



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS TIPO MDC-19 MODIFICADAS CON GRANO DE
CAUCHO RECICLADO Y ESCORIA NEGRA DE HORNO DE ARCO
ELÉCTRICO**

Mayra Fernanda Guerra Vargas¹
Lizeth Viviana Peña Ibáñez²

Universidad Santo Tomás de Aquino
División de Ingenierías y Arquitectura
Facultad de Ingeniería Civil
Tunja, Boyacá
2021

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS TIPO MDC-19 MODIFICADAS CON GRANO DE
CAUCHO RECICLADO Y ESCORIA NEGRA DE HORNO DE ARCO
ELÉCTRICO**

**Mayra Fernanda Guerra Vargas¹
Lizeth Viviana Peña Ibáñez²**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera civil

Director:
MSc., Héctor Mauricio Sánchez Abril

Universidad Santo Tomás de Aquino
División de Ingenierías y Arquitectura
Facultad de Ingeniería Civil
Tunja, Boyacá
2021

Dedicatoria

A mi madre María del Carmen, pilar fundamental en mi vida, a mi padre Mario Felipe, consejero de vida. A mis hermanos Dayis, Leo, Isa, Alejo y Meli por ser motivación y ejemplo para mi vida. Para ustedes con amor

Mayra Fernanda Guerra Vargas

A mis padres Nixon y Yein, mis hermanas Eliana, Vanesa y Fernanda, por su apoyo incondicional durante todo este proceso.

Lizeth Viviana Peña Ibáñez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le agradecemos a Dios por darnos salud para permitirnos culminar con nuestras actividades académicas y esta investigación en tiempos de pandemia.

A nuestra querida *alma mater* la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, a su cuerpo de docentes por los conocimientos brindados en esta etapa tan importante de nuestras vidas, a sus administrativos por su buen trato, a la División de Ingenierías y Arquitectura, a la Facultad de Ingeniería Civil, de manera especial al ingeniero Héctor Mauricio Sánchez Abril por su dirección y compromiso con este proyecto, a la ingeniera Sandra Elodia Ospina Lozano por su asesoría y a los laboratoristas John Fredy Hernández y Fabian Castillo por su ayuda oportuna para la elaboración práctica de esta investigación.

Finalmente, agradecemos a las empresas que hicieron parte de los suministros de los materiales implementados en esta investigación: Gerdau Diaco-Planta Tuta, Tecniafaltos Tunja y Reembarsa reencauchadora Barbosa S.A.S.

Nota de aceptación



Firma de director

Firma de jurado

Firma de jurado

Tunja (20 de septiembre de 2021)

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	16
1.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	16
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.4. OBJETIVOS	17
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	17
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	17
2. ESTADO DEL ARTE	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1. MATERIALES	27
3.1.1. <i>Agregados pétreos</i>	27
3.1.2. <i>Llenante mineral o filler</i>	27
3.1.3. <i>Material bituminoso</i>	28
3.1.4. <i>Agregados siderúrgicos</i>	28
3.1.5. <i>Grano de caucho reciclado</i>	29
3.2. METODOLOGÍA.....	30
3.2.1. <i>Fase 1: Caracterización de los materiales implementados</i>	32
3.2.2. <i>Fase 2: Diseño de mezcla convencional</i>	40
3.2.3. <i>Fase 3: Diseño de mezcla asfáltica modificada</i>	45
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	49
4.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS GRUESO Y FINO (MATERIALES CONVENCIONALES)	49
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO MODIFICANTE.....	52
4.3. CARACTERIZACIÓN DEL LLENANTE MINERAL O FILLER	55
4.4. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO	56
4.5. DISEÑO DE CURVA GRANULOMÉTRICA Y PORCENTAJE DE ASFALTO TEÓRICO DE LA MEZCLA CONVENCIONAL	56
4.5.1. <i>Estabilización granulométrica</i>	56
4.5.2. <i>Contenido óptimo de asfalto</i>	57
4.6. DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL METODOLOGÍA MARSHALL ..	57
4.7. DISEÑO DE MEZCLA MODIFICADA CON ESCORIA METODOLOGÍA MARSHALL	61
4.7.1. <i>Mezcla modificada con 25% de EAF</i>	61

4.7.2. Mezcla modificada con 50% de EAF	64
4.7.3. Mezcla modificada con 75% de EAF	67
4.7.4. Mezcla modificada con 100% de EAF	71
4.8. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON 10% DE GCR	74
4.9. DISEÑO DE MEZCLA MODIFICADA CON ESCORIA NEGRA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO Y GRANO DE CAUCHO RECICLADO METODOLOGÍA MARSHALL	75
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
CONCLUSIONES.....	80
RECOMENDACIONES.....	81
GLOSARIO.....	82
BIBLIOGRAFÍA	84
APÉNDICES Y ANEXOS	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.....	19
Tabla 2. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.....	21
Tabla 3. Especificaciones del cemento asfáltico INVIAS	23
Tabla 4. Especificaciones del cemento asfáltico IDU	23
Tabla 5. Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado INVIAS	25
Tabla 6. Especificación de asfaltos modificados con GCR IDU	26
Tabla 7. Número de briquetas mezcla convencional.....	41
Tabla 8. Número de briquetas de mezcla modificada con EAF.....	46
Tabla 9. Intervalo de valores característicos recomendados para modificar el ligante con GCR.....	47
Tabla 10. Número de briquetas de mezcla asfáltica modificada con EAF y GCR.....	47
Tabla 11. Verificación del ensayo agregado grueso INV E 218-13	49
Tabla 12. Verificación del ensayo agregado grueso INV E 238-13	49
Tabla 13. Verificación del ensayo agregado grueso INV E 227-13	50
Tabla 14. Verificación del ensayo agregado fino INV E 133-13	50
Tabla 15. Verificación de ensayo agregado modificante INV E 218-3	52
Tabla 16. Verificación de ensayo agregado modificante INV E 238-13	53
Tabla 17. Verificación de ensayo agregado modificante INV E 227-13	53
Tabla 18. Composición química de la EAF	54
Tabla 19. Verificación de ensayo INV E 225-13	55
Tabla 20. Verificación de granulometría del llenante mineral	55
Tabla 21. Verificación de los requisitos establecidos en el Art. 410 del INVIAS	56
Tabla 22. Diseño de mezcla	56
Tabla 23. Resultados de la mezcla convencional metodología Marshall	58
Tabla 24. Resultados obtenidos de la mezcla modificada con 25% EAF metodología Marshall	61
Tabla 25. Resultados obtenidos de la mezcla modificada con 50% de EAF metodología Marshall	64
Tabla 26. Resultados obtenidos de la mezcla modificada con 75% de EAF metodología Marshall	67
Tabla 27. Resultados obtenidos de la mezcla modificada con 100% de EAF metodología Marshall	71
Tabla 28. Verificación de propiedades del cemento asfáltico modificado con 10% de GCR	74

Tabla 29. Ensayos de verificación de asfalto modificado con GCR	75
Tabla 30. Resultados obtenidos de la modificación con EAF y GCR metodología Marshall	75

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva granulométrica de la grava	51
Gráfica 2. Curva granulométrica de la arenilla	51
Gráfica 3. Curva granulométrica de la arena	52
Gráfica 4. Curva granulométrica de la EAF	54
Gráfica 5. Curva granulométrica de la mezcla diseñada	57
Gráfica 6. Densidad de la mezcla convencional	58
Gráfica 7. Estabilidad de la mezcla convencional	59
Gráfica 8. Flujo de la mezcla convencional	60
Gráfica 9. Relación estabilidad/flujo de la mezcla convencional	60
Gráfica 10. Densidad de la mezcla modificada con 25% de EAF.....	62
Gráfica 11. Estabilidad de la mezcla modificada con 25% de EAF	62
Gráfica 12. Flujo de la mezcla modificada con 25% de EAF.....	63
Gráfica 13. Relación estabilidad/flujo de la mezcla modificada con 25% de EAF	64
Gráfica 14. Densidad de la mezcla modificada con 50% de EAF.....	65
Gráfica 15. Estabilidad de la mezcla modificada con 50% de EAF	66
Gráfica 16. Flujo de la mezcla modificada con 50% de EAF.....	66
Gráfica 17. Relación estabilidad/flujo de la mezcla modificada con 50% de EAF	67
Gráfica 18. Densidad de la mezcla modificada con 75% de EAF.....	68
Gráfica 19. Estabilidad de la mezcla modificada con 75% de EAF	69
Gráfica 20. Flujo de la mezcla modificada con 75% de EAF.....	70
Gráfica 21. Relación estabilidad/flujo de la mezcla modificada con 75% de EAF	70
Gráfica 22. Densidad de la mezcla modificada con 100% de EAF.....	72
Gráfica 23. Estabilidad de la mezcla modificada con 100% de EAF	72
Gráfica 24. Flujo de la mezcla modificada con 100% de EAF.....	73
Gráfica 25. Relación estabilidad/flujo de la mezcla modificada con 100% de EAF	74
Gráfica 26. Densidad de la mezcla modificada con 75% de EAF y 10% GCR	76
Gráfica 27. Estabilidad de la mezcla asfáltica modificada con 75% de EAF y 10 % de GCR	77
Gráfica 28. Flujo de la mezcla modificada con 75% de EAF y 10% de GCR	78
Gráfica 29. Relación de estabilidad/flujo de la mezcla asfáltica modificada con 75% de EAF y 10% de GCR.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de agregados pétreos	27
Figura 2. Cemento hidráulico.....	28
Figura 3. Cemento asfáltico 60-70.....	28
Figura 4. Escoria negra de horno de arco eléctrico.....	29
Figura 5. Grano de caucho reciclado	30
Figura 6. Esquema metodológico	31
Figura 7. Torre de tamices	32
Figura 8. Tamizaje de muestra en la malla No.12	33
Figura 9. Tambor rotatorio	33
Figura 10. Muestra saturada con carga abrasiva	34
Figura 11. Ensayo de partículas planas.....	35
Figura 12. Ensayo de partículas alargadas.....	35
Figura 13. Inspección visual de caras fracturadas del agregado grueso	36
Figura 14. Torre de tamices para granulometría del filler.....	36
Figura 15. Probetas de 50 ml y llenante mineral	37
Figura 16. Masa del llenante mineral para su densidad bulk	37
Figura 17. Equipo para ensayo de gravedad específica	38
Figura 18. Penetrómetro con aguja normalizada.....	38
Figura 19. Preparación de la muestra para el ensayo de penetración.....	38
Figura 20. Mezcla de agregados y cemento asfáltico	41
Figura 21. Mezcla asfáltica llevada al molde del pedestal.....	42
Figura 22. Aplicación de golpes	43
Figura 23. Briquetas estándar	43
Figura 24. Aparato Marshall	45
Figura 25. Muestra del agregado en el recipiente	46
Figura 26. Proceso de apisonado	46
Figura 27. Máquina de mezclado asfalto-caucho	47

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Porcentaje de pérdidas máquina de los ángeles	33
Ecuación 2. Porcentaje de pérdidas aparato Micro-Deval	34
Ecuación 3. Porcentaje de equivalente de arena.....	34
Ecuación 4. Densidad bulk del llenante mineral en kerosene	37
Ecuación 5. Índice de penetración	39
Ecuación 6. Porcentaje aproximado de contenido de asfalto	40
Ecuación 7. Gravedad específica bulk de mezcla asfálticas	44
Ecuación 8 Densidad de mezclas asfálticas	44

RESUMEN

Para la fabricación de mezclas asfálticas se consumen grandes cantidades de materiales pétreos no renovables que causan daños irreversibles al medio ambiente. Una de las alternativas para sustituir estos materiales son las escorias negras de horno de arco eléctrico y el grano de caucho reciclado, ya que estos son desechados en grandes cantidades por las industrias colombianas y a nivel internacional. Por esta razón, este proyecto tuvo como objetivo determinar la dosificación óptima de mezclas asfálticas densas en caliente tipo 19, modificadas con grano de caucho reciclado y escoria negra de horno de arco eléctrico. Se implementó la metodología Marshall para evaluar el desempeño mecánico de una mezcla asfáltica convencional en comparación con la mezcla asfáltica modificada.

