puede subsanar por medio de los análisis petrográficos, los cuales se condicionarán para

¹⁸ IHOBE. Óp. cit., p. 59.

el entorno establecido de acuerdo al manejo que se le da desde la fabricación por la Siderúrgica SIDENAL. De igual manera, se establece que el componente de valoración del impacto ambiental se va a limitar a la contribución en la reducción de los niveles de contaminación y deterioro ambiental, creando una alternativa que incorpore residuos provenientes de sub-productos siderúrgicos. Del mismo modo se limita que análisis se realizará teniendo en cuenta únicamente las condiciones físicas y mecánicas presentadas en los análisis del mismo, excluyendo la composición química de la ENHAE. Adicionalmente se delimita que los resultados presentes por el diseño seleccionado, cumplen con el acondicionamiento correspondiente al nivel de tránsito y requerimientos climáticos y ambientales del sector, es decir, para implementarse en otra zona en la que estos presenten alguna variación se debe realizar el análisis de estos aspectos y aplicar las respectivas modificaciones al diseño.

3.2.4 Determinación de pruebas y ensayos de laboratorio

El planteamiento y determinación de la totalidad de ensayos de laboratorio a ejecutar, de acuerdo con lo establecido por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en su más reciente actualización de las “Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras” presentada en el 2013, contenido por la sección 100 (suelos), la sección 200 (agregados pétreos) y la sección 700 y 800 (materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos), del mismo modo que el capítulo 4 (pavimentos asfálticos) presente en las “Especificaciones generales de construcción de carreteras” del INVIAS, al igual que la elaboración de las pruebas correspondientes a la petrografía básica (macroscopía óptica) con lo establecido por el “Manual preliminar de petrografía aplicada al estudio de materiales pétreos para carreteras” presentado por el Ministerio de Minas y Energía en colaboración con el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), hoy Servicio Geológico Colombiano (S.G.C).

Estos ensayos de laboratorio se encuentran enfocados a obtener resultados precisos que permitan determinar las condiciones de comportamiento del material y de la mezcla asfáltica, por lo cual, se establecieron ocho (8) categorías que abarcan diversos ensayos. De manera previa se establece el ensayo de diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall, el cual determinará de manera empírica el contenido final de proporciones dentro de la muestra que constituirá el diseño final a estudiar; este diseño está condicionado para establecer el contenido óptimo de asfalto dentro de la mezcla, incursionando los estándares de dosificación de agregado ya planteados con anterioridad, dando un total de 24 briquetas de prueba.

Los ensayos especificados para la implementación de la ENHAE como materia de análisis son “Petrografía básica (macroscopía), granulometría, dureza, limpieza, geometría de las partículas de escoria, geometría de las partículas finas” y la última categoría se denomina “diseño de mezcla asfáltica” debido a que contiene los ensayos de determinación de las características y propiedades de la mezcla asfáltica diseñada (Tabla 5).

Tabla 3. Pruebas de laboratorio establecidas

CATEGORÍA	NOMBRE DEL ENSAYO	NORMA REFERENTE
Petrografía (Macroscopía)	<ul style="list-style-type: none"> - Forma, angularidad y tamaño - Color - Textura - Estructura visual (homogénea, bandeada, nodulosa o brechoide) - Porosidad - Resistencia 	Manual Preliminar de Petrografía Aplicada al Estudio de Materiales Pétreos para Carreteras
Granulometría	Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos	INV E-213-13

Dureza	Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños menores de 37,5mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles	INV E-218-13
	Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval	INV E-238-13
	Determinación del valor del 10% de finos	INV E-133-13
Limpieza, gradación combinada	Equivalente de arena de suelos y agregados finos	INV E-224-13
Geometría de las partículas, escoria	Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras	INV E-230-13
	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso	INV E-227-13
Geometría de las partículas, agregado fino	Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)	INV E-239-13
Diseño mezcla asfáltica	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall Propiedades volumétricas	I.N.V.E - 748

Fuente: Autor

3.2.5 Determinación de materiales

Como resultado se obtiene que para llevarse a cabo el diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall, se requiere de un total de cuatro (4) muestras representativas por la sustitución total de agregado grueso por ENHAE, adicionando los seis intervalos de medición del contenido de asfalto, dando como resultado un total de veinticuatro (24) briquetas de ensayo. Cada briketa tiene un total de 1200gr de material, del cual el 35% corresponde a escoria negra y el 65% a arena con variaciones en el contenido de asfalto. A partir de esto se obtuvieron las siguientes cantidades de material a implementar:

Tabla 4. Cantidad de material requerido para briquetas

% ASFALTO	ESCORIA NEGRA HEA (gr)		ARENA (gr)		ASFALTO (gr)	
	UNITARIO	TOTAL	UNITARIO	TOTAL	UNITARIO	TOTAL
4,5	420	1680	780	3120	54	216
5,0	420	1680	780	3120	60	240
5,5	420	1680	780	3120	66	264
6,0	420	1680	780	3120	72	288
6,5	420	1680	780	3120	78	312
7,0	420	1680	780	3120	84	336
TOTAL	10080		18720		1656	

Fuente: Autor

Con base en los resultados obtenidos por medio del ensayo de diseño Marshall, se determinó el porcentaje de asfalto adecuado para cumplir con las especificaciones un nivel de tránsito NT3. Como complemento se presenta el consolidado de cantidades requeridas de ENHAE, arena, asfalto que componen la fabricación de briquetas requeridos para la realización de pruebas de diseño y ensayos que permitirán evidenciar la capacidad propia de la mezcla asfáltica.

3.2.6 Etapas de desarrollo

3.2.6.1 Solicitud del material

Debido a las políticas internas de la Siderúrgica SIDENAL S.A, se presentó una solicitud firmada por el decano de la facultad de ingeniería civil y el director del proyecto (Anexo 6 y 7) para que certificar la veracidad de la necesidad de obtención del material para la realización de los ensayos que se establecieron en el mismo, dicha solicitud contiene el objeto de la investigación y la cantidad de material requerido, al igual que especifica que los resultados y análisis obtenidos se le harán llegar a la empresa al momento de tenerse el consolidado final. En la solicitud digital, se realizó bajo la petición de un total de doscientos dos kilogramos (202Kg) de escoria negra HEA.

3.2.6.2 Obtención de materias primas e insumos

La adquisición de los materiales restantes, como lo son la arena de trituración y el asfalto fueron donados por la empresa IBS de COLOMBIA, quienes de manera voluntaria quisieron brindar apoyo en la ejecución de los ensayos de laboratorio para así contribuir incentivando la investigación de alternativas para materiales pétreos; razón por la cual se encargaron de los procesos de recolección, transporte y disposición de los mismos, para que llegaran a sus instalaciones en óptimas condiciones. En la fuente de obtención de los materiales se estimaron empresas reconocidas y con altos estándares de calidad en sus labores como lo son:

Tabla 5. Fuente de obtención de materiales

MATERIAL	FUENTE
Escoria negra HEA	SIDENAL S.A
Arena	Río Cravo Sur

Asfalto	Empresa "Humberto Quintero"
---------	-----------------------------

Fuente: Autor

3.2.6.3 Análisis y estimación de factibilidad técnica de su implementación

La realización de las pruebas especificadas con anterioridad, se ejecutaron a lo largo de cuatro meses comprendidos entre Marzo y Julio, a fin de tener constancia e intensificación en los mismos, de tal manera que paralelamente se llevaba a cabo la sistematización de los mismo en formatos digitales en el transcurso de su desarrollo, para garantizar la calidad de los procesos y la certeza de la información registrada.

Esto ha permitido evaluar desde momentos tempranos el comportamiento de las variables estudiadas durante la práctica de ensayos y pruebas de laboratorio. A partir de allí, se obtiene el resultado definitivo del proyecto al determinar la factibilidad técnica de la implementación del diseño de mezcla asfáltica con contenido de ENHAE como sustituto del agregado grueso, con base en su capacidad de cumplir con las solicitudes reales.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

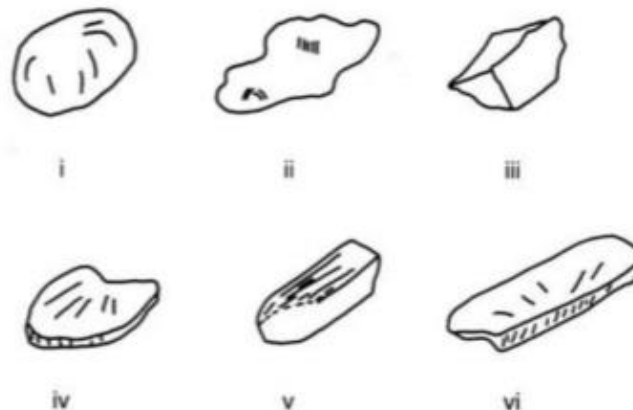
4.1 PETROGRAFÍA BÁSICA (MACROSCOPIA)

La evaluación petrográfica se realizó con base en los parámetros presentados por el “Manual preliminar de petrografía aplicada al estudio de materiales pétreos para carreteras”, siguiendo una secuencia de evaluación visual de un conjunto de 58 unidades de granos de ENHAE, para obtener un compendio unificado de respuesta de caracterización visual.

4.1.1 Forma, angularidad y tamaño

El análisis de forma de la ENHAE como agregado de la mezcla asfáltica para un pavimento flexible indica un patrón de concordancia a un aspecto irregular, de acuerdo al comparativo con la tipología de forma de agregados pétreos presentados por López, evidenciado al contener presencia de modificaciones en su contextura, acompañada por contenido de poros.

Figura 1. Forma de los agregados pétreos. i.Redondeada, ii. Irregular, iii. Angular, iv. Lajosa, v. Alargada, vi. Alargada-Lajosa



Fuente: Manual preliminar de petrografía aplicada al estudio de materiales pétreos para carreteras, López, 1994, en Padilla, 2014.

Al ser amorfa contribuye a no permitir alteración física o modificación en su granulometría al ser sometida a ambientes de compactación debido a los niveles de tránsito al que estaría expuesta como material constituyente de la capa de rodadura. Adicionalmente, al presentar esa tipología de angularidad y textura superficial condiciona a la ENHAE (Figura 2) como un elemento capaz de resistir las sollicitaciones de uso en el transcurso de su vida útil contribuyendo en el aumento del rozamiento interno existente entre la escoria el los demás componentes aglomerantes de la mezcla asfáltica.

Figura 2. Selección de partículas de ENHAE para análisis visual



Fuente: Autor

Del mismo modo, la evaluación realizada con base en la tabla de la tabla de correlación entre esfericidad y redondez tomada de Powers (Figura 3), se evidencia

que la forma de la ENHAE corresponde a una alta esfericidad por su condición redondeada con incidencia angular.

Figura 3. Redondez y esfericidad de las partículas

ESFERICIDAD	ALTA ESFERICIDAD						
	BAJA ESFERICIDAD						
		MUY ANGULAR 1	ANGULAR 2	SUBANGULAR 3	SUBREDONDEADO 4	REDONDEADO 5	BIEN REDONDEADO 6
		REDONDEZ					

Fuente: Manual preliminar de petrografía aplicada al estudio de materiales pétreos para carreteras, Powers, 1953.

La caracterización de forma, va acompañada de una configuración física de tamaño correspondiente a grano grueso al superar el tamaño los 2mm, siendo equivalente con el tamaño del tipo de agregado usado convencionalmente, correspondiente a grava (Figura 4).

Figura 4. Muestra de ENHAE



Fuente: Autor

4.1.2 Color

La observación visual permitió clasificar a la escoria negra dentro de tres parámetros: matriz o color base, brillo o intensidad del color y el valor o claridad del mismo, de acuerdo a los indicadores presentados en el manual preliminar de petrografía aplicada al estudio de materiales pétreos para carreteras, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 6. Clasificación de color de la ENHAE

MATRIZ	BRILLO	VALOR
Gris	Grisáceo - rojizo	Oscuro

Fuente: Autor

El color básico presentado por la ENHAE es consecuente aun gris oscuro que se extiende en la totalidad de su interior y superficie, acompañado por un brillo de color grisáceo con presencia de tonalidades rojizas en diversos puntos de la muestra proveniente a la presencia de óxidos de hierro en forma puntos redondos con diámetro de 1 a 2 mm aproximadamente en su composición (Figura 5).

Figura 5. Evidencia de color en ENHAE



Fuente: Autor

4.1.3 Textura

La valoración de la textura de manera visual permite establecer una correspondencia a “textura vítrea” a raíz de que la ENHAE presenta una forma con clasificación correspondiente a amorfa debido a la irregularidad presente en su superficie, con contenido de granos en forma de puntos de óxidos de hierro y presencia de espacios vacíos identificados como poros (Figura 5).

4.1.4 Estructura

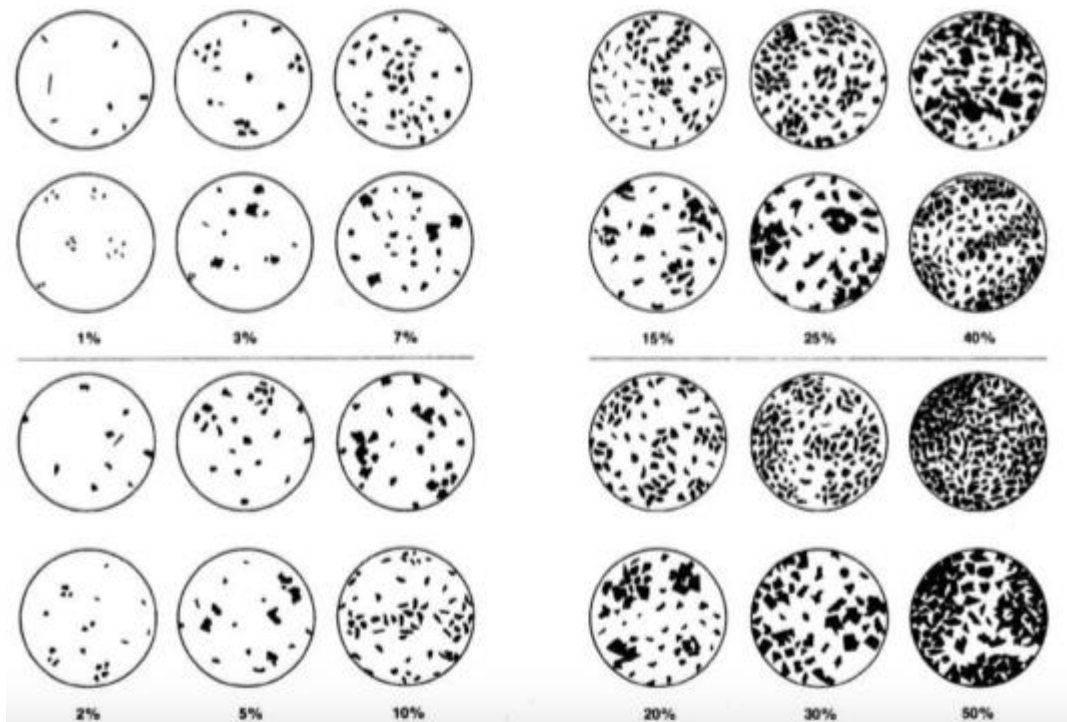
La distribución y orden espacial de los componentes de la ENHAE a escala macroscópica presenta una estructura homogénea en donde no se distingue una distribución preferencial de los mismos, dando una contextura sólida y unificada (Figura 5).

4.1.5 Porosidad

La muestra seleccionada de ENHAE para evaluación macroscópica presenta una porosidad alta, de acuerdo a la carta de estimación de porcentajes de poros de Compton (Figura 6) correspondiente a un contenido de poros entre el 16 y 32%, con un valor medio alrededor del 20%, tras ser evaluada por medio de observación en determinación de las cantidades de áreas correspondientes a zonas con y sin presencias de poros.

Figura 6. Carta de estimación de porcentaje de poros

1. Porosidad muy baja: menor de 4%
2. Porosidad baja: de 4 a 8% (valor medio alrededor de 6%)
3. Porosidad media: de 8 a 16% (valor medio alrededor de 10%)
4. Porosidad alta: de 16 a 32% (valor medio alrededor de 20%)
5. Porosidad muy alta: mayor de 32%



Fuente: Compton, 1985

Al considerar que la presencia de poros contenido en la misma se encuentra en el 30% de la totalidad de su superficie individual en análisis, característico de macroporos al contener grandes tamaños que permiten la circulación de agua sin generar su retención, siendo una respuesta repetitiva a los largo de las partículas visualizadas (Figura 7), esto es un indicativo de que la ENHAE presenta capacidad adecuadas de adherencia, teniendo en cuenta lo expresado por Cerón, Duarte y Castillo al afirmar que “A mayor porosidad mayor fuerza a adhesión, de manera que

los agregados gruesos con una menor porosidad tendrán una mayor densidad y resistencia al desgaste y como consecuencia una menor adherencia”¹⁹

Figura 7. Evidencia de porosidad en ENHAE



Fuente: Autor



4.1.6 Resistencia

Se realizó el retiro de partículas sueltas presentes en la superficie de la muestra para obtener una mejor visualización de la respuesta obtenida por la ENHAE (Anexo 11-22). Como muestras de análisis se seleccionaron dos categorías, la primera con partículas con muy alto contenido de poros (rango estándar mayor de 32%) y la segunda con alto contenido de poros (rango estándar entre 16%-32%); al analizar la resistencia a partir de índices de campo presentados por González Vallejo (Anexo 23) se obtuvo la clasificación correspondiente para la ENHAE con base en las descripciones presentes en la misma, se evidenció que el material no permite la generación de marcas con elementos como la uña y la navaja, de la misma manera,

¹⁹ Cerón, Duarte y Castillo, 1996. Citado por: INGEOMINAS. Manual Preliminar de Petrografía Aplicada al Estudio de Materiales Pétreos para Carreteras. Bogotá D.C. 2010. p 50.

la muestra con presencia muy alta de poros presentó disgregación del material y fractura tras aplicarse un total de 3 golpes con martillo; por el contrario, la muestra con alto contenido de poros no presentó desprendimiento de partículas ni fracturas tras ser expuesta al mismo procedimiento (Tabla 7).

Tabla 7. Resultado de análisis de resistencia con base en los índices de campo de González de Vallejo

	Descripción	Identificación de campo	≈ Resis. a la comp. (Mpa)	Tipo de muestra	Evidencia
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe de martillo para fracturarla	50 - 100	Muy alta porosidad	
R6	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas	>250	Alta porosidad	

Fuente: Autor

Lo anterior conlleva a establecer que al aumentar la porosidad en la ENHAE, esta tiende a ser más susceptible a sufrir daños antes la aplicación de cargas externas debido a que en su estructura superficial no existe continuidad para poder transmitir y soportar las cargas de manera uniforme y homogénea, considerando bajo la evidencia desplegada al golpearlo con el martillo generaba la ruptura entre los

espacios que separaban los macroporos presentes en la muestra, generando rotura en su totalidad.

4.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS INV E – 213 – 13

Este método se usa, principalmente, para determinar la granulometría de los materiales propuestos como agregados o que se están usando como tales. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de las especificaciones en relación con la distribución de partículas y para suministrar los datos necesarios para el control de la producción de los agregados y de las mezclas que los contengan. Los datos pueden servir, también, para el estudio de relaciones referentes a la porosidad y al empaquetamiento entre partículas (INVIAS 2013b).

La realización del análisis granulométrico para la arena de trituración y la ENHAE se fundamentó en la importancia de conocer el comportamiento de cada una por separado para que al momento de hacer la granulometría combinada definitiva para el diseño de la mezcla asfáltica, la curva unificada se encuentre dentro de los rango límites y de tolerancia de la norma del INVIAS; esto se logra al incluir en la granulometría combinada final los tamices de retención de material para cada uno que presenten un comportamiento adecuado al estar dentro de los límites requeridos, siendo este un factor definitorio de la granulometría a usar para el diseño de mezcla.

4.2.1 Escoria negra de horno de arco eléctrico (ENHAE)

El análisis granulométrico para agregado grueso se realizó con un total de 1852,2gr de ENHAE con una masa representativa para cada tamiz aproximada a 250g, permitiendo denotar que las partículas evaluadas presentan condiciones predominantes de tamaños correspondientes a grandes dimensiones, y de igual

manera se encontró un alto contenido de residuo (polvo) correspondiente a los procesos de carga, transporte y disposición del material. Adicionalmente, se evidencia que los tamices con mejor comportamiento para retención de agregado grueso son el de 1/2", 3/8" y el N°4 (Figura 8) motivo por el cual son los seleccionados para incorporar en el diseño final; de manera paralela se evidencia que el material retenido en los tamices N°40 y N°80 superan los límites de tolerancia para el porcentaje de pasa (Tabla 8), siendo indicativo de gran contenido de material fino que no es apto para implementar.

Tabla 8. Información de granulometría a ENHAE

ABERTURA DEL TAMIZ		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	Límites de pasa (%)		Tolerancia de pasa (%)	
Den Est	mm					Inf	Sup	Mín	Máx
1"	25	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	96,0	100,0
3/4"	19,00	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	96,0	100,0
1/2"	12,50	244,9	13,22	13,2	86,8	80	95	76,8	98,8
3/8"	9,50	249,6	13,48	26,7	73,3	70	88	67,2	91,5
N° 4	4,76	249,6	13,48	40,2	59,8	49	65	47,0	67,6
N°10	2	250,0	13,50	53,7	46,3	29	45	28,1	46,4
N°40	0,425	250,0	13,50	67,2	32,8	14	25	13,6	25,8
N°80	0,18	250,1	13,50	80,7	19,3	8	17	7,8	17,5
N°200	0,075	250,0	13,50	94,2	5,8	4	8	3,9	8,2
Pasa 200		108,0							
TOTAL RETENIDO		1852,2							

Fuente: Autor

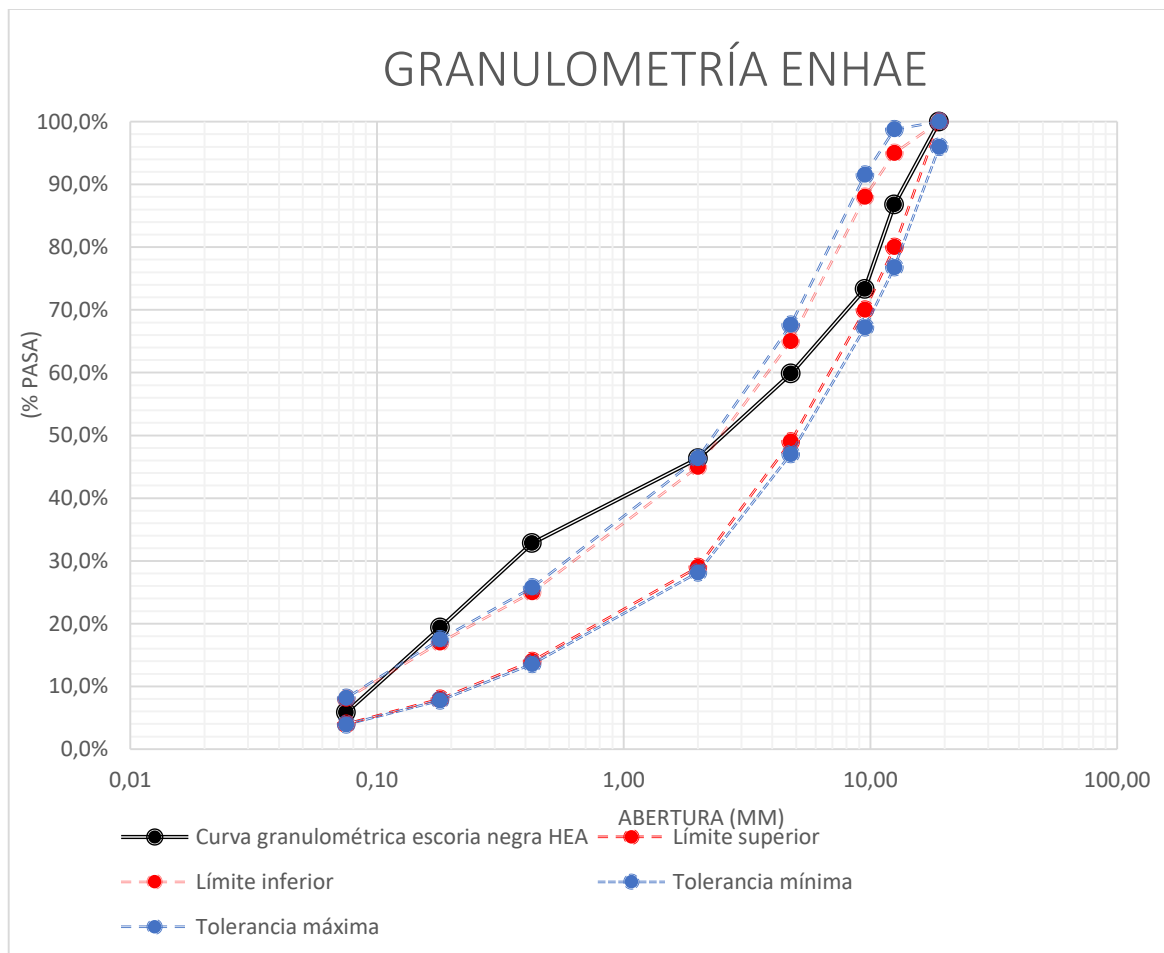
Lo anterior es un indicativo de que las ENHAE provenientes de la siderúrgica SIDENAL S.A presenta valores óptimos de "porcentaje pasa" de acuerdo con los rangos de tolerancia presentados para conformar una mezcla asfáltica con enfoque a implementar un agregado grueso con dimensiones requeridas por el INVIAS para un diseño de mezcla densa caliente MDC-19 para componer los diámetros del agregado grueso que compone la mezcla asfáltica.

Tabla 9. Resultados granulometría a ENHAE

CONSOLIDADO GRANULOMETRÍA ESCORIA	
Peso inicial (g)	1852,2
Peso seco después de lavar la muestra (g)	1493,5
%Pasa N°200	5,8%
Tamaño máximo	1/2"
% Fracción gruesa	94,2%
% Fracción fina	54,0%

Fuente: Autor

Figura 8. Curva granulométrica de ENHAE



Fuente: Autor

4.2.2 Arena de trituración

El análisis granulométrico realizado a la arena de trituración se realizó con un total de 2778g evidenciando ser un material con un tamaño de partículas lo suficientemente finas para garantizar un buen comportamiento, siempre y cuando se haga la separación de impurezas y demás contaminantes que se presenten en finas fracciones, considerando que en los tamices N°40 y N°80 (Tabla 11) el material que pasa los mismos es superior al límite máximo de tolerancia. Este cumplimiento se evidencia en la curva granulométrica (Figura 9) que presenta una ubicación fuera de los rangos de norma, siendo lo adecuado para la arena, ya que al momento de mezclarse con el agregado grueso permite combinar los porcentajes de tal modo que cumpla en la totalidad con los límites de norma.

Tabla 10. Información granulometría a arena de trituración

ABERTURA DEL TAMIZ		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	Límites de pasa (%)		Tolerancia de pasa (%)	
Den Est	mm					Inf	Sup	Mín	Máx
1"	25	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	96,0	100,0
3/4"	19,00	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	96,0	100,0
1/2"	12,50	5,8	0,2	0,2	99,8	80	95	76,8	98,8
3/8"	9,50	4,7	0,2	0,4	99,6	70	88	67,2	91,5
N° 4	4,76	329,6	11,9	12,2	87,8	49	65	47,0	67,6
N°10	2	828,2	29,8	42,1	57,9	29	45	28,1	46,4
N°40	0,425	892,3	32,1	74,2	25,8	14	25	13,6	25,8
N°80	0,18	458,1	16,5	90,7	9,3	8	17	7,8	17,5
N°200	0,075	225,5	8,1	98,8	1,2	4	8	3,9	8,2
Pasa 200		33,8							
TOTAL RETENIDO:		2778,0							

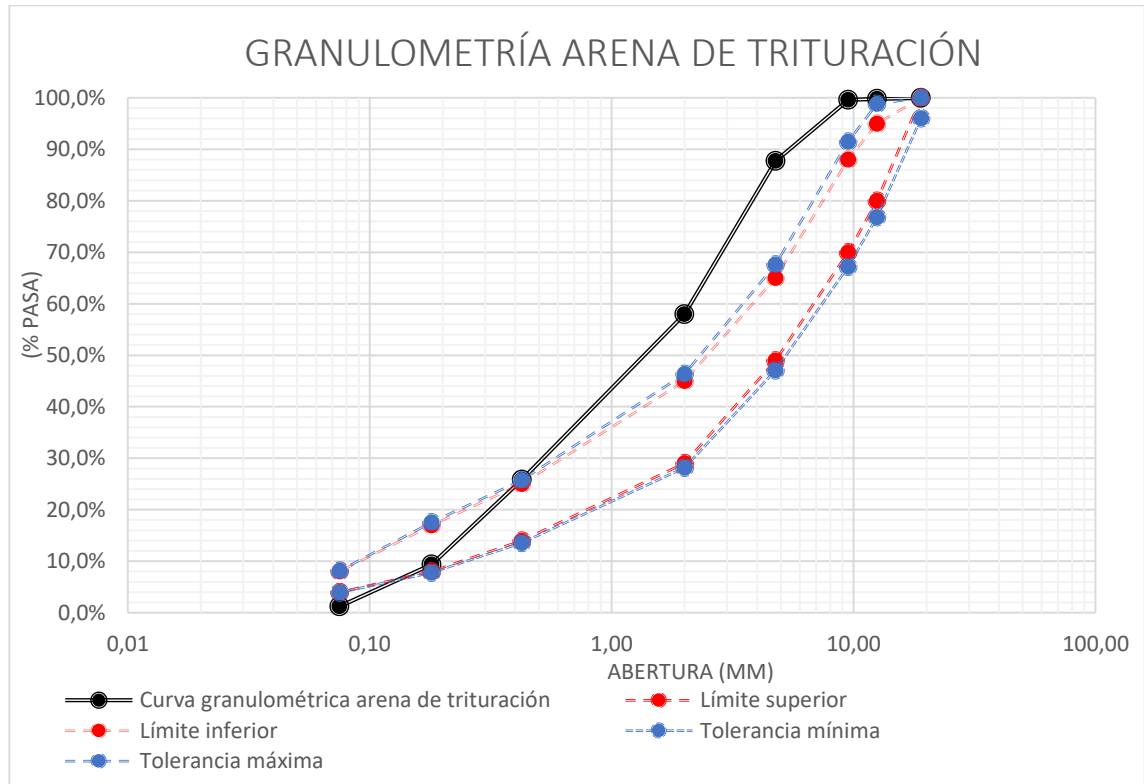
Fuente: Autor

Tabla 11. Resultados granulometría a arena de trituración

CONSOLIDADO GRANULOMETRÍA ARENA	
Peso inicial (g)	2778
Peso seco después de lavado (g)	2744,2
%Pasa N°200	1,2%
Tamaño máximo	1/2"
% Gruesos	12,2%
% Finos	86,5%

Fuente: Autor

Figura 9. Curva granulométrica arena de trituración



Fuente: Autor

4.3 DUREZA, AGREGADO GRUESO

Con base en los requisitos presentados por el INVIAS-13 para los agregados contenidos en las mezclas asfálticas en caliente, se incursionaron una serie de

ensayos enfocados en determinación de las ENHAE frente a acciones de esfuerzo o carga por medio de diversas condiciones de desgaste para las condiciones de Nivel de Tránsito NT3, obtenidos por los siguientes ensayos:

4.3.1 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37,5mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles INV E – 218 – 13

Se implementó un total de ENHAE de 5003,4g comprendidos como material retenido en los tamices 3/4", 1/2", 3/8" y 1/4". Tras ingresar el material a la máquina de los ángeles se adicionó un total de 12 esferas de acero con un peso de 5000g cada una, las cuales giraron a 500 revoluciones, lo que equivale a 17 minutos. Tras salir el material y ser clasificado por medio del tamiz N°12, se evidencia un peso total de 4107,7g, esto llevó a determinar un porcentaje de desgaste del 17,9%. Posteriormente, este material se trasladó nuevamente a la máquina de los ángeles para repetir el procedimiento para manejar un equivalente de 100 revoluciones, generando como resultado un material final de 4810,23g consecuente a un desgaste del 3,86% para 100 revoluciones, realizadas con el mismo material e igual contenido de esferas.