La mezcla asfáltica modificada tipo 19 se diseñó con variaciones en el cemento asfáltico 60-70 de la siguiente manera: 90% betún y 10% grano de caucho reciclado, esto de acuerdo a las investigaciones realizadas por Bansal *et al.* (2017) en la que se concluye que la dosificación más efectiva para la modificación del aglutinante es la mencionada anteriormente. En los agregados gruesos las variaciones fueron del 25%, 50%, 75% y 100% de escoria negra de horno de arco eléctrico. Obteniendo como resultado un nuevo tipo de mezcla asfáltica modificada que causa un impacto positivo al medio ambiente, al sector de infraestructura vial y cumple con las especificaciones mínimas para la construcción.

Palabras claves: Mezcla densa en caliente, escoria negra de horno de arco eléctrico, grano de caucho reciclado, dosificación óptima, metodología Marshall.

ABSTRACT

For the manufacture of asphalt mixtures, large quantities of non-renewable stone materials are consumed that cause irreversible damage to the environment. One of the alternatives to replace these materials are black slag from electric arc furnace and recycled rubber grain, since these are disposed in large quantities by Colombian industries and at the international level. For this reason, this project was to determine the optimal dosage of dense hot asphalt mixtures type 19, modified with recycled rubber grain and black slag from electric arc furnace. The Marshall methodology was implemented to evaluate the mechanical performance of a conventional asphalt mixture compared to the modified asphalt mixture.

The modified asphalt mixture type 19 was designed with variations in asphalt cement 60-70 as follows: 90% bitumen and 10% grain of recycled rubber, this according to the research carried out by Bansal *et al.* (2017) in which it is concluded that the most effective dosage for the modification of the binder is the one mentioned above. In the coarse aggregates the variations were 25%, 50%, 75% and 100% black slag from electric arc furnace. Resulting in a new type of modified asphalt mixture that causes a positive impact on the environment, the road infrastructure sector and meets the minimum specifications for construction.

Keywords: Dense hot asphalt mixture, black slag from electric arc furnace, grain of recycled rubber, optimal dosage, Marshall methodology.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es uno de los principales pilares para hacer competitiva a una nación, pues esta evidencia el nivel socio-económico de la misma. Lamentablemente para la construcción, el mejoramiento y la rehabilitación de las carreteras, se consumen grandes cantidades de materiales no renovables, los cuales se extraen de canteras y ríos, situación que afecta la biodiversidad, la turbidez del agua y los niveles freáticos. Debido a la necesidad de mitigar el daño ambiental, se desarrollan estudios e investigaciones que impulsan y promueven la reutilización de productos manufacturados cuyos componentes no son degradables.

Es por ello que con este proyecto se intentó desarrollar una mezcla asfáltica con materiales alternativos como el grano de caucho reciclado (GCR) y la escoria negra de horno de arco eléctrico (EAF), ya que sus propiedades físicas y químicas han desempeñado un mejor comportamiento en cuanto a estabilidad, resistencia al ahuecamiento y densidad; atributos que se han podido verificar con otros estudios donde implementaron estos materiales de manera independiente.

Importantes cantidades de estos materiales son desechados diariamente; en Colombia alrededor de 0.3 ton de escorias se generan en la producción de cada tonelada de acero y aproximadamente 190.500 ton de residuos de caucho son producidos a partir de los neumáticos. La metodología para la eliminación de estos materiales es llevarlos a escombreras, vertederos o incineradores, produciendo alteraciones en la biósfera.

Con este proyecto se buscó determinar la dosificación óptima de una mezcla asfáltica modificada con GCR y EAF teniendo en cuenta la información secundaria, la cual fue de gran ayuda para la delimitación de las variaciones de los materiales implementados y el tipo de mezcla asfáltica a analizar. Adicionalmente, fue necesaria la ejecución de ensayos de laboratorio, con el fin de definir variaciones de los materiales implementados, el tipo de mezcla asfáltica a analizar y verificar el cumplimiento de la normativa colombiana dada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Para la fabricación de mezclas asfálticas se utilizan grandes cantidades de agregados pétreos y material cementante de origen natural no renovable que impactan negativamente al medio ambiente debido a la extracción considerable que esta producción demanda. Dicha explotación trae como consecuencia alteraciones del equilibrio en la regulación hídrica y en la estabilidad del suelo, afectando las dinámicas y los servicios en los ecosistemas.

1.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Pueden las escorias negras de horno de arco eléctrico combinadas con el grano de caucho reciclado ser materiales alternativos y cumplir con los requisitos mínimos establecidos para el diseño preliminar de mezclas asfálticas tipo MDC-19?
- ¿La escoria negra de horno de arco eléctrico junto con el grano de caucho reciclado mejoran el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica densa en caliente respecto a una mezcla asfáltica convencional?
- ¿Puede la escoria negra de horno de arco eléctrico sustituir parcial o totalmente el material grueso de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-19?

1.3. JUSTIFICACIÓN

El constante crecimiento de la infraestructura vial aumenta la demanda en la producción de mezclas asfálticas a partir de materias primas no renovables, impactando de manera directa al medio ambiente; por lo que surge la necesidad de implementar nuevos materiales que ayuden a disminuir tal deterioro. Dentro de estos materiales se reconocen las escorias negras de horno de arco eléctrico, las cuales han demostrado ser idóneas para sustituir los agregados convencionales en la construcción de carreteras en países desarrollados como Estados Unidos, Japón, Alemania y Francia (Nguyen *et al.*, 2018). Además, estas escorias se generan como grandes desechos en las industrias productoras de acero, lo que permite su reutilización y por consiguiente un ahorro de costos y beneficios al entorno.

En Colombia por ejemplo, por cada tonelada de acero producida se generan entre 0,1 a 0,3 Ton de escorias que terminan acumulándose en exceso gracias a la industria siderúrgica (Sánchez, 2014).

Otro componente en la fabricación de las mezclas asfálticas es el asfalto, el cual puede ser modificado parcialmente con elastómetros como el caucho que evidencian mejoras significativas en las propiedades, vida útil, resistencia a la fatiga, disminución de los espesores de las capas y formación de surcos en pavimentos (Bansal *et al.* 2017, Gaspar, 2017). Este constituyente, al igual que la escoria, se genera en grandes proporciones por la industria automotriz, pero carece de procesos apropiados para su descarte. Según el estudio realizado por el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, aproximadamente 190.500 Ton de residuos derivados del caucho se producen anualmente a partir de la producción de neumáticos, solo el 10% de esta materia se reutiliza, el resto va a vertederos (50%) o se incineran (40%) generando graves afectación al ecosistema (Ambiental *et al.*, 2011).

Aunque estos materiales se han probado y utilizado en la construcción de la infraestructura vial, casi siempre se han analizado de manera independiente, desconociendo la efectividad combinada de los mismos y su potencial funcionamiento en la elaboración de las mezclas asfálticas. A partir de este estudio se pretende determinar la dosificación óptima de mezclas densas en caliente tipo MDC-19 combinando la EAF y el GCR, con el fin de generar alternativas para disminuir la cantidad de desechos que se acumulan en el planeta sin afectar la calidad de la carpeta asfáltica.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Determinar la dosificación óptima de mezclas densas en caliente tipo 19 modificada con grano de caucho reciclado y escoria negra de horno de arco eléctrico por medio de la metodología Marshall.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las materias primas usadas para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y los materiales modificantes.
- Evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada con diferentes porcentajes (90% betún + 10%GCR) para el cemento asfáltico y (25%, 50%, 75% y 100% de EAF) para los agregados gruesos.

- Analizar la variación del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional en comparación a la mezcla modificada con GCR y EAF.

2. ESTADO DEL ARTE

Los pavimentos son un conjunto de capas superpuestas diseñadas para resistir las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales. Dentro de los diferentes tipos de pavimento se puede encontrar el flexible, conformado por una capa asfáltica a partir de una base, sub-base, afirmado o material de conformación, y una carpeta asfáltica (Rondón & Reyes, 2015a). La carpeta asfáltica está compuesta por una mezcla generalmente de agregados pétreos o materiales granulares ligados y productos asfálticos, los cuales deben ser inertes y proceder de depósitos naturales (Castañeda, 2009).

Los agregados pétreos deben cumplir ciertos requisitos mínimos de calidad para conformar mezclas asfálticas, ya que componen entre el 88% al 96% de la masa (*Capítulo 4: Agregados Pétreos*, s.f. Dichos requisitos están establecidos en el Art. 450-13 INVIAS y se presentan a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua

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/- 5/7/-	25/35/35 5/7/7	25/35/35 5/7/7
- Capa de: rodadura/intermedia/base, 100 revoluciones				
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238		25/35/30	20/25/25
-Capa de: rodadura/intermedia/base				
Resistencia mecánica por el método del 10%, capa de:				
rodadura/intermedia/base	E-224			110/90/75 75/75/75
-Valor en seco, mínimo (kN)				
-Relación húmedo/seco, mínimo (%)				
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, agregado 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, graduación combinada (F)				
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 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 fracturas, mínimo (%)				
-Una cara: rodadura/intermedia/base	E-227	75/60/-	75/75/60	85/75/60
-Dos caras: rodadura/intermedia/base		-/-/-	70/-/-	70/-/-
Geometría de las partículas, agregado fino (F)				
Angularidad de la fracción fino, método A, mínimo (%)	E-239	40/35/-	45/40/35	45/40/35
-Capa de: rodadura/intermedia/base				
Adhesividad (o)				
-Agregado grueso: cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%)	E-757		Reportar	
-Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (Método riedel-weber) índice mínimo	E-774		4	

Nota 1: El equivalente de arena será el del agregado finalmente obtenido mediante la combinación de las distintas fracciones (incluido el llenante mineral) según las proporciones determinadas en la fórmula de trabajo y antes de pasar por el secador de la planta mezcladora. En caso de que no se cumpla el valor mínimo señalado en la tabla el agregado se aceptará si su equivalente de arena, medido en las mismas condiciones, es superior a 40% y, simultáneamente, el valor de azul de metileno, determinado mediante la norma de ensayo INV E-235 es inferior a diez (10).

Nota 2: La determinación del valor de azul de metileno no es obligatoria si el equivalente de arena cumple con el valor mínimo señalado en la tabla.

Fuente: INVIAS Art.450-13.

Otra característica de los materiales pétreos es su granulometría, la cual se clasifica de la siguiente manera: gravas con tamaños de partículas entre 2 mm y 6.4 cm, arenas gruesas y finas con tamaños de partículas entre 0.075 mm y 2 mm, finalmente filler o llenante mineral con tamaños de partículas inferiores a 0.002 mm. Esto con el propósito de cumplir los requisitos propuestos en el Art. 450-13 INVIAS (Tabla 2).

Tabla 2. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm)/U.S. STANDARD									
	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.180	0.075
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
% Pasa										
DENSA	MDC-25	100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19		100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10				100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
SEMI DENSA	MSC-25	100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19		100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESA	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11
ALTO MÓDULO	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±)				4%				3%		2%

Fuente: INVIAS Art. 450-13

Para la elaboración de las mezclas asfálticas se requieren grandes cantidades de agregados pétreos de origen natural cuya extracción causa un impacto negativo al medio ambiente, ante este escenario, investigadores a nivel internacional han realizado estudios para la implementación de un nuevo material. En algunos países como Estados Unidos ya están sustituyendo los materiales pétreos de manera parcial o total por otros que son desechados en escombreras y producidos por compañías siderúrgicas como las escorias de alto horno y el acero. Estas son residuos generados en cantidades exorbitantes debido a la alta demanda de acero en el sector vial, desarrollo urbano y tecnológico, dando como resultado una gran problemática ambiental a causa de su inadecuada disposición.

Según Motz & Geiseler (2000) estos materiales poseen propiedades químicas y físicas que los hacen aptos para ser usados en el mantenimiento y rehabilitación de las vías, ya sea que se empleen como materiales granulares no tratados o ligados. En la revisión de sus componentes químicos los investigadores encuentran propiedades auto cementantes debido a la presencia de Óxido de Silicio (SiO_2) y Óxido de Aluminio (Al_2O_3) esto quiere decir que no necesitan ser activadas con agua o cal, sumado a esto cuenta con un alto contenido de cuarzo lo que indica un mejor desarrollo en la resistencia mecánica, una mejora en la adhesión superficial asfalto-

agregado y de acuerdo con Modarres & Rahmanzadeh (2014) y Muniandy *et al.* (2013) presentan un incremento en la resistencia al ahuellamiento. Además, no se consideran como residuo peligroso ya que no superan la concentración de toxicidad especificada como peligrosa de acuerdo al criterio Toxicity Characteristic Leaching Procedure (Pasetto & Baldo, 2018).

El estudio ejecutado por Morcote (2019) consistió en el diseño una mezcla asfáltica tipo MDC-19 modificada con escorias siderúrgicas de convertidores o escorias de horno de oxígeno básico (BOF) comparando su comportamiento mecánico con una mezcla asfáltica convencional. Los factores a comparar fueron la estabilidad y flujo Marshall, susceptibilidad a la humedad, módulo dinámico y resistencia al ahuellamiento. Los resultados obtenidos para la mezcla modificada con escoria en términos de estabilidad Marshall están por encima de lo especificado por el INVIAS para los tres (3) niveles de tránsito, el requerimiento de flujo o deformación cumple para niveles de tránsito 1 y 2. En lo que concierne al factor de ahuellamiento, fue evidente una menor deformación en las mezclas modificadas.

López-Díaz *et al.* (2018) realizaron una mezcla modificada cuyas variaciones fueron en el agregado grueso con escoria de horno de oxígeno básico (BOF) en un 50% y el agregado fino con polvo de alto horno (BFD) en igual proporción. Los resultados evidenciaron mejoras en la estabilidad con respecto a una mezcla patrón, por lo que se recomienda la incorporación de estos residuos como una alternativa viable para la construcción de carreteras.

Para el diseño de una mezcla asfáltica, también es necesario la implementación de un material cementante o un ligante asfáltico el cual surge de la destilación del petróleo crudo, ya sea por procedimientos naturales o industriales. Existe una gran variedad de materiales asfálticos como el cemento asfáltico, emulsiones asfálticas, asfalto rebajado, asfalto modificado y multigrados, asfaltos espumados, crudos pesados, asfaltitas y asfaltos naturales (Rondón & Reyes, 2015).

En Colombia el cemento asfáltico se clasifica según su penetración (décimas de milímetro 0.1 mm) en tres tipos: AC 80-100, AC 60-70 Y AC 40-50. El AC 80-100 es utilizado en zonas con temperaturas medias anuales promedio inferiores a los 24 °C, los AC 60-70 y AC 40-50 para temperaturas superiores a los 24°C. Por lo general para mezclas asfálticas en caliente son utilizados los cementos asfálticos 60-70 y 40-50, ya que su producción es más comercial (Rondón & Reyes, 2015).

Las especificaciones mínimas de calidad que deben cumplir estos materiales son las presentadas en el Art. 410 del INVIAS (Tabla 3), a excepción de la ciudad de Bogotá D.C dado que estos son controlados por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (Tabla 4).

Tabla 3. Especificaciones del cemento asfáltico INVIAS

CARACTERÍSTICA	NORMAS DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
Asfalto original							
Penetración (25°C, 100g, 5 s), 0,1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E-724	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6
Viscosidad absoluta (60°C), P	E-716						
	o	2000	-	1500	-	1000	-
	E-717						
Ductilidad (25° C, 5 cm/min), cm	E-702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua, %	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E-709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3

Fuente: INVIAS Art.140-13

Tabla 4. Especificaciones del cemento asfáltico IDU

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	NORMA DE ENSAYO	40-50		60-70		80-100	
			MÍN.	MAX	MÍN.	MAX	MÍN.	MAX
Asfalto original								
Penetración	0.1 mm	INV E-706-07	40	50	60	70	80	100
Índice de penetración	-	-	-1.0	+1.0	-1.0	+1.0	-1.0	+1.0
Viscosidad 60°C	Pa-s	ASTM D-4402	200	400	150	300	100	200
Viscosidad 135°C	Pa-s	ASTM D-4402	0.27	0.65	0.22	0.45	0.15	0.40
Punto de ablandamiento	°C	INV E-712-07	49	59	45	55	42	52
Ductilidad (25 °C, 5 cm/mm)	Cm	INV E-702-07	100	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	INV E-713-07	99	-	99	-	99	-
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	INV E-709-07	232	-	232	-	232	-

Fuente: IDU, sección 200-11

Un punto a mencionar es la estructura físico-química del cemento asfáltico, ya que según investigaciones realizadas los asfáltenos generan rigidez, las resinas generan características cementantes y de adherencia, finalmente los aceites brindan manejabilidad y protección al envejecimiento (Arenas, 1999).

No obstante, existen diferentes estudios que implementan el uso de elastómetros como sustitución del betún para desarrollar un ligante modificado. Esto con el objetivo de contribuir a la reducción de impactos negativos para el medio ambiente como lo son la quema indiscriminada de las llantas desechadas dando paso a las emisiones de CO₂, uno de los gases causantes del calentamiento global (Díaz & Castro, 2017).

Para el 2018 el consumo mundial de caucho fue de 29,2 millones de toneladas siendo creciente la tendencia general de la demanda de caucho en el mercado (Lozano & Reyes, 2020). En particular, las llantas son el producto dominante en esta industria cuyo consumo mundial total de caucho para su fabricación es de aproximadamente el 50% en comparación con los demás productos de caucho (Forrest, 2014). Alrededor de 1.4 billones de llantas son vendidas anualmente en el mundo, por consiguiente, muchos de ellos también acaban su vida útil (Presti, 2013). Lo anterior, evidencia la necesidad de reutilizar el material y disminuir la cantidad de desechos sólidos que genera.

En la investigación realizada por Higuera Sandoval *et al.* (2019) que tuvo como objetivo principal analizar el efecto del grano de caucho reciclado, una mezcla asfáltica tipo MD-12, por medio de la metodología Marshall y el ensayo de resistencia a la deformación plástica estandarizado por el Instituto Nacional de Vías INVIAS 2013, concluyó que para la adición del GCR con variaciones del 0.5%, 1.5% y 2.5% su resultado óptimo fue de 0.5% ya que este obtuvo los mejores resultados para un nivel de tráfico T2-T3.

Por otra parte, Bansal *et al.* (2017) dieron como propuesta mezclar plástico triturado y caucho con betún en un rango de temperatura entre 200°C y 220°C en proporciones predeterminadas las cuales fueron 4%, 6%, 8% y 10% de plástico y 5%, 10% y 15% de GCR. Para la evaluación se realizaron ensayos de estabilidad y flujo Marshall, densidad, vacíos de aire y vacíos en el agregado por el método de Rothfutch. De acuerdo a los datos obtenidos la mezcla de 84% betún 6% plástico y 10% GCR dio la máxima estabilidad y flujo aumentando el 53% respecto a la mezcla convencional, seguido a esta quedó la mezcla de 90% betún y 10% GCR aumentando el 45% respecto a la mezcla convencional y mostrando uno de los mejores valores de densidad.

Según las investigaciones realizadas por Diaz & Castro (2017) y Gonzales & Cotrina (2019), el GCR presente en las mezclas asfálticas causa un aumento en la resistencia, lo que indica una disminución sobre problemas de ahuellamiento y una reducción de los contenidos de vacíos de aire en la mezcla.

En su estudio Cardoza *et al.* (2019) indicaron que la producción de este tipo de pavimento resulta ser más costosa a corto plazo, pero al tener una vida útil más larga que una mezcla convencional y precisar de poco mantenimiento, los costos se reducen a largo plazo.

En los diferentes estudios ya expuestos se ha demostrado que uno de los elastómetros que puede ser un material modificante en el cemento asfáltico es el grano de caucho reciclado ya que la adición de este material se traduce en numerables beneficios, pero estos deben cumplir especificaciones mínimas de calidad las cuales están presentadas en el Art. 413 del INVIAS (Tabla 5) o en la sección 560 del IDU (Tabla 6).

Tabla 5. Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado INVIAS

CARACTERÍSTICA	NORMAS DE ENSAYO	TIPO DE ASFALTO CAUCHO					
		TIPO I		TIPO II		TIPO III	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
Viscosidad de aparente a 175°C (Pa.s)	ASTM D-2196 Método A modificado según ASTM D-6114	1.5	5.0	1.5	5.0	1.5	5.0
Penetración a 25 °C, 100g, 5s (1/10mm)	INV E-706	25	75	25	75	50	100
Penetración a 4 °C, 100g, 5s (1/10mm)	INV E-706	10	-	15	-	25	-
Punto de ablandamiento (°C)	INV E-712	57	-	54	-	52	-
Resiliencia a 25 °C (%)	ASTM D-5329	25	-	20	-	10	-
Punto ignición mediante copa abierta de Cleveland (°C)	INV E-709	230	-	230	-	230	-
Acondicionamiento en prueba de película delgada	INV E-720	-	-	-	-	-	-

Penetración de residuos luego de acondicionamiento en prueba de película delgada, % de la penetración original	INV E-706	75	-	75	-	75	-
--	-----------	----	---	----	---	----	---

Fuente: INVIAS Art. 413-13

Tabla 6. Especificación de asfaltos modificados con GCR IDU

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO	MÍNIMO	MÁXIMO
Asfalto original ya modificado con GCR			
Viscosidad a 163° con viscosímetro rotacional, Pa-s	INV E-717-07	1.5	3.0
Penetración a 25°C, 1/10 mm	INV E-706-07	40	70
Punto de ablandamiento, ° C	INV E-712-07	52	-

Fuente: IDU, sección 560-11

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. Agregados pétreos

Los agregados pétreos con un tamaño de partícula entre $\frac{3}{4}$ " y No 4 implementados para la fabricación de la mezcla asfáltica fueron suministrados por la planta de asfaltos Tecniafaltos de la ciudad de Tunja, Boyacá. El material fino correspondiente al tamaño entre No 4 y No 200 fue suministrado por la planta de asfaltos Tecniafaltos y BFL agregados y construcción (Fig. 1).