Tabla 12. Material contenido para ensayo en máquina de los ángeles

TAMIZ RETENIDO	Peso (g)	Muestra total (g)	Muestra final (g)	
3/4"	1249,7	5003,4	A-500REV	A-100REV
1/2"	1253,2			
3/8"	1250		4107,7	4810,23
1/4"	1250,6			

Fuente: Autor

Al evaluarse junto con los rangos establecidos por norma para ser un agregado grueso apto para implementarse como componente de la capa de rodadura se establece que se encuentra dentro de los rangos al no superar el porcentaje

requisito del 25% y estar por debajo con una diferencia de 7,1% para un ensayo con base de 500 revoluciones; ocurre igualmente con 100 revoluciones al denotar que la diferencia se encuentra por debajo con una porcentaje del 1,14% frente a un requerimiento del 5% (tabla 14), de acuerdo con los rango especificados por el INVIAS en sus Especificaciones Generales de Construcción de carreteras (Anexo 8).

Tabla 13. Resultados de desgaste en máquina de los ángeles

GRANULOMETRÍA ELEGIDA	A		CUMPLIMIENTO	
	NÚMERO DE REVOLUCIONES	500	100	A-500REV
CONDICIÓN DE ENSAYO	Seco	Seco		
MASA DE CARGA (g)	5000±25	5000±25	Capa de rodadura (25% máx)	Capa de rodadura (5% máx)
NUMERO DE ESFERAS	12	12		
PESO INICIAL (g)	5003,5	5003,5		
PESO FINAL (g)	4107,7	4810,23		
DESGASTE (%)	17,90 %	3,86 %	CUMPLE	CUMPLE

Fuente: Autor

De esto se concluye que las escorias negras al ser un sub-producto del acero presenta una dureza elevada, lo que contribuye a resistir los efectos de impacto, abrasión y por consiguiente de molienda, adicionalmente, se tiene en cuenta la investigación de Estado del Arte realizada por el ingeniero Héctor Sánchez, quien presenta en sus conclusiones un análisis concerniente a que esta tipología de escoria presenta degradación frente a sollicitaciones mecánicas²⁰.

²⁰ SÁNCHEZ, H., RELACIÓN, I.I., ESTADO, D.E.L. y ARTE, D.E.L., 2014. Arco Eléctrico Y Sus Aplicaciones En Pavimentos. V congreso de Ingeniería Civil, p 1–14.

4.3.2 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval INV E – 238 – 13

Para la realización del ensayo de abrasión por Micro-Deval, se tuvieron en cuenta un total de 1500g de material retenido en los tamices 3/8", 1/4" y N°4 correspondiente (Tabla 15) para un tamaño máximo del agregado grueso de 1/2" para ser sumergida posteriormente en dos litros de agua a una temperatura de 20°C durante una hora en el recipiente de Micro-Deval, transcurrido este tiempo se incluyen 5000g de esferas de acero para que al momento de tapar el recipiente y empezar el movimiento de rotación del mismo a 100 revoluciones por minuto durante 2 horas, se simulen las condiciones reales de abrasión para evaluar la respuesta en cuanto a durabilidad de la ENHAE.

Tabla 14. Contenido de ENHAE por tamiz para ensayo en aparato Micro-Deval

TAMAÑOS		PESO
PASA	RETENIDO	(gr)
1/2"	3/8"	750
3/8"	1/4"	375
1/4"	N°4	375
TOTAL		1500

Fuente: Autor

Transcurrido el tiempo de rotación, se procedió a hacer el retiro del material y la separación de las esferas presentes, para así lograr el consolidado del material restante. Este se obtuvo al pasar las ENHAE por los tamices N°4 y N°16, del cual se tuvo en cuenta que el material que pasó el tamiz N°16 correspondía al material que sufrió mayor desgaste por abrasión, generando molienda en su estructura; al estar esta masa representada por 174,4 g de ENHAE, se estableció una proporción correspondiente al 11,6% de desgaste por abrasión evaluado bajo condiciones de saturación, siendo un valor óptimo que garantiza la durabilidad del material frente a condiciones que incluyan absorción de agua por el mismo al estar de manera

paralela expuesto a cargas o esfuerzos sin generar un porcentaje de molienda que afecte las condiciones mismas del material y por consecuente de la capa de rodadura, considerando que el INVIAS establece como porcentaje máximo de desgaste el 20% para capa de rodadura (Anexo 8), del cual, las ENHAE se posicionan por debajo de lo establecido por norma con una diferencia del 8,4%.

Tabla 15. Resultado ensayo Micro-Deval

MUESTRA N°	MASA INICIAL (gr)	MASA FINAL (gr)	TIEMPO DE ROTACIÓN (Min)	% DE PÉRDIDA (gr)	% DE DESGASTE	CUMPLIMIENTO
1	1500	1325,6	120	174,4	11,6	Capa de rodadura (20% máx) NT3 CUMPLE

Fuente: Autor

4.3.3 Determinación del 10% de finos INV E – 224 - 13

La realización del ensayo para determinar el 10% de finos contenido en ENHAE se llevó a cabo con dos muestras representativas de 2700g y 2703g para observar el funcionamiento bajo condiciones secas y en presencia de agua respectivamente (Tabla 17) conteniendo únicamente el material representativo entre los tamices ½” y 3/8” para la formación de tres especímenes para cada tipo de condición a analizar, estos se realizaron teniendo presente la incursión de la escoria en tres capas hasta alcanzar la altura total del molde, a las cuales se les aplicó un total de veinticinco (25) golpes por capa para luego sobreponer la siguiente capa hasta terminar las tres. Para el primer estado de prueba (seco) tras la formación de los especímenes se ingresaron al horno durante tres (3) horas, luego de las cuales se dejaron enfriar al aire libre antes de someterse a la prueba de carga; en el caso de la prueba en estado húmedo se sumergió en un recipiente de agua que cubría y superaba la superficie de los especímenes, luego se levantaron y dejaron caer veinticinco (25)

veces para sacar el aire contenido en los mismo, en el transcurso de este proceso hasta transcurrir 24 horas de estar la muestra sumergida, se mantuvo la temperatura del agua a 20°C, cumplido este tiempo se retiraron los especímenes y se secaron las partículas superficiales del mismo con una toalla de papel. Terminados esto, se procedió a ensayar los especímenes en la máquina a compresión hasta que se alcanzó una penetración de 25mm, considerando que con base en la norma se indica que debe realizarse hasta esta medida teniendo en cuenta que el material a ensayar es escoria.

Terminado este proceso, se retiró el material y se tamizó, tomando únicamente el material retenido por el tamiz N°8, dando un peso de 2458,3g para condición seca y de 2462,3g para condición húmeda, con porcentajes de contenido de finos del 9% y 8,9% respectivamente, lo cual equivale a un contenido del 10% de finos de 202,3g y 251,9g para las mismas. Con base en los requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente presentada por el INVIAS (Anexo 8) se logra evidenciar el cumplimiento de los parámetros base de calidad, al superar el valor mínimo de carga para la condición seca, el cual estaba indicado como 110KN y con las ENHAE se obtuvo 187,2KN de carga aplicada al espécimen para alcanzar una penetración de 25mm; de igual manera, la relación húmedo-seco superó el 25% al alcanzar un 124,5% de acuerdo a lo indicado para ser implementado en la capa de rodadura (Tabla 17).

Tabla 16. Resultados ensayo de determinación del 10% de finos en la ENHAE

ESTADO ENSAYO	SECO	HÚMEDO	CUMPLIMIENTO	
PENETRACIÓN (mm)	24	24	Capa de rodadura	
MASA DE AGREGADOS (gr)	2700	2703	Relación	
MASA RETENIDA (gr)	2458,3	2462,3	Valor seco	húmedo-
% FINOS	9	8,9	mínimo	seco
10% DE FINOS	202,3	251,9	110KN	mínimo
CARGA (KN)	187,2	232,2		75%
RELACIÓN HÚMEDO-SECO	124,5%		CUMPLE	CUMPLE

Fuente: Autor

El cumplimiento presentado por la ENHAE indica que es un material con presencia de condiciones óptimas para incluirse como agregado dentro de la estructura del pavimento, más específicamente en la mezclas asfáltica que conforma la capa de rodadura, considerando que presenta un porcentaje de finos bajo frente a altos entornos de carga al ser capaz de resistir esfuerzos por medio del intercambio inter-particular de las escorias para recibir las cargas de sollicitación y transmitir las a tal punto que alcanza a disiparlas y lograr que la transferencia de carga a las demás capas se realice de manera adecuada para que estas puedan soportarlas sin sufrir daños. Es decir, las ENHAE cuentan con capacidad de resistir cargas sin generación de degradación mecánica que supere los límites admitidos por norma.

4.4 LIMPIEZA, GRADACIÓN COMBINADA

4.4.1 Equivalente de arena de suelos y agregados finos INV E – 133 - 13

El ensayo se realizó con un total de 1500g de arena procedente de la cantera Crasurca siendo extraído este material del río Cravo Sur, el tamaño del mismo fue consecuente al establecido para pasar el tamiz N°4 teniendo presente que no contase con presencia de contaminantes, realizado para las dos pruebas a las que se expuso el material para una mayor precisión en los resultados, del mismo modo fue sometido a cuarteo incorporando medidas de precaución que incluían humedecer la muestra para garantizar que no se presenten pérdidas de finos o alteraciones, la cual fue secada al aire. Luego de tener lista la muestra, se incorporó la solución de cloruro de calcio en la probeta seguido de la muestra, realizado esto se extrajo el aire contenido en la muestra por medio de golpes con la mano para generar la salida de burbujas de aire para luego realizar la agitación de la probeta tapada hasta completar un total de 90 ciclos que unifiquen su contenido.

Realizado el proceso de agitación, se pasó a ejecutar la irrigación en la muestra, llevándose a cabo al insertar el tubo irrigador aflojando la pinza de presión en el

interior de la probeta hasta que alcance el fondo de la muestra aplicando presión y giro hasta hacer el que el material fino suba a tal punto de quedar en suspensión sobre el material restante que presenta partículas de mayor tamaño, generando un lavado en el material fino presente en la prueba; terminado esto se dejó en reposo la muestra por un transcurso de 20 minutos. Transcurridos para la prueba N°1 se tuvo en cuenta que al minuto 13 con 23 segundos y para la prueba N°2 con 17 minutos con 42 segundos se dio inicio al período de conteo para efectuar la fase de hundimiento registrando un nivel presentado por el contenido de material suspendido como lectura de arcilla, dando un nivel de 4,9 mm y 5,0 mm respectivamente. Seguidamente se procedió a hacer la lectura de arena la cual presentó un nivel de 13,3 mm para las dos pruebas realizadas. Lo anterior permitió establecer un porcentaje de equivalente de arena comprendido en 270%, (Tabla 18) que al evaluarse con lo indicado por norma (Anexo 8) cumple con las características requeridas para ser implementado como agregado fino (arena) dentro de la mezcla asfáltica para un nivel de tránsito NT3.

Tabla 17. Datos ensayo "Equivalente de arena"

N° PRUEBA	1	2	CUMPLIMIENTO
TIEMPO INICIAL PRE-HUNDIMIENTO (min)	00 : 00	05 : 00	Mínimo 50% para NT3
TIEMPO FINAL PRE-HUNDIMIENTO (min)	10 : 00	15 : 00	
TIEMPO INICIAL HUNDIMIENTO (min)	13 : 23	17 : 42	
TIEMPO FINAL HUNDIMIENTO (min)	33 : 23	37 : 42	
LECTURA ARENA (mm)	13,3	13,3	
LECTURA ARCILLA (mm)	4,9	5,0	
EQUIVALENTE DE ARENA (%)	270		

Fuente: Autor

Lo anterior permite establecer que la muestra seleccionada de arena para integrarse en la mezcla asfáltica cumple con los requisitos al presentar un bajo contenido de material fino, lo que conlleva a afirmar su capacidad de soportar y garantizar que no

se presentarán estados de expansión que puedan llegar a afectar la capacidad de resistencia y estabilidad del pavimento flexible. Adicionalmente, al cumplir permite probar de manera clara que la variable principal de estudio (ENHAE) presentará condiciones de estudio neutras, contribuyendo a que al momento de evaluar la mezcla asfáltica se pueda denotar de manera clara el comportamiento del mismo al interactuar con materiales de alta calidad y cumplimiento total de los requisitos expedidos por el INVIAS-13.

4.5 GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS, ESCORIA

4.5.1 Índice de alargamiento y aplanamiento de los agregados para carreteras INV E – 230 – 13

La muestra seleccionada para la realización del ensayo de alargamiento y aplanamiento se recibió totalmente aislada de contaminación externa por medio de un almacenamiento realizado por la respectiva entrega en bolsas plásticas transparentes de laboratorio, totalmente selladas.

Tabla 18. Información del material

DESCRIPCIÓN MUESTRA	Escorias negras de horno de arco eléctrico
LUGAR DE PROCEDENCIA	Planta de producción de SIDENAL S.A.
MODO DE TRANSPORTE	Bolsas plásticas transparentes

Fuente: Autor

La importancia de este estudio radica en “la forma de las partículas de los agregados es importante en la construcción de carreteras, porque las partículas de forma defectuosa suele generar inconvenientes. Las partículas planas y alargadas tienden a producir mezclas de concreto poco trabajables, lo que puede afectar su

durabilidad a largo plazo. En las capas granulares y en las mezclas asfálticas, esas partículas son propensas a rotura, disgregación durante el proceso de compactación, modificando la granulometría del agregado y afectando adversamente su comportamiento” (INVIAS 2013b).