Figura 1. Tipos de agregados pétreos



Fuente: Autores

3.1.2. Llenante mineral o filler

El llenante mineral implementado fue cemento hidráulico Tequendama, este material se caracteriza por tener un tamaño de partícula menor a $75\ \mu\text{m}$ y no presentar material plástico (Fig. 2).

Figura 2. Cemento hidráulico



Fuente: Autores

3.1.3. Material bituminoso

El material bituminoso que fue implementado en esta investigación corresponde al tipo CA 60-70, el cual fue suministrado por Tecniafaltos ubicada en la ciudad de Tunja, Boyacá (Fig. 3). Las especificaciones del asfalto se incluyen en el anexo 24.

Figura 3. Cemento asfáltico 60-70



Fuente: Autores

3.1.4. Agregados siderúrgicos

Los agregados siderúrgicos utilizados como materia experimental en el estudio fueron las escorias negras de horno de arco eléctrico, a los cuales se

les realizó la caracterización física. El suministro de este material fue aportado por la planta Gerdau Diaco ubicada en el municipio de Tuta, Boyacá (Fig 4). La caracterización química de este material fue aportada por la planta Gerdau Diaco (Anexo 23).

Figura 4. Escoria negra de horno de arco eléctrico



Fuente: Autores

3.1.5. Grano de caucho reciclado

El material modificante del asfalto utilizado fue el grano de caucho reciclado, el cual proviene del raspado de llantas en el proceso de reencauche. Para el acondicionamiento de este material fue necesaria una limpieza con el fin de eliminar fibras de acero u otros contaminantes. El material utilizado fue de un tamaño pasante por el tamiz No 30 de acuerdo a la sección 560-11 del IDU (Fig. 5). El suministro de este material fue aportado por la reencauchadora Reenbarsa S.A.S. ubicada en el municipio de Barbosa, Santander.

Figura 5. Grano de caucho reciclado



Fuente: Autores

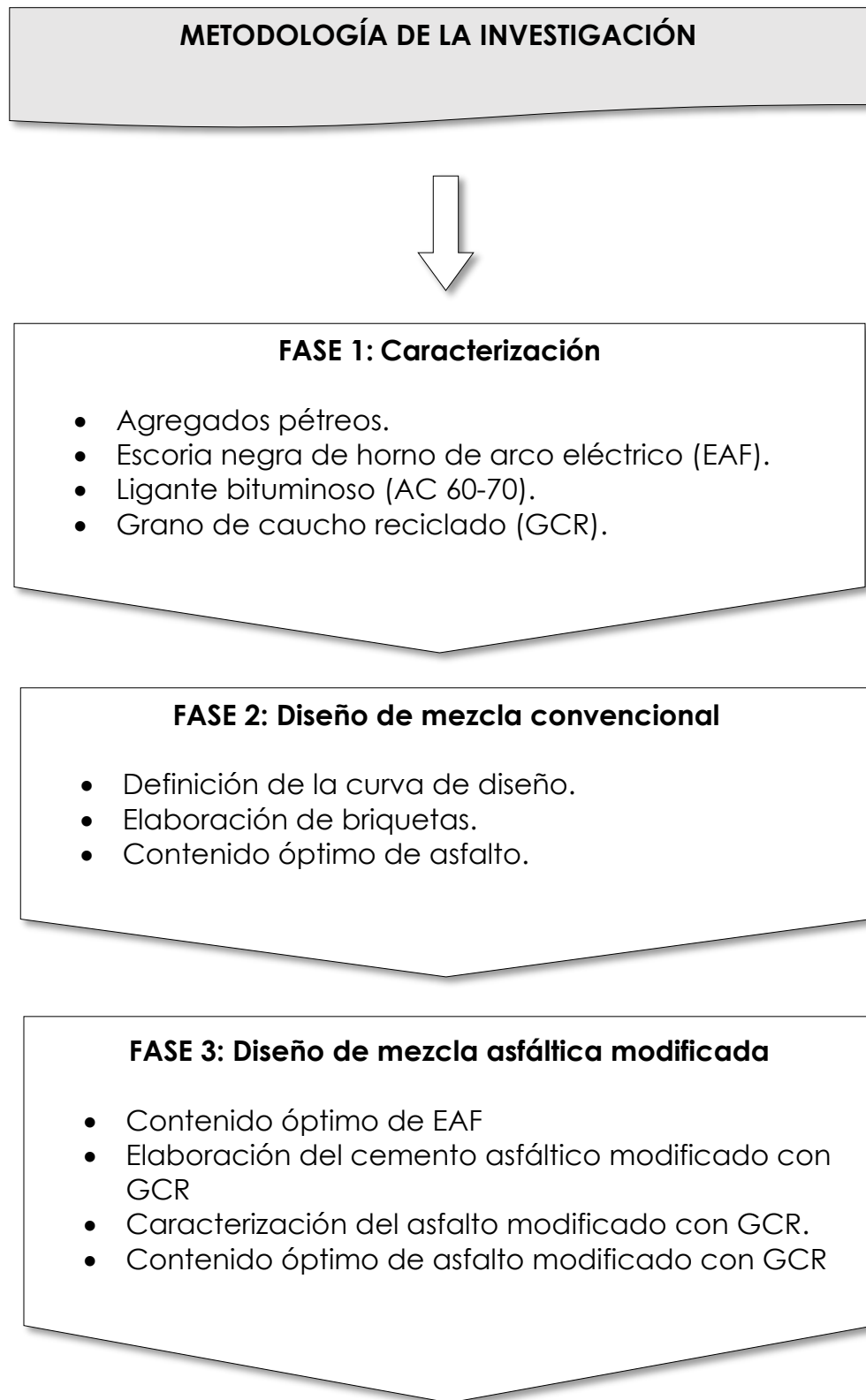
3.2. METODOLOGÍA

El tipo de metodología implementada para esta investigación fue experimental, esto quiere decir que su desarrollo tuvo un enfoque con la realización de ensayos de laboratorio, los cuales permitieron caracterizar los materiales utilizados de manera cualitativa y cuantitativa.

Para la elaboración de los ensayos se tuvieron en cuenta los procedimientos y recomendaciones establecidos por la normatividad vigente en Colombia: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías, Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías y Especificaciones Técnicas Generales de Materiales del Instituto de Desarrollo Urbano.

A continuación se presenta un esquema con las fases implementadas para la ejecución de la investigación (Fig. 6). La primera fase correspondió a la caracterización de los agregados pétreos y los materiales modificantes implementados para la elaboración de la mezcla asfáltica. La segunda fase consistió en el diseño de mezcla a utilizar. En la tercera fase se determinó el contenido óptimo del agregado grueso modificante y del cemento asfáltico modificado.

Figura 6. Esquema metodológico



Fuente: Autores

3.2.1. Fase 1: Caracterización de los materiales implementados

Se realizó la caracterización pertinente para los diferentes agregados pétreos convencionales, así como para el agregado modificante y el cemento asfáltico. A continuación, se describe brevemente cada ensayo realizado para dicha caracterización.

Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E 213-13)

Este ensayo determina cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas del agregado grueso y fino de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada ubicados decrecientemente. Consiste en reducir una muestra del material por cuarteo a un tamaño apropiado para el ensayo. Una vez realizado el cuarteo, la muestra se debe lavar y secar a una temperatura de 110 °C hasta obtener masa constante; después de secada la muestra, esta debe tener una masa mínima de 2000 g para agregado grueso con tamaños de partículas de $\frac{1}{2}$ " y se pasará todo el material por la torre de tamices seleccionados (Fig. 7). Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de las especificaciones que son aplicables y para asignar los datos necesarios para la producción de diferentes agregados y mezclas que lo contengan.

Figura 7. Torre de tamices



Fuente: Autores

Resistencia de la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 $\frac{1}{2}$ ") por medio de la máquina de los ángeles. (INV E 218-13)

Este método se emplea para medir la resistencia a la degradación de agregados pétreos combinando la abrasión, impacto y molienda. Estas acciones son realizadas en un tambor rotatorio con una determinada carga, la cual dependerá de la granulometría del material (Fig. 9). La muestra

utilizada se debe reducir por cuarteo, se debe lavar y secar a una temperatura de 110 °C hasta obtener masa constante para luego introducirla en el tambor rotatorio a 500 rpm por 16 minutos. Terminado el tiempo se debe tamizar la muestra por la malla No 12 (Fig. 8) y nuevamente se debe lavar y secar a una temperatura de 110 °C hasta obtener masa constante.

$$\% \text{ perdidas} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$$

Ecuación 1. Porcentaje de pérdidas máquina de los ángeles

P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo, g.

P2: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz No 12 (1.70 mm), g.

Figura 9. Tambor rotatorio



Fuente: Autores

Figura 8. Tamizaje de muestra en la malla No.12



Fuente: Autores

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

Esta prueba tiene como finalidad determinar la pérdida del agregado grueso por abrasión en presencia de agua y de una carga abrasiva (Fig. 10). Consiste en sumergir una muestra con granulometría normalizada y una carga abrasiva de 5000 g en un recipiente de acero, el cual rota a 100 rpm por un periodo de 2 horas. La pérdida será la cantidad de material que pase el tamiz No.16.

$$\% \text{ de pérdidas} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Ecuación 2. Porcentaje de pérdidas aparato Micro-Deval

Donde:

A: Masa de la muestra seca antes del ensayo, g.

B: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz No 16. g.

Figura 10. Muestra saturada con carga abrasiva



Fuente: Autores

Equivalente de arenas (INV E 133-13)

Este ensayo tiene como objetivo determinar las proporciones de polvo y material arcilloso presentes en los agregados finos. Consiste en añadir una pequeña cantidad de solución floculante al agregado fino colocando esto en un cilindro graduado para enseguida agitarlo y así forzar al material arcilloso a quedar en suspensión sobre la arena. Después de un periodo de sedimentación se determinan las alturas del material arcilloso y arena.

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

Ecuación 3. Porcentaje de equivalente de arena

Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados gruesos y finos (INV E 230-13)

Este ensayo se realiza para determinar el índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados naturales o artificiales usados para la construcción de carreteras. Consiste en dividir la muestra en fracciones que se criban en un calibrador de espesores considerando plana a la partícula que pase por dicho calibrador (Fig. 11). En el caso del índice de alargamiento se usa un calibrador de longitudes y se considera a las partículas retenidas por dicho calibrador como alargadas (Fig.12).

Figura 12. Ensayo de partículas alargadas.



Fuente: Autores

Figura 11. Ensayo de partículas planas



Fuente: Autores

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E 227-13)

Este ensayo se usa para determinar el porcentaje de partículas de agregado grueso que tiene un número especificado de caras fracturadas, siendo una cara fracturada una superficie angulosa quebrada. Este porcentaje se relaciona con maximizar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas. Para realizar el ensayo la muestra de agregado grueso debe estar seca y tamizada sobre el tamiz No 4 con el fin de separar el material fino del grueso; se prosigue a separar la muestra en las categorías que se indica en la especificación contando el número de partículas por inspección visual (Fig. 13).

Figura 13. Inspección visual de caras fracturadas del agregado grueso



Fuente: Autores

Análisis granulométrico del llenante mineral utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas (INV E 215-13)

Este ensayo es usado para determinar si cumple con los requisitos exigidos por la especificación del llenante mineral utilizados en mezclas asfálticas. Consiste en pasar una muestra seca de 100 g por los tamices No. 40, No.100 y No. 200(Fig. 14).

Fuente: Autores

Figura 14. Torre de tamices para granulometría del filler



Densidad bulk del llenante mineral en kerosene (INV E 225-13)

Este método consiste en medir el volumen ocupado de una masa del llenante mineral cuando se sedimenta con kerosene. Consiste en poner 10

g del llenante en una probeta con kerosene; la cual debe ser agitada 5 veces por cada lado, con el fin de forzar al material para que quede en suspensión. Finalmente queda en proceso de sedimentación por 6 horas (Fig. 15) (Fig. 16).

$$Densidad\ bulk = \frac{10}{V}$$

Ecuación 4. Densidad bulk del llenante mineral en kerosene

Donde:

10: Masa de muestra de llenante utilizada. (g)

V: Volumen aparente del llenante sedimentado. (ml)

Figura 16. Masa del llenante mineral para su densidad bulk



Fuente: Autores

Figura 15. Probetas de 50 ml y llenante mineral



Fuente: Autores

Gravedad específica de agregados gruesos (INV E 223-13)

Este ensayo se usa para determinar la densidad de la porción sólida de un gran número de partículas del agregado. Consiste en saturar la muestra por alrededor de 24 hr con el fin de llenar sus poros. Posteriormente las partículas se secan superficialmente y se obtiene el volumen de la muestra. Los resultados de cada masa se emplean para calcular la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado.

Figura 17. Equipo para ensayo de gravedad específica



Fuente: Autores

Penetración de los materiales bituminosos (INV E 706-13)

Este ensayo mide la consistencia del material bituminoso. Consiste en verter el producto bituminoso en un recipiente y colocarlo en un baño de agua a una temperatura aproximada de 25 °C durante 1½ hr (Fig. 19). Pasado el tiempo se emplea un penetrómetro con una aguja normalizada y se penetra la muestra (Fig. 18).

Figura 19. Preparación de la muestra para el ensayo de penetración



Fuente: Autores

Figura 18. Penetrómetro con aguja normalizada



Fuente: Autores

Punto de ablandamiento de materiales bituminosos aparato de anillo y bola (INV E 712-13)

A partir de este ensayo se determina el punto de ablandamiento del asfalto en una temperatura entre 30 a 157 °C. Consiste en calentar un baño líquido a una velocidad controlada con dos discos horizontales del material bituminoso los cuales deben soportar una bola de acero. Se considera como el valor medio de las temperaturas cuando se ablandan lo suficiente para que cada bola envuelta en el material caiga a una distancia aproximada de 25 mm.

Índice de penetración (INV E 724-13)

Este índice se determina a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de penetración a una temperatura de 25 °C y del punto de ablandamiento con anillo y bola, ya que estos proporcionan un criterio de medida de la susceptibilidad térmica del asfalto.

$$IP = \frac{20 - 10f}{1 + f}$$

Ecuación 5. Índice de penetración

$$f = \frac{50 \times \log \left[\frac{800}{P} \right]}{T_{AB} - 35}$$

Donde:

T_{AB} : Punto de ablandamiento (°C)

P: Penetración en 0.1 mm a 25°C.

Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional (INVE E 717-13)

Este ensayo se utiliza para medir la viscosidad del asfalto a las temperaturas de aplicación. Se coloca una pequeña cantidad de muestra de asfalto en un recipiente a temperatura constante. El par de torsión requerido para mantener rotando a velocidad constante un vástago cilíndrico sumergido en la muestra, se utiliza para determinar la resistencia relativa a la rotación. La viscosidad del ligante en Pa-s, se determina como el promedio de tres mediciones realizadas.

Ductilidad de los materiales asfálticos (INV E 702-13)

El ensayo consiste en someter una probeta del asfalto a tracción en condiciones de velocidad y temperatura en un baño de agua para finalmente estirar la probeta hasta su rotura.

Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland (INV E 709-13)

Este ensayo determina los puntos de inflamación y de combustión empleando la copa abierta de Cleveland. Consiste en llenar la copa con la muestra a un nivel especificado. Inicialmente se aumenta la temperatura de la muestra de manera rápida y luego de manera constante y lenta, a medida que se aproxime a una temperatura máxima de 56 °C.

3.2.2. Fase 2: Diseño de mezcla convencional

Una vez determinado el análisis granulométrico y el cumplimiento con los requisitos físicos de las especificaciones de cada agregado implementado (Tabla 1), se procedió a estabilizar la curva granulométrica teniendo en cuenta las especificaciones por método matricial y de tanteo (Tabla 2).

Para determinar el contenido aproximado de asfalto en la mezcla, se prepararon muestras con variaciones e incrementos del 0.5% sobre el valor obtenido mediante la Ec.6.

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F$$

Ecuación 6. Porcentaje aproximado de contenido de asfalto

Donde:

P: Porcentaje aproximado de contenido de asfalto

a: Porcentaje del agregado retenido en el tamiz No. 10

b: Porcentaje del agregado pasante por el tamiz No. 10 y retenido en el No. 200

c: Porcentaje del agregado pasante por el tamiz No. 200

K: 0.15 para 11-15% pasante por el tamiz No. 200

0.18 para 6-10% pasante por el tamiz No.200

0.20 para el 5% o menos pasante por el tamiz No.200

F: 0 a 2% en base a la absorción de áridos ligeros o pesados, en ausencia de otros datos, se sugiere un valor de 0,7.

Con el ideal de proporcionar datos adecuados se prepararon tres briquetas por cada contenido de asfalto de acuerdo al método Marshall, es decir que se fabricaron 15 briquetas en total (Tabla 8).

Tabla 7. Número de briquetas mezcla convencional

MEZCLA CONVENCIONAL	
% DE ASFALTO	No. DE BRIQUETAS
X	3
XX	3
Dato teórico (Ec.6)	3
XX	3
X	3
TOTAL	15

Fuente: Autores

Para la elaboración de cada briketa se usaron aproximadamente 1200 g de agregados y diferentes porcentajes de cemento asfáltico por serie. Se mezclaron durante un minuto a una temperatura de 150 °C (la cual depende del ensayo de viscosidad rotacional (INV E -717-13)) hasta conseguir una masa homogénea (Fig. 20)

Figura 20. Mezcla de agregados y cemento asfáltico



Fuente: Autores

Después de tener una mezcla homogénea y haber conseguido la temperatura de compactado (la cual depende del ensayo de viscosidad rotacional (INV E -717-13)) se llevó al molde del pedestal de compactación y se apisonó 15 veces en 2 sesiones (Fig. 21).

Figura 21. Mezcla asfáltica llevada al molde del pedestal



Fuente: Autores

Se ajustó el molde al pedestal de compactación y se aplicaron 75 golpes, a caída libre por cada cara cuidando que el martillo estuviera en un eje vertical (Fig. 22).

Figura 22.
Aplicación de golpes



Fuente: Autores

Finalizada la aplicación de los golpes requeridos, se retiró el molde del pedestal y se dejó enfriar por un mínimo de 4 horas para su desencofrado (Fig. 23).

Figura 23.
Briquetas estándar



Fuente: Autores

Pasadas 24 horas de su desencofrado, se ejecutaron los ensayos para su caracterización mecánica descritos brevemente a continuación.

Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos (INV E 733-13)

Este ensayo es empleado para determinar la gravedad específica bulk y densidad en especímenes de mezclas asfálticas compactas. Consiste en colocar las briquetas en un baño de agua a una temperatura de 25 °C por alrededor de 4 minutos, pasado este tiempo se registra su masa bajo el agua, su peso superficialmente seco y su peso seco.

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Ecuación 7. Gravedad específica bulk de mezcla asfálticas

Donde:

A: Masa del espécimen seco, g.

B: Masa espécimen superficialmente seco, g.

C: Masa del espécimen sumergido en agua, g.

$$\text{Densidad} = \text{Gravedad específica bulk} \times 997.0$$

Ecuación 8. Densidad de mezclas asfálticas

Donde:

997.9: Densidad del agua a 25 °C en kg/m³ (0.9970 g/cm³)

Estabilidad y flujo de mezclas asfáltica en caliente empleando el equipo Marshall (INV E 748-13)

Esta norma de ensayo se utiliza para determinar la estabilidad y la resistencia la deformación plástica de briquetas. Consiste en someter cada espécimen a curado en un baño maría o en horno durante 2 horas para luego someterla a una carga en dirección perpendicular a su eje cilíndrico con el aparato Marshall (Fig. 24).

Figura 24. Aparato Marshall



Fuente: Autores

3.2.3. Fase 3: Diseño de mezcla asfáltica modificada

Después de determinar el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla convencional, se inició el diseño de la mezcla modificada con EAF y GCR dado que los materiales cuentan con propiedades diferentes. El reemplazo del agregado grueso por el material siderúrgico se trabajó por medio de volúmenes y para esto se ejecutó el ensayo descrito brevemente a continuación.

Densidad bulk (peso unitario) porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto. (INV E 217-13)

Permite establecer la densidad bulk o peso unitario en agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos en condición suelta o compacta, para hallar la densidad bulk de un agregado en estado suelto se debe llenar un recipiente en tres capas con un volumen especificado de acuerdo al tamaño del agregado (Fig. 25).

El procedimiento para hallar la densidad bulk de un agregado en estado compacto consiste en llenar un recipiente en tres capas y a cada una de ellas apisonarlas con 25 golpes en lugares escogidos al azar, el golpe debe ser suficiente para que atraviese cada capa (Fig. 26).

Figura 26. Proceso de apisonado



Fuente: Autores

Figura 25. Muestra del agregado en el recipiente



Fuente: Autores

Una vez obtenido el peso específico del agregado modificante, se reemplazó dentro del agregado grueso retenido en el tamiz de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ " con variaciones entre el 25%, 50%, 75% y 100%. Para proporcionar datos adecuados se prepararon tres briquetas por cada contenido de asfalto con el fin de conseguir el porcentaje de mejor comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada con EAF, es decir que se ejecutaron 36 briquetas en total (Tabla 8).

Tabla 8. Número de briquetas de mezcla modificada con EAF

No. DE BRIQUETAS CON AGREGADO MODIFICANTE (EAF)				
CONTENIDO DE ESCORIA	% DE ASFALTO	% óptimo del CA de la mezcla convencional		
		XX		XX
	25%	3	3	3
	50%	3	3	3
	75%	3	3	3
	100%	3	3	3
	TOTAL		36	

Fuente: Autores

Para realizar la mezcla asfalto-GCR se construyó una máquina con las características recomendadas en la tabla 9. Los componentes utilizados fueron un motor con reductor de velocidad, una estructura metálica, un calentador eléctrico, un recipiente metálico y un termómetro para asfalto TEMCA 400 (Fig. 27).

Figura 27. Máquina de mezclado asfalto-caucho



Fuente: Autores

Tabla 9. Intervalo de valores característicos recomendados para modificar el ligante con GCR

VARIABLE	MÍNIMO	MÁXIMO
Porcentaje de GCR sobre el peso del ligante	10	20
Tiempo de reacción, min	55	75
Velocidad de agitación, rpm	100	750
Temperatura de mezclado, ° C	155	170

Fuente: IDU, sección 560-11

Finalizada la ejecución del cemento asfáltico modificado y la delimitación del porcentaje de escoria se llevó a cabo el diseño de la innovadora mezcla asfáltica. Se realizó el mismo procedimiento para encontrar el porcentaje óptimo de la mezcla convencional, es decir se prepararon tres briquetas por cada contenido de asfalto para un total de 9 briquetas (Tabla 10).