La muestra correspondiente a ENHAE contó con un peso inicial de 5458,3g para realizar el ensayo de aplanamiento y alargamiento, con la cual se procedió a pasar uno a uno de los fragmentos que la integran por los instrumentos de medida de cada parámetro (alargamiento y aplanamiento); en el primero de estos (alargamiento) se verificó la clasificación correspondiente a cada fracción de pasa y retiene del material con base a la medida más larga presente por la misma; en el segundo (aplanamiento) se tuvo en cuenta clasificar la muestra con base a su superficie más angosta, teniendo en cuenta su capacidad de pasar sin necesidad de ejercer fuerza sobre la misma.

Tabla 19. Resultados de alargamiento y aplanamiento

FRACCIONES		MASA INICIAL (g)	MASA DE PARTICULAS PLANAS (g)	% APLANAMIENTO	MASA DE PARTICULAS LARGAS	% ALARGAMIENTO
% PASA	% RETEN.					
2½"	2"	0	0	0	0	0
2"	1½"	0	0	0,0	0	0,0
1½"	1"	520,1	842,6	162,0	308,9	59,4
1"	¾"	1082,8	1487,3	137,4	1263,9	116,7
¾"	½"	1635,6	1215,2	74,3	1413,4	86,4
½"	⅜"	801	460,1	57,4	801	100,0
⅜"	¼"	1418,8	7,9	0,6	161,8	11,4
Σ TOTAL		5458,3	4013,1	431,7	3949,0	373,9
INDICE DE APLANAMIENTO GLOBAL						74
INDICE DE ALARGAMIENTO GLOBAL						72
CUMPLIMIENTO (Máx 10%)						CUMPLE

Fuente: Autor

El ensayo de laboratorio permitió evidenciar que el mayor porcentaje retenido de material con base en el aplanamiento del mismo, se localizó en las fracciones de 1"-3/4" con 1478,3g y en 3/4"-1/2" con un total de 1215,2g, generando un índice de aplanamiento global de 74%; De igual manera, se establece que en las fracciones correspondientes a las mismas de aplanamiento, se concentran la mayor cantidad de material en las fracciones de 3/4"-1/2" con 1413,4g y 1"-3/4" 1263,9g respectivamente, generando un índice de alargamiento global de 72%.

Esto permite establecer que el material cuenta con condiciones de alargamiento y aplanamiento predominante, pero al evaluarse la relación de los dos parámetros en conjunto permite denotar la presencia de partículas de grandes dimensiones y proporcionales, debido a la poca diferencia entre los valores obtenidos de los mismos evidenciando una diferencia entre las mismas del 2%, estando por debajo del rango máximo admisible por la norma (Anexo 8) del 10% para un nivel de tránsito NT3 con una diferencia del 8% garantizando que al implementarse como agregado en la mezcla asfáltica cumplirá con las condiciones de trabajabilidad y durabilidad sin presentar rotura o desintegración frente a procesos de compactación, por el contrario contribuirá a mejorar las condiciones del pavimento no solo frente a las solicitudes de uso sino frente a las pruebas de laboratorio y/o al momento de aplicar la mezcla en un vía.

4.5.2 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E – 227 - 13.

El ensayo se realizó con una muestra total de 1560,2g contenidas sus partículas entre los tamices retenidos en 3/4" y 3/8", en cada fracción retenida se evaluó la cantidad de material con caras fracturadas, caras no fracturadas y material de frontera; a partir de allí se logró determinar que el 100% de las partículas evaluadas presentan condiciones de fracturamiento.

Tabla 20. Resultados de caras fracturadas

FRACCION		PESO MUESTRA (g)	PESO PARTÍCULAS FRACTURADAS (g)	PESO PARTÍCULAS DE FRONTERA (g)	PESO PARTÍCULAS NO FRACTURADAS (g)	CARAS FRACTURADAS (%)
PASA	RETIENE					
1 1/2"	1"	0	0	0	0	0
1"	3/4"	696,60 g	696,60 g	0,00 g	0,00 g	100 %
3/4"	1/2"	708,60 g	708,60 g	0,00 g	0,00 g	100 %
1/2"	3/8"	155,00 g	155,00 g	0,00 g	0,00 g	100 %
TOTALES:		1560,2	1560,2	0,0	0,0	
TOTAL CARAS FRACTURADAS					100 %	

Fuente: Autor

Este alto porcentaje de fracturamiento permite establecer que las ENHAE son materiales muy irregulares lo que incrementa la resistencia al corte al contribuir de manera decisiva en la mayoración de la fricción entre los elementos que componen la mezcla asfáltica, dando estabilidad y textura a la composición final de la capa de rodadura al permitir un acoplamiento óptimo lo que conlleva a obtener mejor adherencia y consolidación.

4.6 GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS, AGREGADO FINO (ARENA)

4.6.1 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) INV E – 239 - 13

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta el método "A" requerido para mezcla asfáltica como mecanismo de análisis del porcentajes de angularidad de la arena triturada. Para este se realizarón tres pruebas para garantizar una mayor certeza en los resultados, tomando el material retenido en los tamices N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100 hasta completar un total de material seco de 137,11g, 137gr y 137,24gr respectivamente (Tabla 22), posteriormente se unifica la muestra mezclandola para ser pasada al embudo, el cual tenia el orificio de salida sellado con el dedo mientras se adicionaba y se nivelaba el contenido del mismo. Realizado esto, se retiró el

dedo dejando caer el material en un recipiente cilindrico, al terminar de vaciar el embudo se retiraron los materiales excedentes del recipiente cilindrico hasta nivelarlo y dejar su exterior completamente limpio evitando que se presentaran vibraciones que generaran la compactación del material, esto se repitió para cada una de las pruebas con el fin de obtener los pesos para determinación de la angularidad de la arena de trituración.

Tabla 21. Resultados de angularidad en agregados finos

MÉTODO	A			PROMEDIO	CUMPLIMIENTO
Nº MUESTRA	1	2	3		
TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	25	25	25	25	Capa de rodadura (45% mínimo) NT3
VOLUMNE DEL CILINDRO (cm ³)	96,4	96,4	96,4	96,4	
MASA DEL AGREGADO (g)	137,11	137	137,24	137.12	
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2,680	2,680	2,680	2,680	
% DE ANGULARIDAD	45	47	47	46	

Fuente: Autor

Este método permite evidenciar el porcentaje de vacíos presentes en la muestra dependiendo de aspectos como la textura y forma de las partículas, incidiendo en las condiciones de la mezcla asfáltica en relación con la estabilidad y el contenido de vacíos en el llenante mineral. Al dar un porcentaje del 46% cumple con los requeridos por la norma, pero se debe considerar que al momento de la realización de la mezcla, este pueda presentar variaciones al estar funcionando en conjunto con la escoria negra y el asfalto, a tal punto que se pueden llegar a presentar variaciones en el contenido de vacíos de la mezcla asfáltica.

4.7 DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA

El diseño de mezcla asfáltica se realizó teniendo presente los factores de incidencia climáticos, geográficos y de tránsito para la ciudad de Tunja, de los cuales se

establecieron como variables de delimitación del mismo un cemento asfáltico con índice de penetración de 60-70 mm siendo apto para un nivel de tránsito NT3, establecido para condiciones de gran flujo vehicular y con requerimiento de mayor capacidad de resistencia de carga. A raíz de ello, se estableció un diseño implementando la fórmula de trabajo contenida para la mezcla densa caliente MDC-19 (Tabla 23) para tener certeza que las partículas de agregado grueso se adapte a las dimensiones con mayor persistencia en la granulometría realizada a la escoria negra, del mismo modo se designa un único diseño de mezcla con un contenido de reemplazo de escoria negra del 100% es una garantía de presentar óptimas condiciones de resistencia a la degradación, desgaste y rotura, respaldado con ensayos expuestos con anterioridad.

Tabla 22. Fórmula de trabajo para MDC-19

ABERTURA DEL TAMIZ (Denom. Estándar)	(mm)	Porcentaje Pasa (%)
1"	25	100
3/4"	19,00	100
1/2"	12,50	95,3
3/8"	9,50	90,5
N° 4	4,75	85,7
N°10	2,00	56,2
N°40	0,425	24,4
N°80	0,180	8
N°200	0,075	0

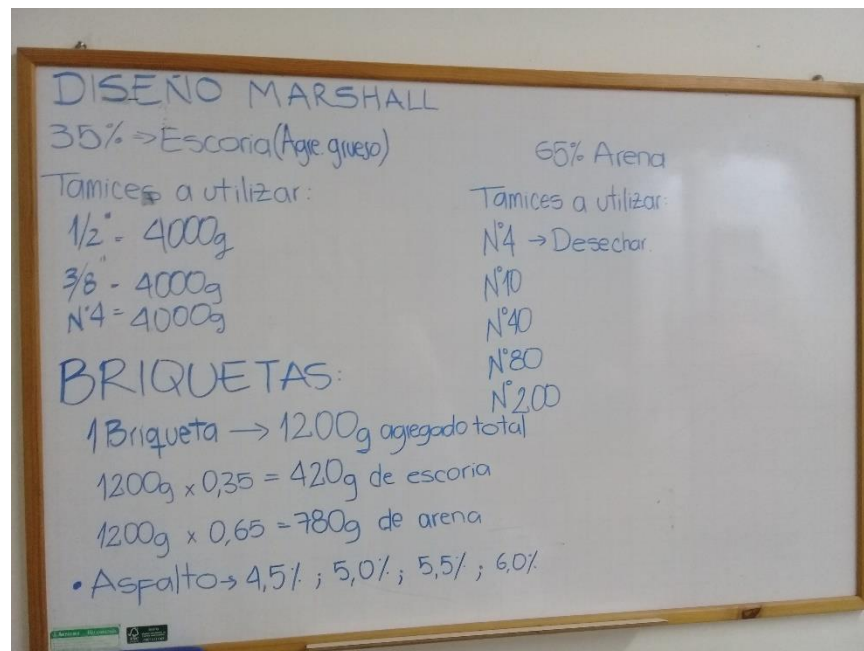
Fuente: Autor

4.7.1 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall INV E – 748- 13

La realización de las briquetas se llevó a cabo teniendo presente los parámetros ya mencionados e incorporando variables como el contenido de asfalto, temperatura de la muestra, implementación del material seco, adicionalmente, se condicionó el

total de la muestra teniendo presente que para una briqueta se requiere un total de 1200g de agregado total, a partir de la cual se calcularon las cantidades para adicionar de ENHAE y arena, siguiendo el procedimiento que se explica en la figura 10, del mismo modo se tuvo presente que para el cálculo del contenido de asfalto para cada porcentaje se realizaba con base en el contenido total de agregado a fin de obtener la cantidad en gramos a adicionar para los contenidos presentes entre 4,5% con variaciones en aumento del 0,5%. Hasta llegar a 7,0%.

Figura 10. Explicación de la relación de material para briquetas



Fuente: Autor

4.7.1.1 Granulometría combinada

Con base en las granulometrías presentadas por los dos tipos de agregado (escoria negra y arena), se realizó una granulometría combinada (Tabla 24) en donde se evaluaron las condiciones de retención del material, de este aspecto se evidenció que la curva granulométrica perteneciente a cada uno de los agregados presentaba una inclinación hacia lados opuestos dentro de los rangos a considerar para la

fracción a usar de cada uno de los mismos, al igual que estas mismas fracciones presentaban un posicionamiento dentro de los rangos de tolerancia para cantidades de material retenido en los tamices; A partir de allí se empezó a revisar los porcentajes de agregados finos y gruesos a manejar, dando como resultado apropiado una proporción correspondiente al 35% de escoria y un 65% de arena, con la cual se mantuvo una curva granulométrica dentro de los rangos por norma (Figura 11).

Tabla 23. Información de granulometría combinada para diseño de mezcla asfáltica

ABERTURA DEL TAMIZ		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	Límites de pasa (%)		Tolerancia de pasa (%)	
Den Est	mm					Inf	Sup	Mín	Máx
1"	25	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	96,0	100,0
3/4"	19,00	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	96,0	100,0
1/2"	12,50	85,715	4,7	4,7	95,3	80	95	76,8	98,8
3/8"	9,50	87,36	4,8	9,5	90,5	70	88	67,2	91,5
N° 4	4,76	87,36	4,8	14,3	85,7	49	65	47,0	67,6
N°10	2	538,3	29,5	43,8	56,2	29	45	28,1	46,4
N°40	0,425	580,0	31,8	75,6	24,4	14	25	13,6	25,8
N°80	0,18	297,8	16,3	92,0	8,0	8	17	7,8	17,5
N°200	0,075	146,6	8,0	100,0	0,0	4	8	3,9	8,2
Pasa 200		0,0							
TOTAL RETENIDO:		1823,1							

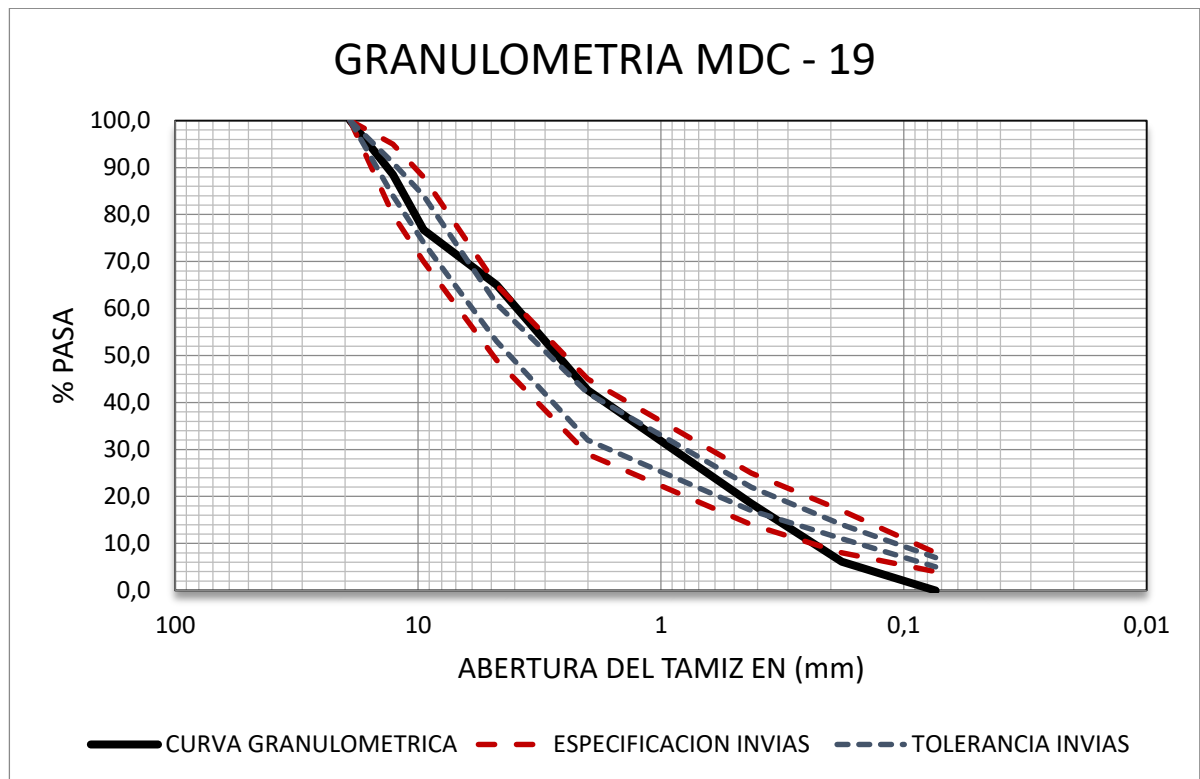
Fuente: Autor

Los tamices designados para el contenido de escoria negra son: 1/2", 3/8" y N°4, mientras que los elegidos para la arena fueron: N°10, N°40, N°80 y N°200 considerando los resultados de granulometría de la arena de trituración, la cual presentó granos con cumplimiento de norma en relación con su tamaño.

Establecidas las cantidades y porcentajes a manejar, se revolvió el total de la mezcla conteniendo todas las partículas seleccionadas para cada tamiz (Anexo 46), con el fin de generar condiciones de homogeneidad y similitud a las condiciones de

adecuación y trabajo del material al momento de aplicar la mezcla asfáltica en una vía.

Figura 11. Curva granulométrica combinada para diseño de mezcla asfáltica



Fuente: Autor

4.7.1.2 Diseño Marshall

De acuerdo con la granulometría combinada y la posterior mezcla de las partículas de ENHAE con la arena de acuerdo a las dosificaciones indicadas, se procedió a fabricar las 24 briquetas, de las cuales se asignaron 4 briquetas para cada porcentaje de asfalto (Tabla 24) que al momento de mezclarlas se verificó que estas contaran con una temperatura de 120°C (Anexo 56, 57) para mantener la fluidez del asfalto y obtener una mayor incorporación de los componentes. Durante este

proceso se observó que al contener baja cantidad de asfalto en la mezcla, este era rápidamente absorbido por la ENHAE a tal punto de generar una apariencia de ausencia de este en la mezcla (Anexo 53), pero en el transcurso de tiempo en que se estuvo revolviendo a una temperatura de 120°C se empezó a evidenciar que el asfalto empezó a salir de los poros de la escoria para mezclarse con todos los componentes hasta alcanzar una mejor integración de los componentes de la mezcla (Anexo 54-56).

Luego de formadas las briquetas se esperó dos días para proceder a realizar la extracción de las mismas de la mordaza que las contenía con el fin de someterlas a procesos de pesaje bajo las condiciones de masas seca normal, masa en agua a una temperatura del 25°C y en condición SSS que hace referencia a la sumersión de la briketa en agua para luego ser pesada y evaluar el contenido de vacíos (Tabla 25).

Tabla 24. Información briquetas ensayadas

% ASFALTO	Nº BRIQUETA	ESPEJOR BRIQUETA (mm)	MASA SECA BRIQUETA (g)	MASA BRIQUETA EN AGUA (g) 25°C	MASA BRIQUETA SSS EN AIRE (g)	GRAVEDAD MÁXIMA BRIQUETA A 25 °C
4,5	1	62,0	1198,3	703,0	1201,1	2,406
	2	60,0	1201,5	700,0	1202,9	2,389
	3	62,0	1206,9	678,0	1208,3	2,276
	4	61,0	1203,2	690,0	1204,7	2,338
GRAVEDAD PROMEDIO						2,352
5,0	5	61,0	1202,4	700,2	1207,3	2,371
	6	60,0	1205,4	698,3	1209,6	2,358
	7	60,0	1202,9	699,5	1208,1	2,365
	8	61,0	1203,3	700,7	1204,5	2,388
GRAVEDAD PROMEDIO						2,371
5,5	9	61,0	1198,8	711,0	1205,5	2,424
	10	61,0	1199,6	712,1	1201,7	2,450
	11	60,0	1197,5	714,0	1208,8	2,420
	12	60,0	1198,2	714,3	1209,9	2,418
GRAVEDAD PROMEDIO						2,428

6,0	13	61,0	1203,7	711,1	1206,9	2,428
	14	61,0	1206,2	712,2	1208,1	2,432
	15	60,0	1203,6	711,4	1205,3	2,437
	16	60,0	1205,6	712,6	1206,7	2,440
GRAVEDAD PROMEDIO						2,434
6,5	17	61,0	1199,3	707,0	1201,7	2,441
	18	60,0	1202,9	705,1	1206,2	2,423
	19	61,0	1206,2	701,2	1208,3	2,393
	20	60,0	1201,5	705,1	1203,2	2,424
GRAVEDAD PROMEDIO						2,420
7,0	20	60,0	1205,4	703,6	1207,6	2,407
	22	60,0	1209,7	699,6	1212,5	2,377
	23	61,0	1206,4	702,4	1210,1	2,401
	24	61,0	1207,5	706,5	1209,2	2,414
GRAVEDAD PROMEDIO						2,400

Fuente: Autor

Este proceso permitió identificar que al incrementar el contenido de asfalto en las muestras, estas aumentaban su gravedad máxima, en la cual la mayor gravedad promedio de briqueta fue de 2,434gr para una proporción del 6% de contenido de asfalto, y una mínima de 4,5% con 2,352gr. Al realizar un comparativo con los resultados normales presentados para un diseño de mezcla asfáltica que contenga grava y no escoria negra, estos presentan un comportamiento de mayor gravedad en los menores porcentajes de asfalto, dando como indicativo que esta variación se presenta debido a la composición de la escoria negra, considerando que esta contribuye a tener una menor densidad en comparación con la grava por lo cual el asfalto es el elemento predominante frente a los aumentos en la gravedad de la briqueta.

Tabla 25. Resultado de estabilidad y flujo para briquetas ensayadas

% ASFALTO	N° BRIQUETA	ESPESOR PROM (mm)	ESTABILIDAD LEIDA (Kgf)	FACTOR DE CORRECCION	ESTABILIDAD CORREGIDA (Kgf)	FLUJO (mm)	RELACIÓN ESTABILIDAD FLUJO
4,5	1	61,3	913,7	1,065	973,0	1,90	512
	2		813,7		866,6	1,85	468
	3		783,1		834,0	1,60	521
	4		794,5		846,2	1,74	486
	PROMEDIO					880,0	1,77
5	5	60,5	1319,5	1,087	1434,3	2,21	649
	6		1447,0		1572,8	2,17	725
	7		1155,3		1255,8	2,15	584
	8		1295,4		1408,1	2,12	664
	PROMEDIO					1417,8	2,16
5,5	9	60,5	1163,4	1,087	1264,6	2,10	602
	10		1228,8		1335,7	2,08	642
	11		1140,9		1240,2	2,11	588
	12		1155,6		1256,2	2,10	598
	PROMEDIO					1274,2	2,10
6	13	60,5	975,9	1,087	1060,8	2,22	478
	14		1127,8		1052,8	2,10	501
	15		1238,4		1346,1	2,05	657
	16		1334,0		1450,1	2,40	604
	PROMEDIO					1227,4	2,19
6.5	17	60,5	944,7	1,087	1026,9	3,24	317
	18		974,1		1058,8	3,30	321
	19		967,5		1051,7	3,33	316
	20		995,1		1081,7	3,23	335
	PROMEDIO					1054,8	3,28
7	21	60,5	893,4	1,087	971,1	3,43	283
	22		895,5		973,4	3,32	293
	23		900,2		978,5	3,56	275
	24		898,9		977,1	3,76	260
	PROMEDIO					975,0	3,52

Fuente: Autor

Con base en la medición realizada a las briquetas se promedió el espesor obtenido para los porcentajes de asfalto y la estabilidad y flujo presentado al ensayar las briquetas en el maquina Marshall se establecieron los valores promedios por

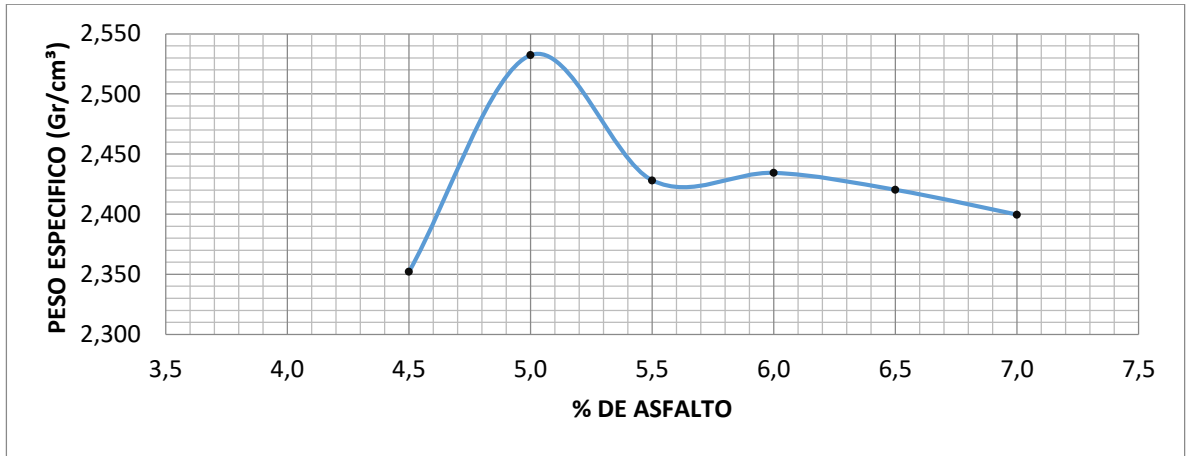
espesor de asfalto y la relación entre las variables de estabilidad y flujo (Tabla 27) para analizar el comportamiento por medio del análisis de propiedades volumétricas presentado a continuación. De esta parte se evidencia que el porcentaje de asfalto de 4,5% no cumple con los rangos de estabilidad, siendo motivo para descartarla al considerar que no cuenta con la capacidad de resistir las cargas de solicitud necesarias para un nivel de tránsito NT3 al ser de 880Kgf y la requerida por norma es de mínimo 900Kgf.

4.7.2 Propiedades volumétricas

El análisis de las propiedades volumétricas se realizó teniendo en cuenta los resultados presentados por cada uno de los porcentajes de reemplazo en relación con los rangos presentados por el INVIAS en su capítulo 4: Pavimentos asfálticos, en la sección 450 (Anexo 10). A partir de allí se toma como aspecto de análisis determinante los valores de estabilidad y flujo, incluyendo la relación existente entre los mismos.

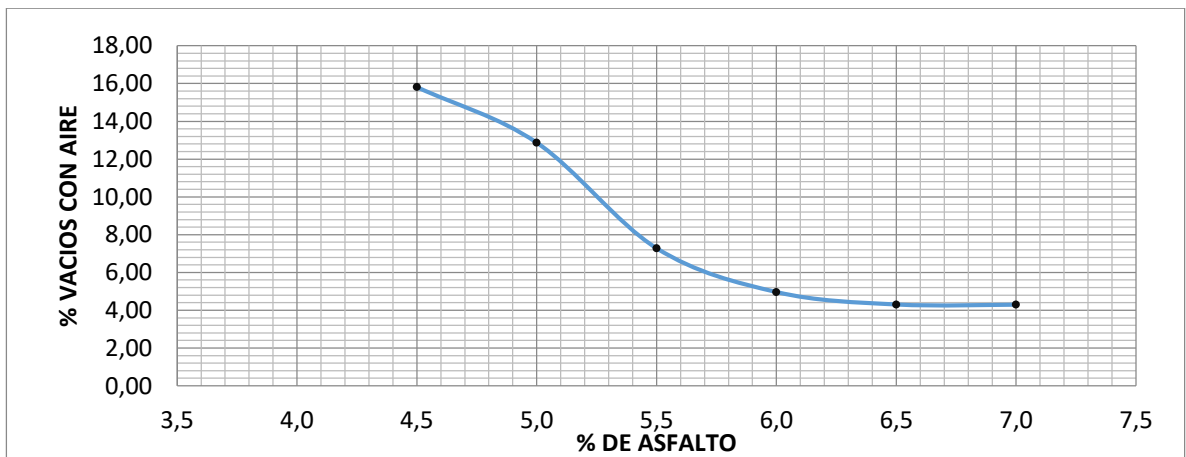
Como resultado del análisis al diseño Marshall, se denotan aspectos significativos como lo es la relación entre peso específico y el porcentaje de asfalto (Figura 12) los cuales presentaron valores de peso específico entre el $2,350\text{gr/cm}^3$ y $2,553\text{gr/cm}^3$. La relación entre el porcentaje de vacíos y el porcentaje de asfalto (Figura 13) permite evidenciar que al incrementar la cantidad de asfalto ocasiona una disminución en el porcentaje de vacíos contenido en la mezcla, debido a que al existir mayor disponibilidad de asfalto, este tiende a actuar llenando la mayor cantidad de vacíos que encuentra mientras que al mismo tiempo funciona como adherente entre los componentes de la briqueta. Del mismo modo, esto denota el aumento en el volumen lleno de asfalto es proporcional al aumento en el porcentaje de asfalto para cada grupo de briquetas (Figura15).

Figura 12. Peso específico vs. % asfalto - Diseño Marshall



Fuente: Autor

Figura 13. % vacíos con aire vs. % de asfalto - Diseño Marshall

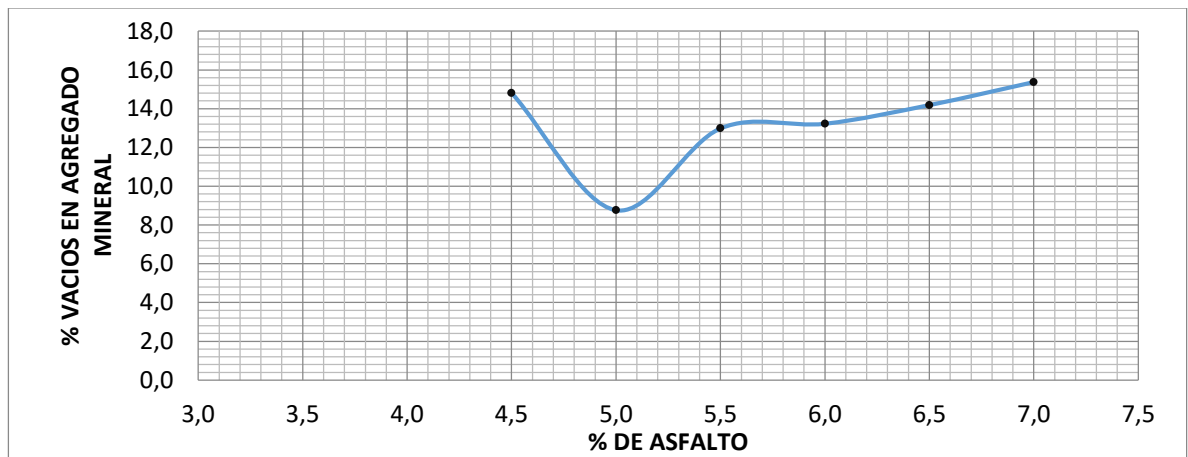


Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que los materiales de constitución de la mezcla asfáltica (arena y ENHAE) presentan grandes dimensiones en su tamaño, se evidencia que los porcentajes de vacíos en el agregado mineral se posicionan entre el 8% y el 15% presentando variaciones que no mantienen un comportamiento estable (Figura 14), considerando que antes de realizar la adición de la cantidad de agregado fino y grueso necesario para cada grupo de briquetas representativas de cada porcentaje

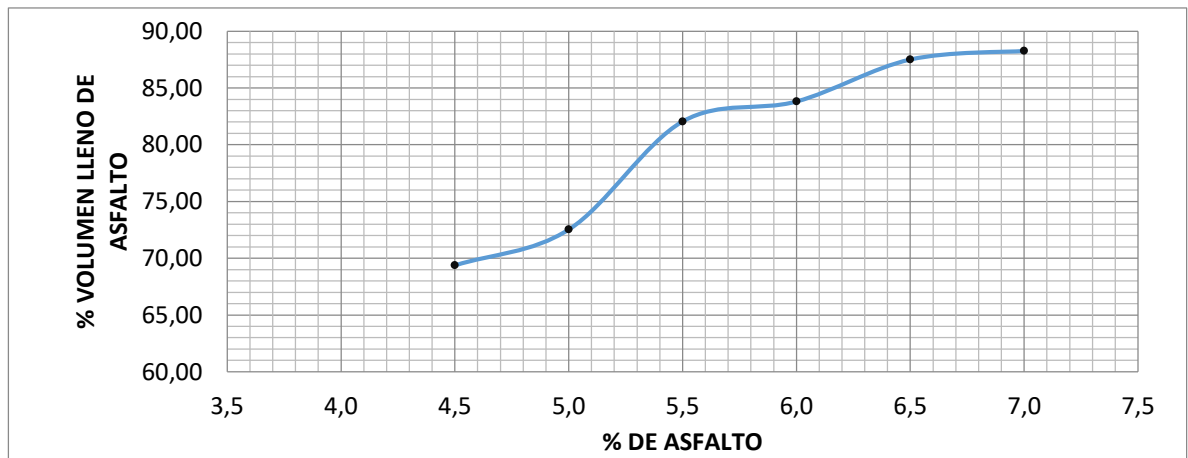
de asfalto, se realizó una mezcla del material retenido en cada uno de los tamices usados para la ENHAE y luego se hizo lo mismo para la arena, a fin de generar similitud con las condiciones de reales al pavimentar una vía.