Tabla 10. Número de briquetas de mezcla asfáltica modificada con EAF y GCR

MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON EAF Y GCR	
% CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON GCR	No. BRIQUETAS
4%	3
4.50%	3

5%	3
TOTAL	9

Fuente: Autores

Todas las briquetas ensambladas contaron con la caracterización mecánica y el análisis de densidad, estabilidad, flujo y relación estabilidad-flujo.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS GRUESO Y FINO (MATERIALES CONVENCIONALES)

Se presenta un análisis a cada uno de los ensayos ejecutados a los agregados pétreos para su verificación respecto a las especificaciones establecidas en el Art.450 de la norma INVIAS (Tabla 1).

Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles (INV E 218-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan que el material grueso implementado para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumple con la verificación indicada para capa de rodadura, ya que su coeficiente de desgaste fue del 19% (Tabla 11).

Tabla 11. Verificación del ensayo agregado grueso INV E 218-13

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS ART.450			% DE DESGASTE DE VERIFICACIÓN GRAVILLA	
	NT1	NT2	NT3		
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	25	25	25	19	Cumple
Capa de rodadura, 500 revoluciones					

Fuente: Autores

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

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan que el material grueso implementado para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumple con la verificación indicada para capa de rodadura, ya que su porcentaje de pérdidas fue del 8% (Tabla 12).

Tabla 12. Verificación del ensayo agregado grueso INV E 238-13

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS ART.450			% DE PÉRDIDAS DE VERIFICACIÓN GRAVILLA	
	NT1	NT2	NT3		
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)		24	20	8	Cumple
Capa de rodadura					

Fuente: Autores

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E 227-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan que el material grueso implementado para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumple con la verificación indicada para capa de rodadura, ya que su porcentaje de caras fracturadas fue del 97% para una cara y del 97% para dos caras (Tabla 13).

Tabla 13. Verificación del ensayo agregado grueso INV E 227-13

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS			% DE CARAS FRACTURADAS VERIFICACIÓN DE GRAVILLA	
	ART.450				
	NT1	NT2	NT3		
Caras fracturadas, mínimo (%)					
-Una cara: rodadura	75	75	85	97	Cumple
-Dos caras: rodadura	-	60	70	97	Cumple

Fuente: Autores

Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E 133-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan que el agregado fino (arenilla, arena y filler) implementado para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumple con la verificación indicada, ya que su porcentaje de equivalente de arena fue del 80% (Tabla 14).

Tabla 14. Verificación del ensayo agregado fino INV E 133-13

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS ART.450			% DE EQUIVALENTE VERIFICACIÓN DE ARENA	
	NT1	NT2	NT3		
Equivalente de arena, mínimo (%)	50	50	50	80	Cumple

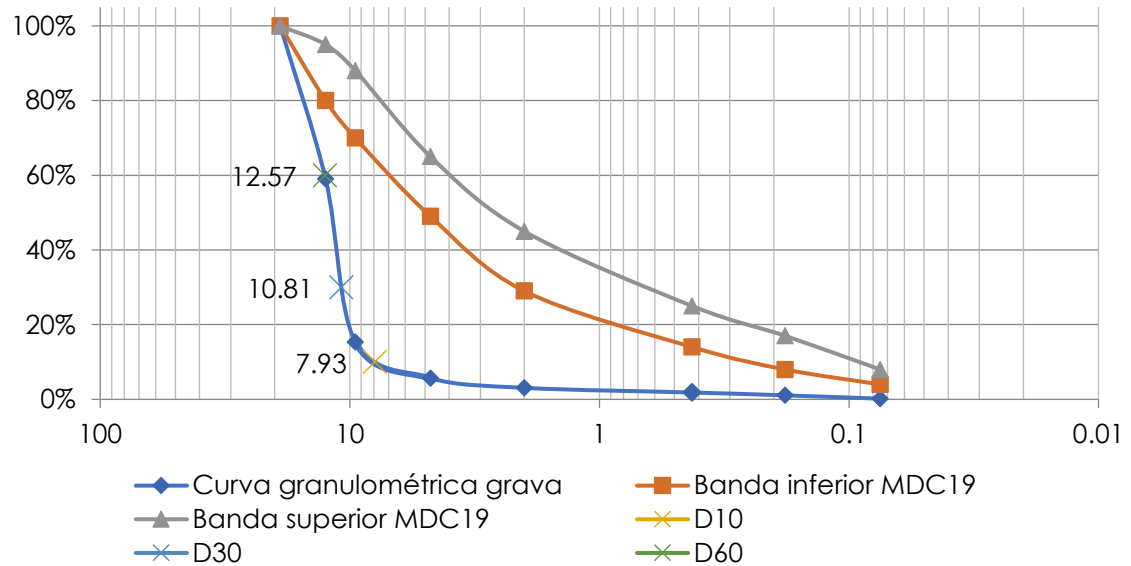
Fuente: Autores

Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E 213-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas del agregado grueso (grava) y del agregado fino (arenilla, arena y filler).

La gráfica 1 refleja la curva granulométrica del agregado grueso (grava).

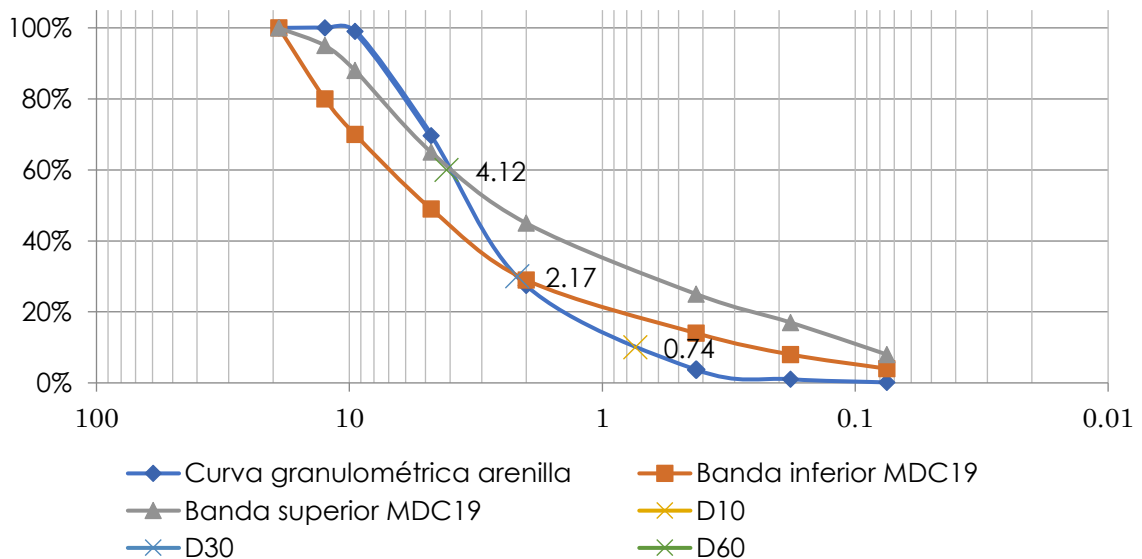
Gráfica 1. Curva granulométrica de la grava



Fuente: Autores

En la gráfica 2 se observa la curva granulométrica del agregado fino (arenilla).

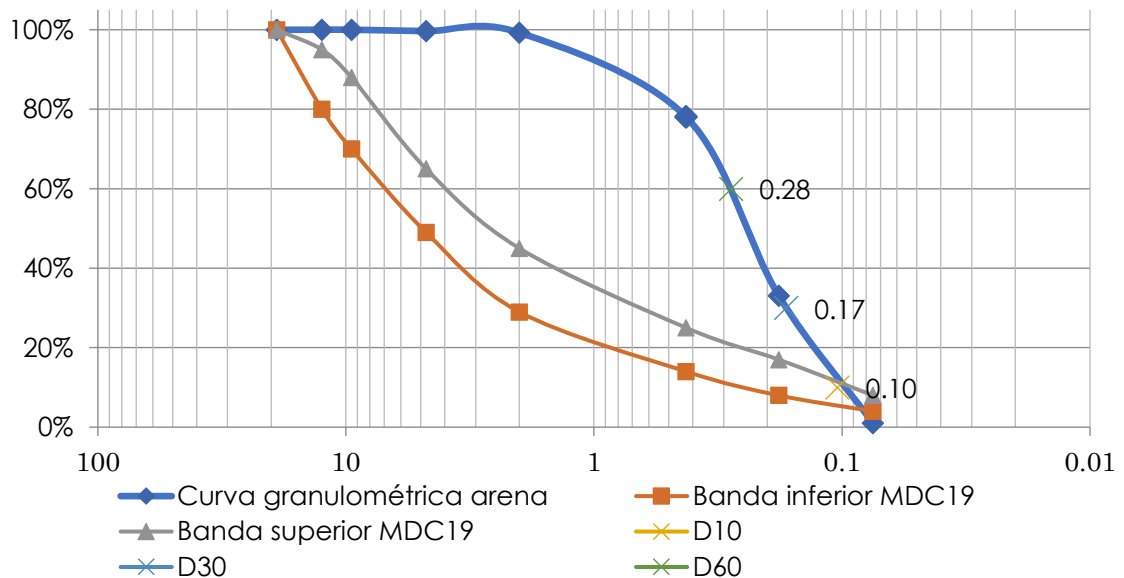
Gráfica 2. Curva granulométrica de la arenilla



Fuente: Autores

En la gráfica 3 se observa la curva granulométrica del agregado fino (arena).

Gráfica 3. Curva granulométrica de la arena



Fuente: Autores

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO MODIFICANTE

Se presenta un análisis a cada uno de los ensayos ejecutados para la EAF y su verificación respecto a las especificaciones establecidas (Tabla 1).

Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles (INV E 218-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan que el material grueso implementado para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumple con la verificación indicada para capa de rodadura, ya que el coeficiente de desgaste fue del 29% (Tabla 15).

Tabla 15. Verificación de ensayo agregado modificante INV E 218-3

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS ART.450			% DE DESGASTE DE VERIFICACIÓN EAF	
	NT1	NT2	NT3		
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	25	25	25	20	Cumple
Capa de rodadura, 500 revoluciones					

Fuente: Autores

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

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan que el material grueso implementado para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumple con la verificación indicada para capa de rodadura, ya que el porcentaje de pérdidas fue del 9% (Tabla 16).

Tabla 16. Verificación de ensayo agregado modificante INV E 238-13

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS ART.450			% DE PÉRDIDAS DE VERIFICACIÓN EAF	
	NT1	NT2	NT3		
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) Capa de rodadura		24	20	9	Cumple

Fuente: Autores

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E 227-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan que el material grueso implementado para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumple con la verificación indicada para capa de rodadura, ya que los porcentajes de caras fracturadas fueron del 85% para una cara y del 78% para dos caras (Tabla 17).