Figura 14. % vacíos en agregado mineral vs. % de asfalto



Fuente: Autor

Figura 15. % de volumen lleno de asfalto vs. % de asfalto - Diseño Marshall

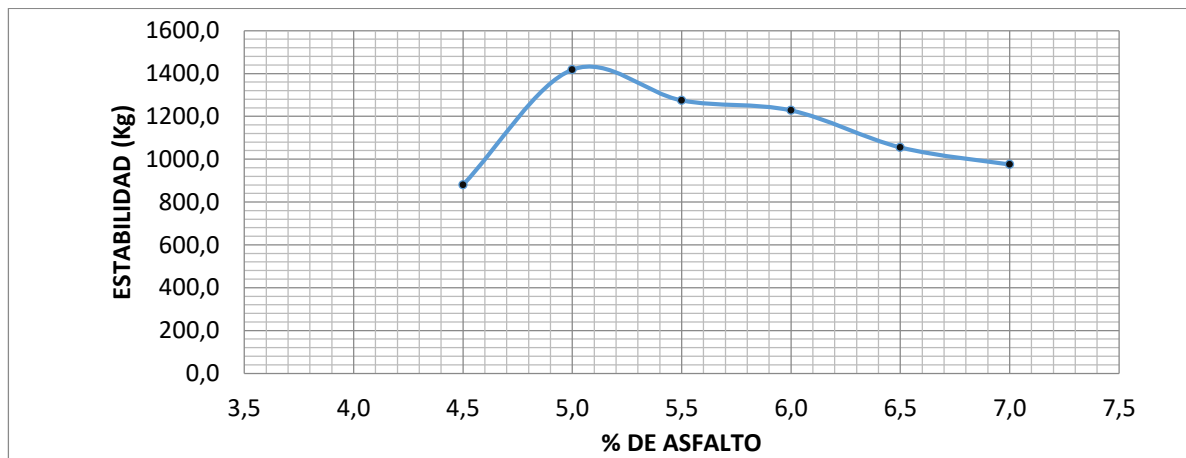


Fuente: Autor

La evaluación de la estabilidad y flujo para los rangos de porcentajes de asfalto presentó que los diseños de mezcla asfáltica con ENHAE como agregado grueso

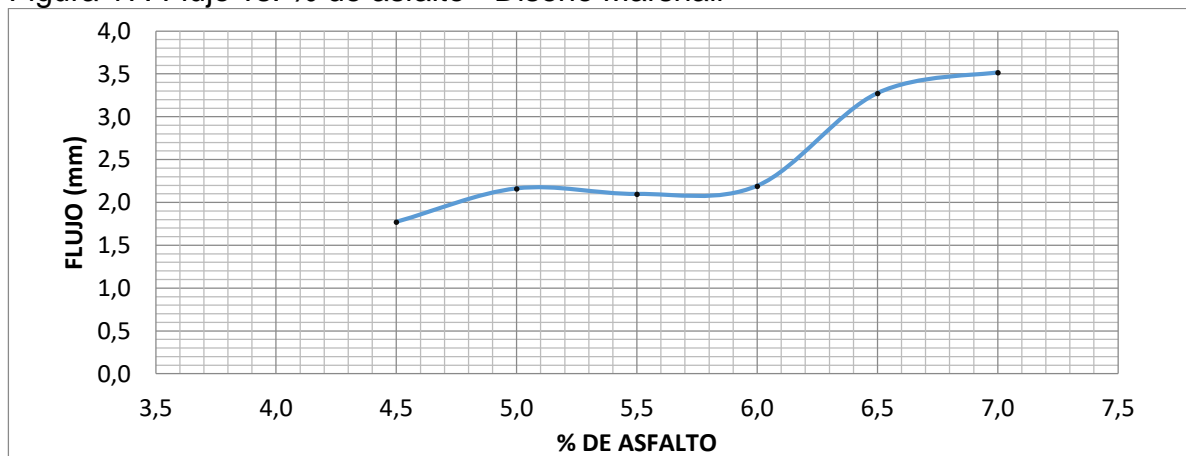
cumplen al presentar una estabilidad mayor a 900Kg de estabilidad en los porcentajes comprendidos entre el 5% y el 7% (Figura 16), mientras que el flujo cumplió en los porcentajes correspondientes al 5%, 5,5%, 6% y 6,5% (Figura 17) debido a que en presencia de un contenido de asfalto del 4,5% y 7% este parámetro de flujo supera el rango de 2,0mm – 3,5mm presentado por el INVIAS (Anexo 10).

Figura 16. Estabilidad vs. % de asfalto - Diseño Marshall



Fuente: Autor

Figura 17. Flujo vs. % de asfalto - Diseño Marshall



Fuente: Autor

Como resultado se evidenció que los porcentajes de asfalto adecuados para ser implementados como especificación para un diseño de mezcla asfáltica MDC-19 son el 6% y 6,5% de asfalto al encontrarse estos valores dentro de los rangos establecidos para un nivel de tránsito NT3 (Tabla 26). De igual manera se tiene en cuenta que presentó bajo contenido de vacíos de aire, debido a que las escorias negras tienen una gran cantidad de poros que absorben con rapidez el asfalto, las cuales al estar llenas dejan libre el asfalto sobrante para que funcionen como adherente y/o aglomerante de los materiales que contienen la mezcla asfáltica, al presentarse esto se denota que dejan la muestra con muy bajo contenido de vacíos, generando consigo mayor requerimiento de asfalto para cumplir con su capacidad de resistencia ante la carga generadas por la circulación de vehículos en la vía al contener la capa de rodadura un espesor de 61mm (6,1cm).

Tabla 26. Consolidación final de resultados de diseño de mezcla

INDICADOR	RESULTADOS PARA LOS PORCENTAJES DE ASFALTO						RANGO NORMA
	4,50%	5%	5,50%	6%	6,50%	7%	
Compactación	75	75	75	75	75	75	75 Golpes por cada cara
Estabilidad (Kgf)	880,0	1417,8	1417,8	1227,4	1054,8	975,0	Mínimo 900
Flujo (mm)	1,77	2,16	2,10	2,19	3,28	3,52	2,0 - 3,5
Relación estabilidad / flujo (Kg/mm)	496	656	607	560	322	278	300 - 600
Vacíos con aire (%)	15,82	12,88	7,29	4,97	4,31	4,30	Para capa de rodadura: 4,0 - 6,0
Vacíos en agregado mineral (%)	14,81	14,59	12,98	13,22	14,18	15,37	Para T máx 25mm: 14
Vacíos llenos de asfalto (%)	69,37	72,53	83,05	83,81	87,51	88,26	65 - 75
CUMPLIMIENTO PARA NT3	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	NO CUMPLE	
Espesor final capa de rodadura	61mm						
OBSERVACIÓN	El diseño cumple, se debe tener en cuenta seleccionar escorias con uniformidad en el contenido de poros, considerando que las usadas se encontraban de manera variada. Se evidenció gran absorción del asfalto por parte de las ENHAE.						

Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES

La unificación de los componentes presentados para la mezcla asfáltica MDC-19 con requerimientos de nivel de tránsito NT3, presenta un adecuado comportamiento de estabilidad y flujo para para los porcentajes de asfalto de 6% y 6,5% y un contenido total de ENHAE como agregado grueso.

La capacidad presentada por la ENHAE como reemplazo del agregado grueso es adecuada al brindar resistencia mecánica debido a su geometría y estructura de acuerdo a su composición a base de metales contribuye a que se presente mayores aportes de resistencia frente a acciones de carga sin generar disgregación, desprendimiento o rotura en sus partículas en relación con la grava, contribuyendo a mejorar la capacidad de resistencia de la capa de rodadura.

La ENHAE presenta alto contenido de macroporos, lo que conlleva a que absorba con mayor facilidad el asfalto y requiera altos contenidos de asfalto en los diseños para subsanar esta relación, de igual manera, hace que el proceso de homogenización tarde un poco más mientras esta retiene el asfalto necesario para llenar sus poros y dejar fluir el restante.

La inclusión de ENHAE como agregado grueso en la mezcla asfáltica contribuye a mejorar las propiedades de estabilidad, al cumplir la gran mayoría con los parámetros del INVIAS y denotando consigo que al incrementar el contenido de asfalto genera disminución en la misma, pero posicionándose en 1227,4Kgf para el 6,0% y en 1054,8KGf para el 6,5% indicando que tiene capacidad de resistir las deformaciones.

El contenido de ENHAE dentro de la mezcla asfáltica contribuye a no sobrepasar las deformaciones límites de norma en los porcentajes de asfalto correspondientes

al 5,0% hasta el 7,0%, brindando un adecuado comportamiento permitiendo que se deforme el pavimento flexible en su capa de rodadura sin generar aparición de fisuras, grietas o ahuellamiento en la capa de rodadura.

6. RECOMENDACIONES

Para el planteamiento de un diseño de mezcla con contenido total de ENHAE que difiera en el nivel de tránsito al incluido en el diseño realizado en la investigación, se debe tener en cuenta la inclusión de análisis a las partículas y los porcentajes granulométricos adecuados para el mismo, ya que puede llegar a presentar variaciones en los resultados.

Para obtener un análisis con más amplitud, se debe considerar realizar un análisis de petrografía por medio de microscopía, a fin de evaluar sus componentes mineralógicos y su composición química, para determinar la influencia de los mismos en el diseño de mezcla asfáltica.

Evaluar las posibles variaciones que se puedan llegar a presentarse en los diseños al modificar las consideraciones respecto al tamaño de la ENHAE escogida con base en la fórmula de trabajo concerniente al tipo de mezcla asfáltica.

Considerar estudiar y analizar las alteraciones generadas en el proceso de mezclado para la realización de briquetas al incluir las ENHAE.

Tener presente incorporar mecanismos que simulen una proximidad a las condiciones presentes en campo al momento de realizar la compactación de la mezcla asfáltica, con ensayos de fabricación de briquetas con compactador giratorio.

Para cualquier diseño de mezcla asfáltica incluir ensayos a todos los tipos de agregados que la incorporen a fin de tener una mayor certeza de la influencia las mismas como variables de estudio.

BIBLIOGRAFIA

- ABITANTE, A.L.R., 2014. Abrasión en Baldosas Cerámicas Esmaltadas : Consideraciones sobre la vida útil y Evaluación de su Desempeño. , no. June, pp. 71–79.
- ALDUNDIA, B.F., LANAK, S.H. y BIZKAIA, D.F. DE, 1998. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TECNICAS PARTICULARES. . S.I.:
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS, [sin fecha]. Glosario AASHTO. , pp. 122–125.
- GUILL, C., [sin fecha]. la petrografía: Resumen y guía para antropólogos. , pp. 147–151.
- INVIAS, 2013a. Sección 100 - Suelos. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, vol. 100, no. E-172, pp. 185–206.
- INVIAS, 2013b. Sección 200. Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras, pp. 342.
- INVIAS, 2013c. Secciones 700 y 800 II. Invias, pp. 1–626.
- INVÍAS, 2007. Ámbito De Aplicación, Términos Y Definiciones. [en línea], pp. 5. Disponible en: <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq>.
- MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y COMUNICACIONES, 2001. Normas para

Materiales y Ensayos de Materiales. Manual de Carreteras del Paraguay, pp. 780.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DEL PERÚ, 2008. Proyecto “ Glosario de Términos de Uso Frecuente en Proyectos de Infraestructura Vial ”. ,

PINTO, M.E., N, V.M., CHIRIVI, E. y GARC, D., 2011. INDUSTRIA SIDERÚRGICA Y MERCADO DEL ACERO : caracterización y perspectivas. , no. 20, pp. 1–9.

Pruebas de desempeño para mezclas asfáltica. Capítulo 4 [en línea], [sin fecha]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo4.pdf.

RICO, A., 2005. Tesis sobre las generalidades y definiciones de los pavimentos. 2005. S.I.: s.n.

SABOGAL, F.S., [sin fecha]. Revestimientos bituminosos. ,

SILENE MINAYA GONZALEZ, M.I.A.O.H., 2001. Laboratorio No . 2 de Mecánica de Suelos y Pavimentos MANUAL DE LABORATORIO. , vol. 1, no. 2.

TINO RAMOS, R., 2007. Vías, carreteras y otras calzadas: Breve historia de las mismas. *Cimbra: Revista del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas*. No. 376, 24 p. ISSN 0210-0479.

SIZA, Héctor. ¿Cuántos autos hay en el mundo? [en línea]. Autocosmos. Chile (14 de Octubre de 2017), párr. 1-2. [Consultado: 24 de Marzo de 2018]. Disponible

en Internet <https://noticias.autocosmos.cl/2017/10/04/cuantos-autos-hay-en-el-mundo>.

Según el RUNT, Colombia inició el 2018 con 13.6 millones de automotores [en línea]. Zona Cero. Atlántico (09 de Enero de 2018), párr. 1. [Consultado: 24 de Marzo de 2018]. Disponible en Internet <http://zonacero.com/?q=generales/segun-el-runt-colombia-inicio-el-2018-con-136-millones-de-automotores-98405>.

ANDEMOS: Marzo 2018 Informe Sector Automotor Colombia [en línea]. Asociación Colombiana de Vehículos Automotores. Bogotá D.C. (02 de Abril de 2018). Disponible en Internet <http://www.andemos.org/index.php/2018/04/02/andemos-marzo-2018-informe-sector-automotor-colombia/>.

Ministerio de Fomento., Ministerio de medio ambiente rural y marino., Centro de estudio y experimentación de obras públicas., y CEDEX, 2011. Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. *Cedex*, vol. 2.3, pp. 1–19.