Tabla 17. Verificación de ensayo agregado modificante INV E 227-13

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS ART.450			% DE CARAS FRACTURADAS VERIFICACIÓN DE GRAVILLA	
	NT1	NT2	NT3		
Caras fracturadas, mínimo (%)					
-Una cara: rodadura	75	75	85	85	Cumple
-Dos caras: rodadura	-	60	70	78	Cumple

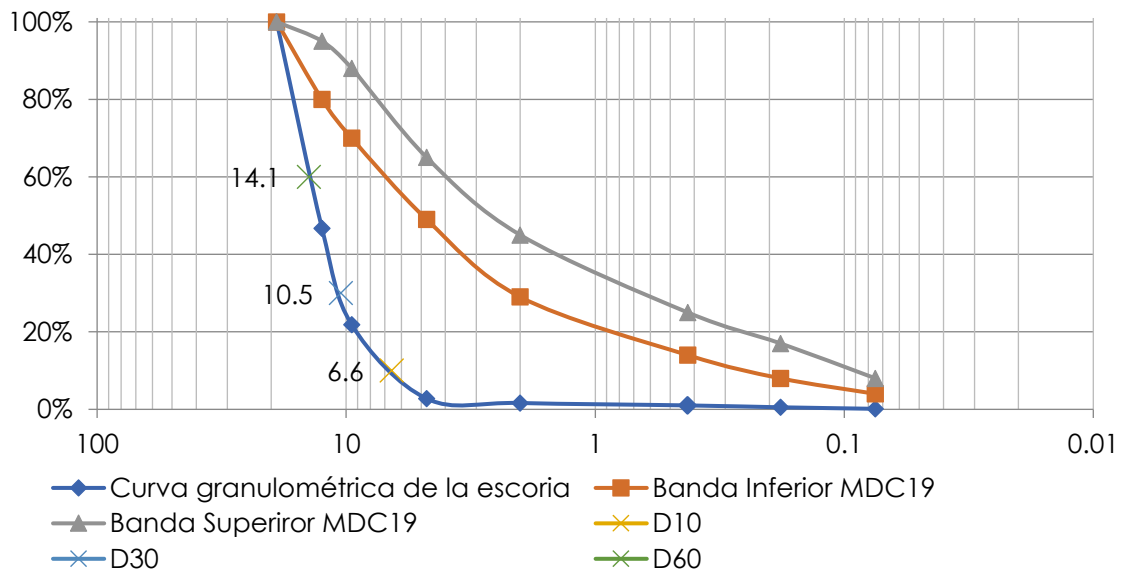
Fuente: Autores

Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E 213-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de la EAF.

En la gráfica 4 se observa la curva granulométrica del agregado grueso modificante (EAF).

Gráfica 4. Curva granulométrica de la EAF



Fuente: Autores

Análisis químico por fluorescencia de Rayos X

Los resultados obtenidos mediante este ensayo fueron aportados por la planta Gerdau Diaco (Anexo 23), donde se pudo determinar que sus principales componentes son óxido de calcio (CaO) y dióxido de silicio (SiO_2) (Tabla 18).

Tabla 18. Composición química de la EAF

COMPUESTO / ELEMENTO	COMPOSICIÓN (%)
CaO	29.60
SiO ₂	25.28
Fe ₂ O ₃	22.68
Al ₂ O ₃	7.57
MgO	5.92
MnO	2.49
SO ₃	2.17
Na ₂ O	0.80
Zn	0.77
TiO ₂	0.62
Cl	0.57
Cr	0.54
K ₂ O	0.27
P ₂ O ₅	0.24
Ba	0.20
Sr	0.08
Cu	0.05

Pb	0.05
Zr	0.04
V	0.03
Nb	40 ppm

Fuente: Autores

4.3. CARACTERIZACIÓN DEL LLENANTE MINERAL O FILLER

Se presenta un análisis a cada uno de los ensayos ejecutados para el llenante mineral (cemento hidráulico) y su verificación respecto a las especificaciones establecidas en el Art.450 de la norma INVIAS.

Densidad bulk del llenante mineral en kerosene (INV E 225-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan que el material implementado como llenante mineral es apto para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumpliendo con la verificación indicada, puesto que su densidad fue de 0.76 g/cm³ (Tabla 19).

Tabla 19. Verificación de ensayo INV E 225-13

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS ART.450			DENSIDAD BULK	VERIFICACIÓN
	NT1	NT2	NT3		
Densidad bulk (g/cm ³)	0.5 a 0.8			0.76	Cumple

Fuente: Autores

Análisis granulométrico del llenante mineral utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas (INV E 215-13)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo reflejan cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas del material implementado como llenante mineral (cemento hidráulico) y su verificación respecto a las especificaciones establecidas (Tabla 20).

Tabla 20. Verificación de granulometría del llenante mineral

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO INVIAS ART.450			GRANULOMETRÍA % PASANTE	VERIFICACIÓN
	NT1	NT2	NT3		
Granulometría del llenante mineral de aporte:					
-% que pasa tamiz No. 40		100		100	Cumple
-% que pasa tamiz No. 100		>90		100	
-% que pasa tamiz No. 200		>75		99.7	

Fuente: Autores

4.4. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Los resultados obtenidos mediante este ensayo fueron aportados por Tecniasfaltos (Anexo 24), los cuales reflejan que el cemento asfáltico implementado para la realización de mezclas asfálticas convencionales cumple con la verificación indicada para un tipo de asfalto 60-70 respecto a las especificaciones establecidas en el Art.410 de la norma INVIAS (Tabla 21).

Tabla 21. Verificación de los requisitos establecidos en el Art. 410 del INVIAS

CARACTERÍSTICA	GRADO DE PENETRACIÓN		RESULTADOS CA 60-70	VERIFICACIÓN
	60-70			
	MÍN	MÁX		
Asfalto original				
Penetración (25°C, 100g, 5 s), 0,1 mm	60	70	65	Cumple
Punto de ablandamiento, °C	48	54	48.6	Cumple
Índice de penetración	-1.2	+0.6	-0.9	Cumple
Viscosidad absoluta (60°C), P	1500	-	2630	Cumple
Ductilidad (25° C, 5 cm/min), cm	100	-	140	Cumple
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	230	-	270	Cumple

Fuente: Tecniasfaltos

4.5. DISEÑO DE CURVA GRANULOMÉTRICA Y PORCENTAJE DE ASFALTO TEÓRICO DE LA MEZCLA CONVENCIONAL

4.5.1. Estabilización granulométrica

El diseño de mezcla logrado mediante la estabilización de la granulometría fue del 27% gravilla, 54% arenilla, 15% arena y 4% llenante mineral o filler (Tabla 22).

Tabla 22. Diseño de mezcla

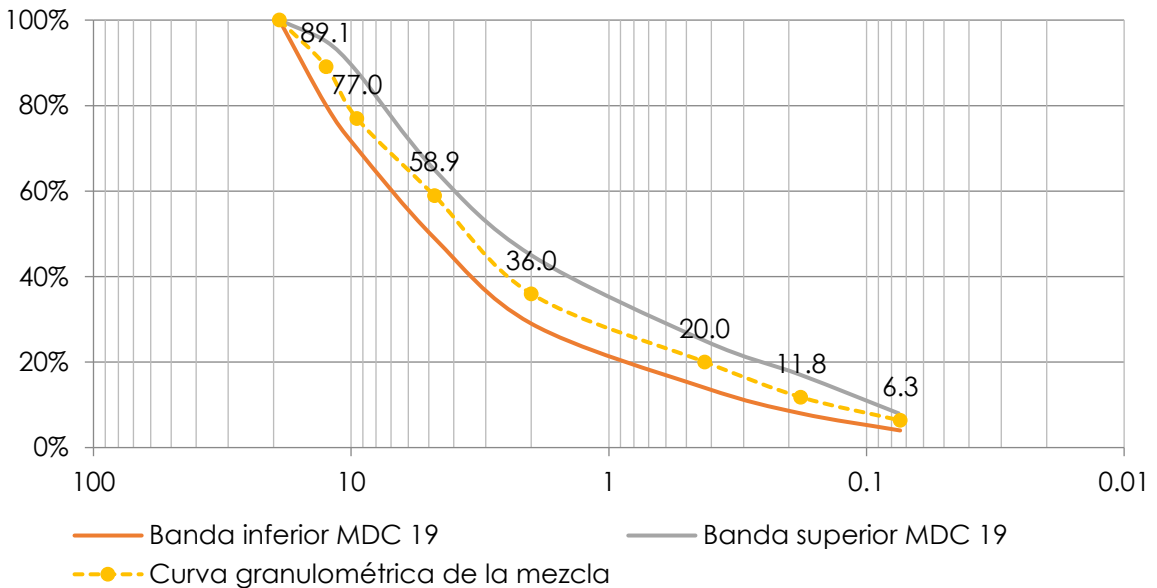
No. TAMIZ	ABERTURA TAMIZ (mm)	% QUE PASA	% RETENIDO
3/4"	19	100.000	0.00
1/2"	12.5	89.118	10.88
3/8"	9.5	77.010	12.11
# 4	4.75	58.929	18.08
# 10	2	35.969	22.96

# 40	0.425	20.038	15.93
# 80	0.18	11.810	8.23
# 200	0.074	6.349	5.46
Fondo		0	6.35

Fuente: Autores

La curva granulométrica (Grafica 5) refleja el cumplimiento de la especificación establecida para una mezcla tipo MDC-19 (Tabla 2).

Gráfica 5. Curva granulométrica de la mezcla diseñada



Fuente: Autores

4.5.2. Contenido óptimo de asfalto

Teórico

El contenido de asfalto determinado mediante la Ecuación 6, dio como resultado 4.5%.

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F$$

$$P = (0.035 \times (22.96)) + (0.045 \times (36 + 6.34)) + (0.18 \times 6.3) + 0.7$$

$$P = 4.5\%$$

4.6. DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL METODOLOGÍA MARSHALL

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto cada briqueta tuvo análisis de densidad, estabilidad, flujo y relación estabilidad-flujo (Tabla 23).

Tabla 23. Resultados de la mezcla convencional metodología Marshall

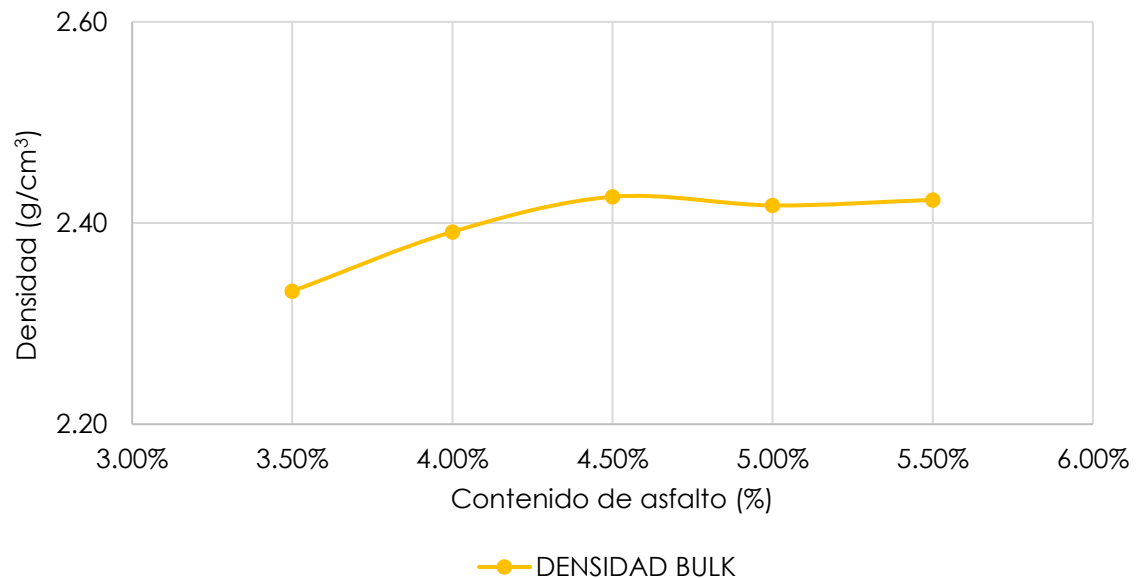
PORCENTAJE DE ASFALTO	DENSIDAD (g/cm ³)	ESTABILIDAD (kN)	FLUJO (mm)	RELACIÓN EST./FL. (kN/mm)
3.50%	2.33	11.09	4.09	2.71
4.00%	2.39	14.81	4.21	3.52
4.50%	2.43	18.72	3.80	4.93
5.00%	2.42	11.13	4.72	2.36
5.50%	2.42	12.76	6.16	2.07

Fuente: Autores

Densidad

De los resultados obtenidos mediante este, se pudo definir que el mejor comportamiento lo obtuvo el porcentaje de asfalto de 4.5% puesto que su densidad fue mayor (Gráfica 6).