IHOBE. AND EUSKADI. LURRALDE ANTOLAMENDU, E. eta I.S., 1999. ESCORIAS DE ACERÍAS. *LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES*, pp. 131.

AMELIAN, S., MANIAN, M., ABTAHI, S.M. y GOLI, A., 2018. Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 176, pp. 329–337. ISSN 09596526.

GAO, J., SHA, A., WANG, Z., TONG, Z. y LIU, Z., 2017. Utilization of steel slag as

aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 152, pp. 429–442. ISSN 09596526.

VEGA-ZAMANILLO, A., CALZADA-PÉREZ, M.A., LASTRA-GONZÁLEZ, P., INDACOECHEA-VEGA, I. y FERNÁNDEZ ORTEGA, J.A., 2017. Analysis of the use of cupola furnace slags, green sand and reclaimed asphalt pavement in asphalt concrete mixtures for low intensity traffic. *Revista de la construcción* [en línea], vol. 16, no. 2, pp. 229–237. ISSN 0718915X.

ANSORENA, J., IZCO, F., MERINO, D. y TAMÉS, P., 2001. Valorización de escorias de acería en la construcción de pistas forestales (I). *sustrai.70*, pp. 52–56.

ROJAS, M.F., ROJAS, M.I.S.D.E. y URÍA, A., 2002. Estudio de la inestabilidad en escorias negras de horno de arco eléctrico. *Materiales de construcción*, vol. 52, no. 267, pp. 79–83. ISSN 04652746.

RUIZ, J., 2018. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA BAJO CARGA MONOTÓNICA Y LA RIGIDEZ BAJO CARGA CÍCLICA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA FABRICADA CON SUSTITUCIONES PARCIALES DE AGREGADO PÉTREO POR ESCORIA DE ALTO HORNO. S.I.: Universidad Santo Tomás.

QUITIAN, G. y ROJAS, N., 2013. Propiedades del concreto con sustitución de escoria de horno de cubilote como agregado fino y escoria granulada. *Revista Colombiana de materiales*, vol. 5, no. Cm, pp. 19–25. ISSN 18792456.

SERNA, A., 2012. Selección De Tecnologías Apropriadas Para El Aprovechamiento De La Escoria. , pp. 1–54.

PARRA, L.M. y SÁNCHEZ, D.P., 2010. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica DIACO. Municipio tuta Boyacá. *Universidad de la Salle*, pp 1-139.

INVIAS, 2013. Especificaciones generales de construcción de carreteras. [en línea], pp. 440.

IHOBE. AND EUSKADI. LURRALDE ANTOLAMENDU, E. eta I.S., 1999. ESCORIAS DE ACERÍAS. *LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES*, pp. 131.

Cerón, Duarte y Castillo, 1996. Citado por: INGEOMINAS. Manual Preliminar de Petrografía Aplicada al Estudio de Materiales Pétreos para Carreteras. Bogotá D.C. 2010. 145 p.

SÁNCHEZ, H., RELACIÓN, I.I., ESTADO, D.E.L. y ARTE, D.E.L., 2014. Arco Eléctrico Y Sus Aplicaciones En Pavimentos. V congreso de Ingeniería Civil, pp. 1–14.

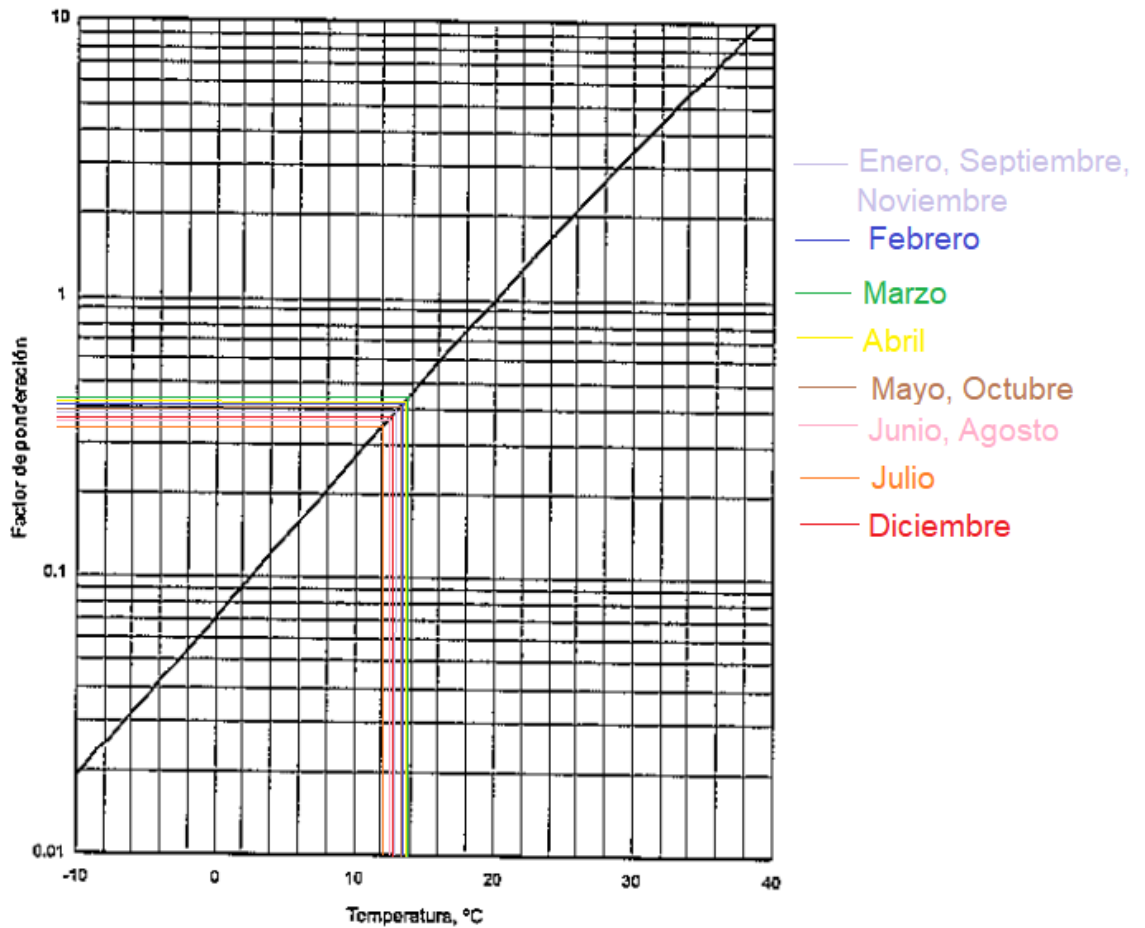
ANEXOS

Anexo 1. Valores medios mensuales de temperatura, estación UPTC-IDEAM

IDEAM (INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES)													
Valores Medios Mensuales de Temperatura (°C)										Sistema de Información Ambiental			
Fecha de Proceso: 2018/26/01					Departamento: Boyacá					Fecha de Instalación: 1962 - Febrero			
Entidad: 01 IDEAM					Municipio: Tunja					Fecha de Suspensión:			
Regional: 06 Boyacá - Casanare					Corriente: Chulo					Estación: 24035130 - UPTC			
Latitud: 0533 N					Longitud: 7321W					Elevación: 2690m.s.n.m			
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MEDIOS	13,1	13,5	13,8	13,7	13,4	12,6	12,2	12,6	13,1	13,4	13,1	13	12,1
MAXIMOS	15	15	15,8	15,3	14,4	13,4	13,1	13,7	13,9	14,2	14,3	15,8	13,1
MINIMOS	12,2	12,5	12,8	12,8	12,6	11,7	11,3	11,9	12,3	12,4	12,1	11,1	11,1

Fuente: Autor

Anexo 2. Factor de ponderación estación UPTC-INVIAS



Fuente: INVIAS, Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Autor

Anexo 3. Tmpa estación UPTC

MES	TMM (°C)	FACTOR DE PONDERACIÓN
Enero	13,1	0,39
Febrero	13,5	0,42
Marzo	13,8	0,45
Abril	13,7	0,43
Mayo	13,4	0,41
Junio	12,6	0,37
Julio	12,2	0,35
Agosto	12,6	0,37

Septiembre	13,1	0,39
Octubre	13,4	0,41
Noviembre	13,1	0,39
Diciembre	13	0,38
<i>Factor de ponderación total</i>		4,76
<i>Promedio del factor de ponderación</i>		0,4
TMPA (°C)		13,13

Fuente: Autor

Anexo 4. Información de TPDs estación N°1 Tunja-Ventaquemada

CÁLCULO DE NDIS PARA ESTACIÓN N°71 SECTOR TUNJA-VENTAQUEMADA						
AÑO	TPDs	C-2P	C-2G	C-3-4	C-5	>C-5
2007	7958	36	30	22	8	4
2008	7090	28	34	20	9	9
2009	8301	25	34	32	3	6
2010	7651	20	34	32	12	2
2011	11473	36	30	22	8	4
2012	8899	28	32	23	15	2
2013	9417	20	34	32	12	2
2014	7369	27	29	21	13	10
2015	11145	28	34	20	9	9
2016	16942	36	30	22	8	4
2017	12731	27	29	21	13	10

Fuente: Autor

Anexo 5. Niveles de tránsito estimados por el INVIAS

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
NT3	$N_{80kN} > 5.0$

Fuente: Tabla 100-1 Niveles de tránsito, capítulo 1: Aspectos generales. INVIAS, 2013



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

Tunja, 14 de Marzo de 2018


Señores:
SIDENAL S.A.

Asunto: Solicitud de material "escorias negras de horno de arco eléctrico"

De manera atenta me permito comunicarme con ustedes a solicitar doscientos dos kilogramos (202Kg) de escoria negra de horno de arco eléctrico, proveniente de la ciudad de Sogamoso-Boyacá, para ser implementado en la ejecución del proyecto de grado denominado "IMPLEMENTACIÓN DE ESCORIAS NEGRAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO COMO AGREGADO GRUESO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA" realizado por la estudiante de ingeniería civil Angie Danniela Novoa Mendivelso y dirigido por el ingeniero Héctor Mauricio Sánchez Abril. El objeto de la investigación es establecer el comportamiento físico-mecánico de las escorias negras de horno de arco eléctrico como sustituto del agregado grueso dentro de la mezcla asfáltica, para lo cual el material deberá ser sometido a la siguiente serie de laboratorios:

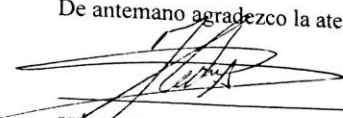
- Diseño por método Marshall.
- Petrografía básica.
- Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19mm (3/4") por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles.
- Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval.
- Determinación del valor del 10% de finos.
- Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de Sulfato de Sodio o de Magnesio.
- Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.
- Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras.
- Determinación del coeficiente de pulimiento acelerado (CPA) de los agregados gruesos.
- Ensayo de adherencia en bandejas.
- Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas.
- Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.
- Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas
- Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall sobre probetas de 152,4 milímetros (6 pulgadas) de diámetro.
- Resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas en caliente mediante el ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales.

Esos ensayos serán realizados en los laboratorio de la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja, de igual manera se deja constancia de que los análisis obtenidos por medio de los ensayos

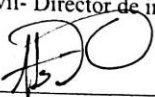
 **UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

realizados, serán enviados por medio electrónico a la empresa a fin de que tengan conocimiento de estos.

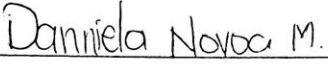
De antemano agradezco la atención prestada y espero pronta respuesta.



HECTOR MAURICIO SÁNCHEZ ABRIL
Ingeniero civil- Director de investigación



CARLOS ÁNDRES CARO CAMARGO
Decano Facultad de Ingeniería civil



ANGIE DANNIELA NOVOA MENDIVELSO
Estudiante de ingeniería civil- Décimo semestre

Fuente: Autor

Anexo 8. Tipo de asfalto por emplear en mezclas asfálticas en caliente de gradación continúa

TIPO DE CAPA	NT 1			NT 2			NT 3		
	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA REGIÓN (° C)								
	> 24	15-24	< 15	> 24	15-24	< 15	> 24	15-24	< 15
Rodadura e Intermedia	60-70	60-70 u 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100	40-50 60-70 o Tipo II (a o b) o Tipo III	40-50 60-70 o Tipo II (a o b)	60-70 80-100 o Tipo IIb
Base	NA			60-70 u 80-100	60-70 u 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100
Alto Módulo	NA			NA			Tipo V		

Nota 1: Para una temperatura menor de 15° C y tránsito NT3, los documentos del proyecto podrán recomendar un cemento asfáltico de grado de penetración 60-70, si se considera que el tránsito es extremadamente agresivo. Bajo una consideración similar se puede emplear el cemento asfáltico modificado con polímeros Tipo III para el mismo nivel de tránsito y temperaturas de 24° C o menores.

Fuente: Tabla 450-8 Tipo de asfalto, capítulo 4: Pavimentos asfálticos. INVIAS, 2013

Anexo 9. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continúa.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO		
		NT1	NT2	NT3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)				
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones	E-218	25/35/-	25/35/35	25 / 35 / 35
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones		5/7/-	5/7/7	5/7/7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238			
- Capa de: rodadura / intermedia / base			25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base	E-224			
- Valor en seco, mínimo (kN)				110/90/75
- Relación húmedo/seco, mínima (%)				75/75/75
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18
Limpieza, agregado grueso (F)				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5
Limpieza, gradación combinada (F)				
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%)				
- Una cara: rodadura / intermedia / base	E-227	75/60/-	75/75/60	85/75/60
- Dos caras: rodadura / intermedia / base		-/-/-	60/-/-	70/-/-
Geometría de las partículas, agregado fino (F)				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%)	E-239	40/35/-	45/40/35	45/40/35
- Capa de: rodadura / intermedia / base				
Adhesividad (O)				

Fuente: INVIAS, 2013

Anexo 10. Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall

CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)		5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000	
Flujo(mm) (Nota 2)		2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0	
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)		2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-	
Vacíos con aire (Va), % (Nota 3)	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0	NA
	Intermedia	o	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0
	Base	E-799	NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13.0			-
	T. Máx. 25 mm		14.0			14.0
	T. Máx. 19 mm		15.0			-
	T. Máx. 10 mm		16.0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75	
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso	E-799	0.8 a 1.2			1.2 a 1.4	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico				
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey	-	Reportar				
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo µm	E-741	7.5				

Vota 1: Se deberá usar la norma de ensayo ENV E-800 en lugar de la INV E-748 cuando los agregados tengan un tamaño máximo superior a 25mm (1"). Los valores entre paréntesis corresponden a ensayos efectuados de acuerdo con la norma INV E-800.

Fuente: INVIAS, 2013

Anexo 11. Partículas de ENHAE para análisis macroscópico - Parte 1



Fuente: Autor

Anexo 12. Partículas de ENHAE para análisis macroscópico - Parte 2



Fuente: Autor

Anexo 13. Partículas de ENHAE para análisis macroscópico - Parte 3



Fuente: Autor

Anexo 14. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 1



Fuente: Autor

Anexo 15. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 2



Fuente: Autor

Anexo 16. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 3



Fuente: Autor

Anexo 17. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 4



Fuente: Autor

Anexo 18. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia parte 5



Fuente: Autor

Anexo 19. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia, prueba de raya con navaja



Fuente: Autor

Anexo 20. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia, escoria después de prueba con martillo en roca sin macroporosidad



Fuente: Autor

Anexo 21. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia, escoria después de prueba con martillo en roca con macroporosidad parte 1



Fuente: Autor

Anexo 22. Partícula de escoria para análisis macroscópico – Resistencia, escoria después de prueba con martillo en roca con macroporosidad parte 2



Fuente: Autor

Anexo 23. Resistencia a partir de índices de campo

	Descripción	Identificación de campo	≈ Resistencia a la compresión (MPa)
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 – 1,0
R1	Roca muy blanda	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente.	1,0 – 5,0
R2	Roca blanda	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.	5,0 – 25
R3	Roca moderadamente dura	Con un golpe fuerte del martillo puede fracturarse. Con la navaja no puede tallarse.	25 – 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla.	50 – 100
R5	Roca muy dura	Se requiere muchos golpes del martillo para fracturarla.	100 – 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

Fuente: González de Vallejo, 2002

Anexo 24. Prueba de aplanamiento de la ENHAE



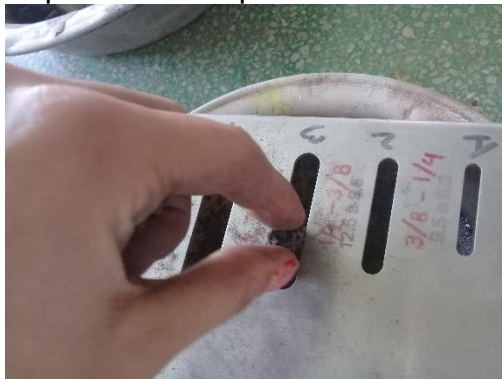
Fuente: Autor

Anexo 25. Partícula correspondiente a aplanamiento entre 1" - 1 1/2"



Fuente: Autor

Anexo 26. Partícula correspondiente a aplanamiento entre 1/4" - 1/2"



Fuente: Autor

Anexo 27. Aplanamiento de escorias negras 1 1/2" - 1"



Fuente: Autor

Anexo 28. Aplanamiento de escorias negras 1" - 3/4"



Fuente: Autor

Anexo 29. Aplanamiento de escorias negras 3/4" - 1/2"



Fuente: Autor

Anexo 30. Aplanamiento de escorias negras 1/2" - 3/8"



Fuente: Autor

Anexo 31. Aplanamiento de escorias negras 3/8" - 1/4"



Fuente: Autor

Anexo 32. Aplanamiento de escorias negras 2" - 1 1/2"



Fuente: Autor

Anexo 33. Alargamiento en ENHAE



Fuente: Autor

Anexo 34. Alargamiento en ENHAE 1/2" - 3/4"



Fuente: Autor

Anexo 35. Alargamiento en ENHAE 3/8" - 1/2"



Fuente: Autor

Anexo 36. Alargamiento en ENHAE 1/2" - 3/4"



Fuente: Autor

Anexo 37. Alargamiento en ENHAE 3/4" - 1"



Fuente: Autor

Anexo 38. Alargamiento en ENHAE 1" - 1 1/2"



Fuente: Autor

Anexo 39. Partículas de ENHAE utilizada para ensayo en máquina de los ángeles



Fuente: Autor

Anexo 40. Material resultante del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles a ENHAE con 500 revoluciones



Fuente: Autor

Anexo 41. Material resultante del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles a ENHAE con 500 revoluciones retenido en el tamiz N°12



Fuente: Autor

Anexo 42. Material resultante del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles a ENHAE con 500 revoluciones que pasa tamiz N°12



Fuente: Autor

Tabla 27. Material resultante del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles a ENHAE con 100 revoluciones



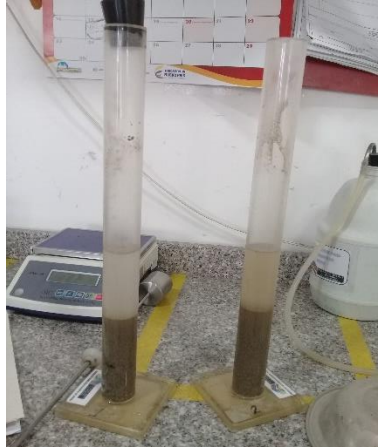
Fuente: Autor

Anexo 43. Material utilizado para ensayo de caras fracturadas



Fuente: Autor

Anexo 44. Ensayo de equivalente de arena



Fuente: Autor

Anexo 45. Arena de trituración para ensayo de angularidad en finos



Fuente: Autor

Anexo 46. ENHAE requerida para briquetas



Fuente: Autor

Anexo 47. Asfalto para briquetas



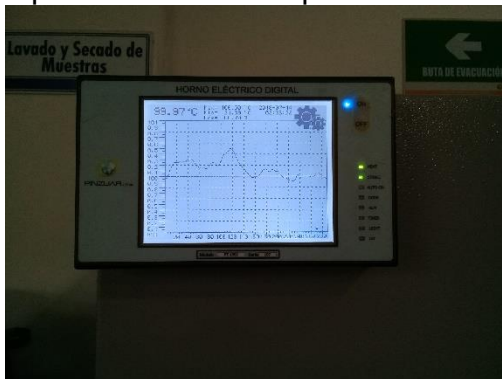
Fuente: Autor

Anexo 48. Asfalto en el horno para mantener su temperatura



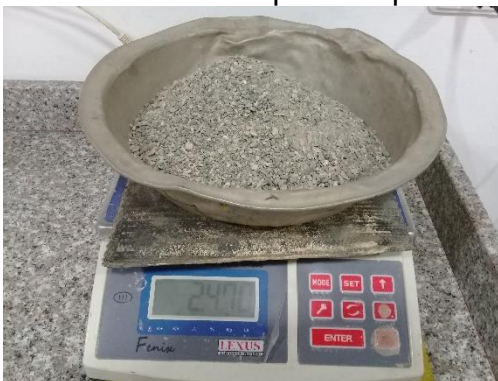
Fuente: Autor

Anexo 49. Control de temperatura del horno para el asfalto



Fuente: Autor

Anexo 50. Muestra de arena de trituración para briquetas



Fuente: Autor

Anexo 51. Mezcla de arena y escoria para briqueta



Fuente: Autor

Anexo 52. Adición de asfalto a mezcla de escoria y arena para briquetas



Fuente: Autor

Anexo 53. Proceso de unificación de asfalto con agregados-Parte 1



Fuente: Autor

Anexo 54. Proceso de unificación de asfalto con agregados-Parte 2



Fuente: Autor

Anexo 55. Proceso de unificación de asfalto con agregados-Parte 3



Fuente: Autor

Anexo 56. Medición de temperatura al inicio del proceso de mezclado



Fuente: Autor

Anexo 57. Medición de temperatura de la mezcla en el molde (mordaza)



Fuente: Autor

Anexo 58. Briquetas ensayadas-Parte 1



Fuente: Autor

Anexo 59. Briquetas ensayadas-Parte 2



Fuente: Autor

Anexo 60. Briquetas ensayadas-Parte 3



Fuente: Autor

Anexo 61. Briquetas ensayadas-Parte 4



Fuente: Autor

Anexo 62. Briquetas sumergidas en agua



Fuente: Autor

Anexo 63. Toma de peso SSS a briquetas



Fuente: Autor

Anexo 64. Control de temperatura baño maría



Fuente: Autor

Anexo 65. Muestra en baño maría



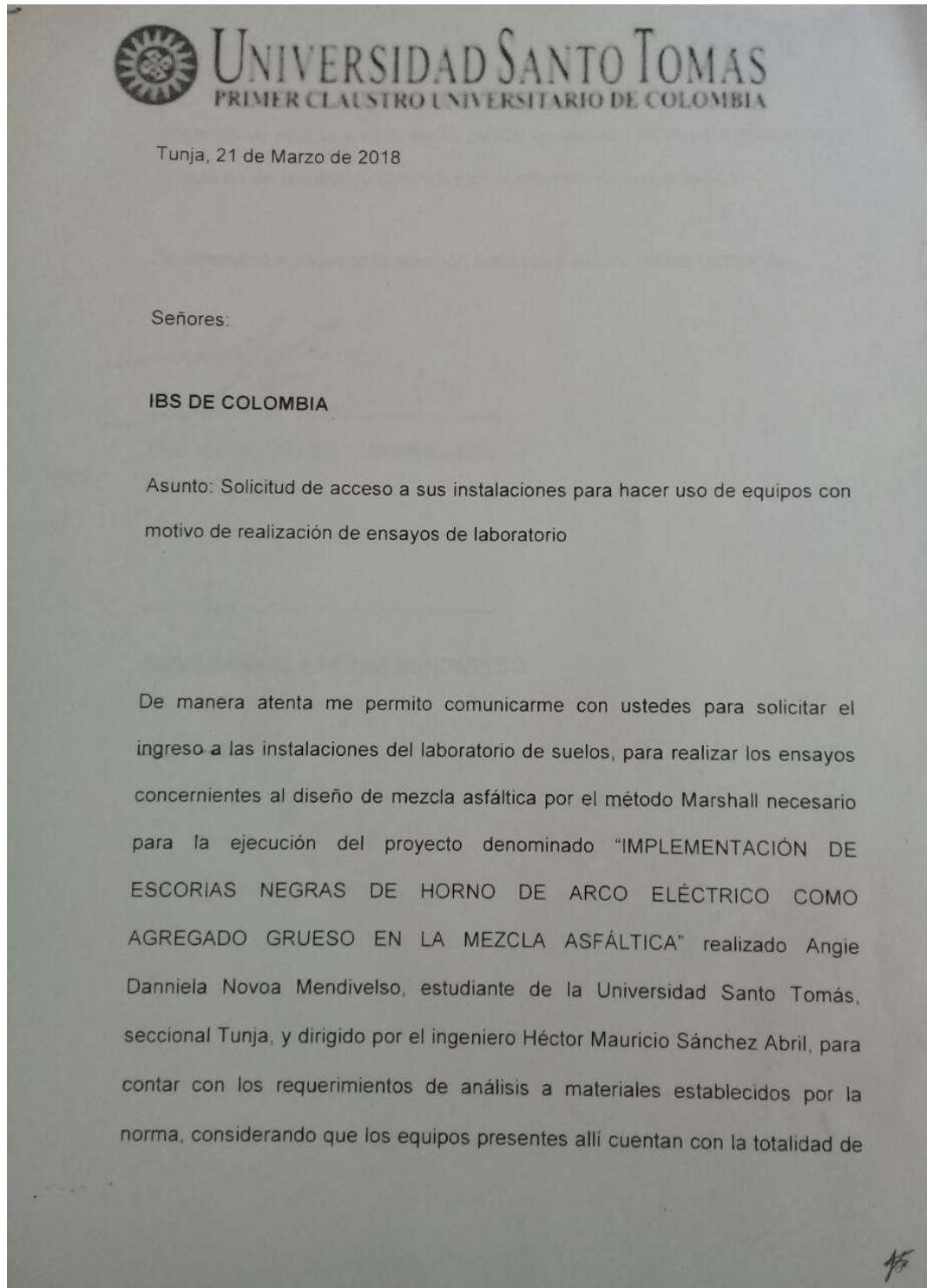
Fuente: Autor

Anexo 66. Ensayo de estabilidad y flujo para briquetas



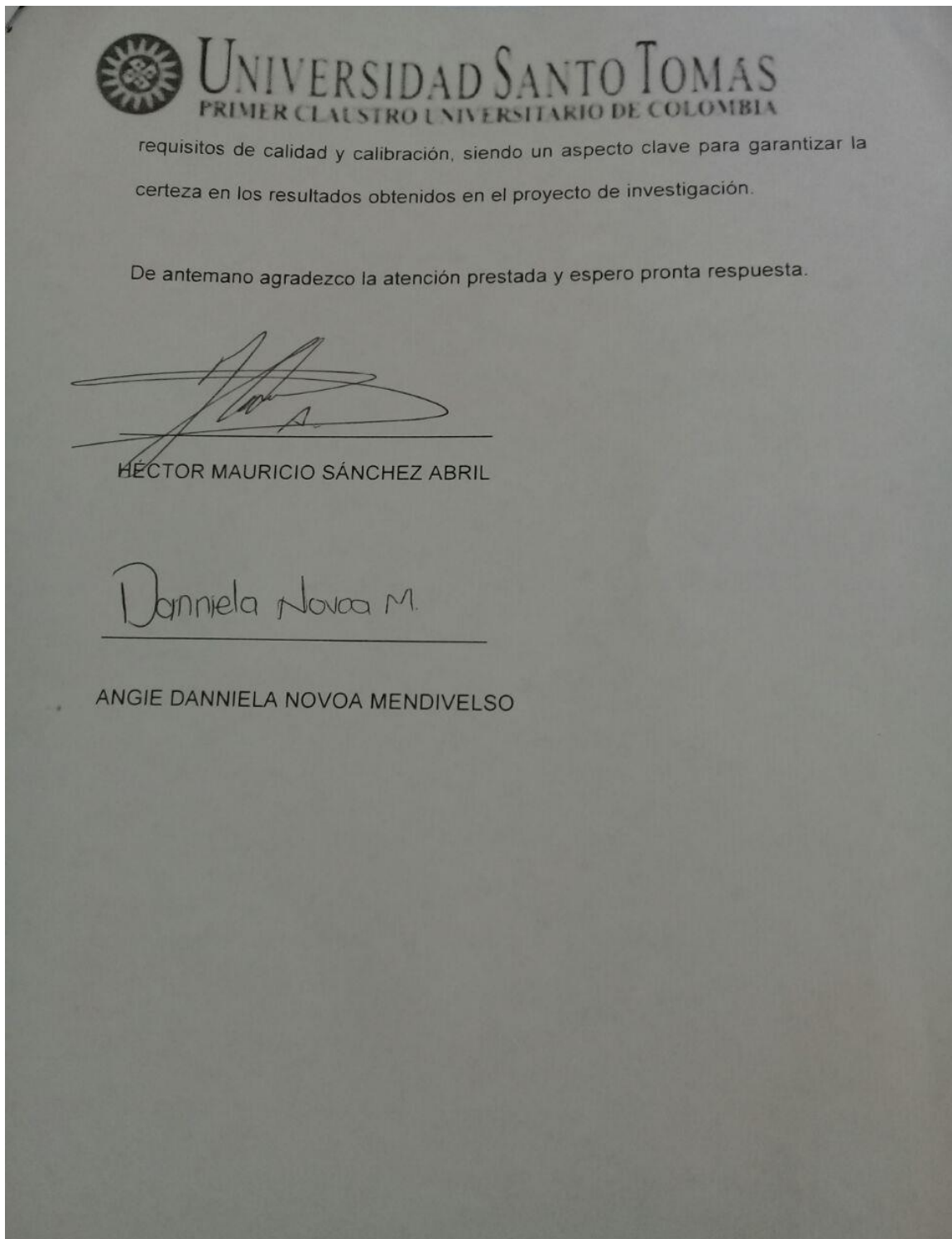
Fuente: Autor

Anexo 67. Carta de solicitud de acceso a instalaciones para hacer uso de equipos con motivo de realización de ensayos de laboratorio-Parte 1



Fuente: Autor

Anexo 68. Carta de solicitud de acceso a instalaciones para hacer uso de equipos con motivo de realización de ensayos de laboratorio-Parte 2



Fuente: Autor