Gráfica 6. Densidad de la mezcla convencional



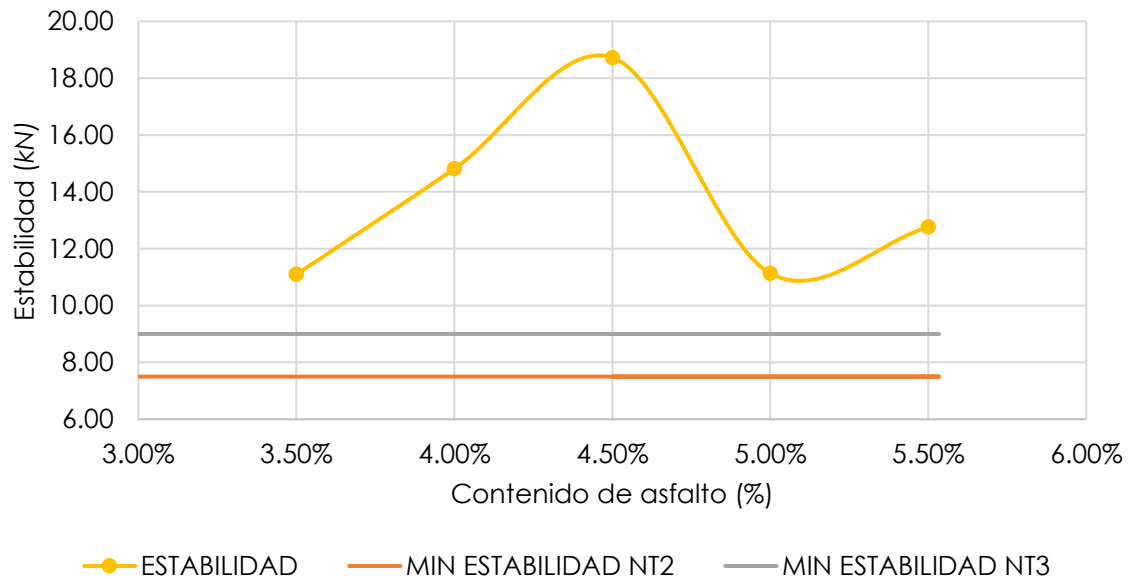
Fuente: Autores

Estabilidad

De los resultados conseguidos mediante este ensayo y expuestos en la gráfica 7, se examinaron que todos los valores obtenidos cumplen con los requisitos establecidos con la normatividad. La estabilidad más baja fue de

11.13 kN con el 5% de cemento asfáltico y la más alta fue de 18.72 kN con el 4.5% de cemento asfáltico.

Gráfica 7. Estabilidad de la mezcla convencional

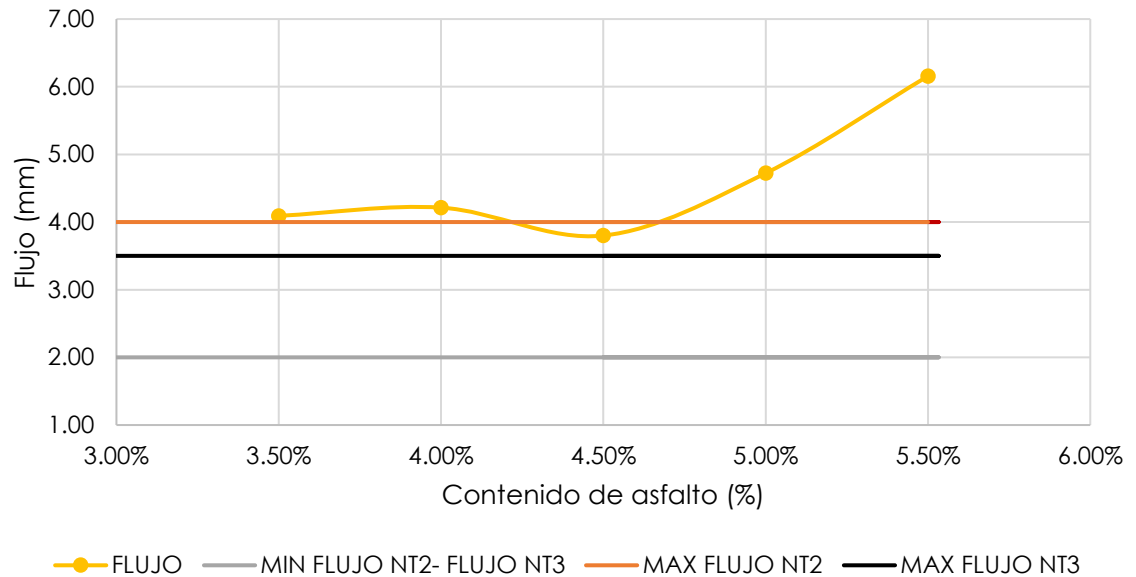


Fuente: Autores

Flujo

Mediante los resultados conseguidos en este ensayo se pudo analizar que el único porcentaje de asfalto que cumple con los requisitos mínimos es el de 4.5% , ya que su desplazamiento fue de 3.8 mm (Gráfica 8).

Gráfica 8. Flujo de la mezcla convencional

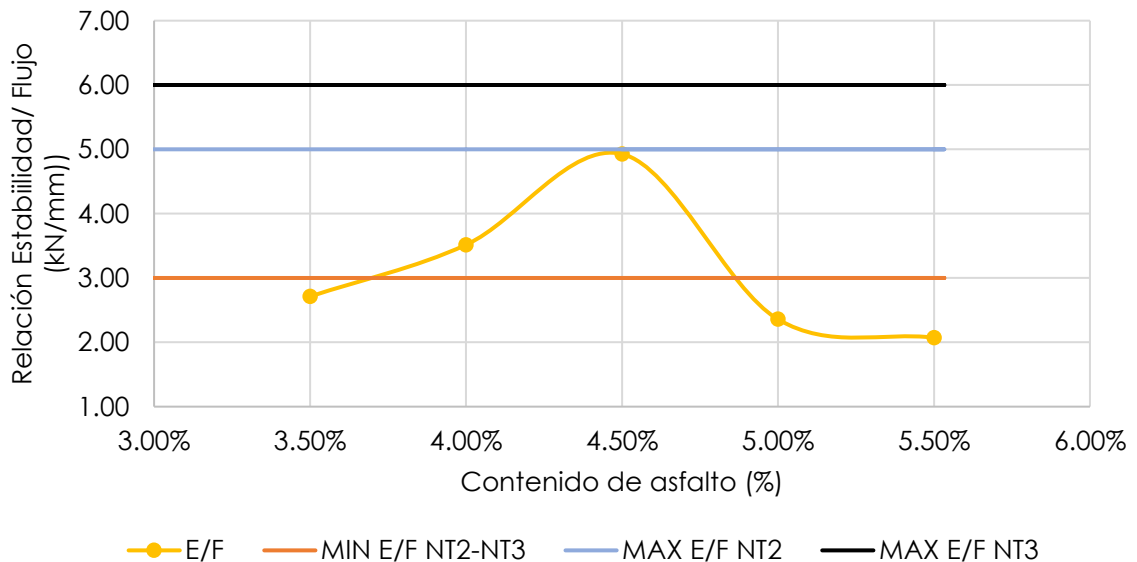


Fuente: Autores

Relación Estabilidad/Flujo

Los porcentajes de cemento asfáltico que dieron cumplimiento con los rangos establecidos por la norma fueron del 4% y 4.5% (Gráfica 9).

Gráfica 9. Relación estabilidad/flujo de la mezcla convencional



Fuente: Autores

Como análisis de los resultados anteriormente descritos, se determinó que el porcentaje óptimo de asfalto para una mezcla convencional es del 4.5%, ya que su desempeño frente a la densidad, estabilidad y flujo fue el mejor.

4.7. DISEÑO DE MEZCLA MODIFICADA CON ESCORIA METODOLOGÍA MARSHALL

Para determinar la dosis óptima de EAF cada espécimen tuvo análisis de densidad, estabilidad, flujo y relación estabilidad-flujo.

4.7.1. Mezcla modificada con 25% de EAF

En la tabla 24 se evidencian los resultados obtenidos a partir de la metodología Marshall.

Tabla 24. Resultados obtenidos de la mezcla modificada con 25% EAF metodología Marshall

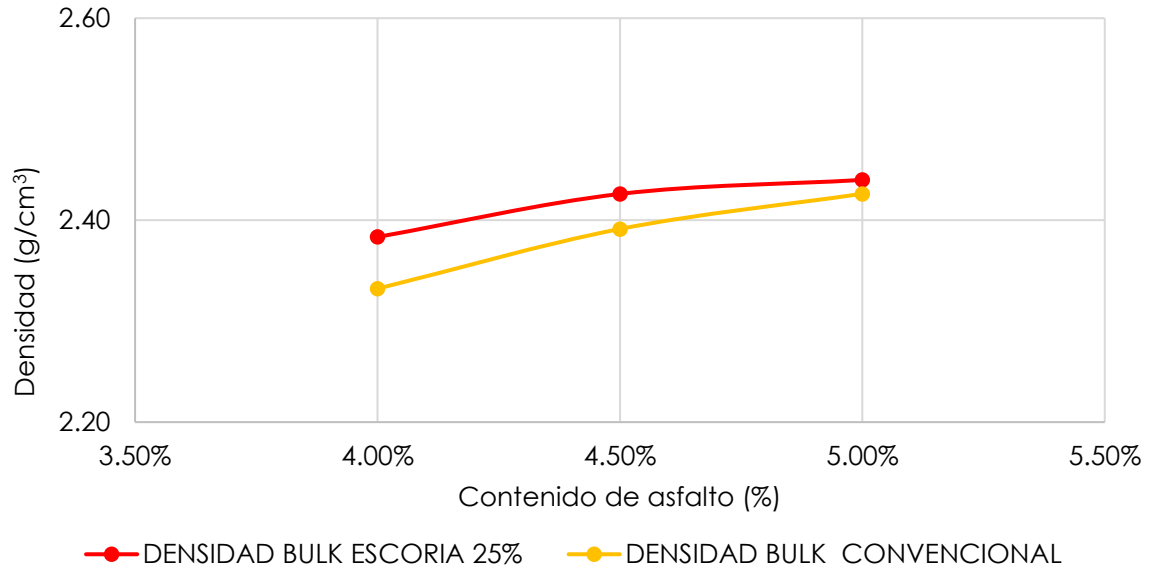
PORCENTAJE DE ASFALTO	DENSIDAD ESCORIA 25% (g/cm³)	ESTABILIDAD ESCORIA 25% (kN)	FLUJO ESCORIA 25% (mm)	E/F ESCORIA 25% (kN/mm)
4.00%	2.38	14.31	4.03	3.55
4.50%	2.43	13.95	4.45	3.14
5.00%	2.44	13.31	5.37	2.48

Fuente: Autores

Densidad

Se pudo definir que el mejor comportamiento lo obtuvo el porcentaje de asfalto del 5% puesto que su densidad fue mayor. También se hizo evidente un aumento con respecto a la mezcla convencional para todos los contenidos de asfalto propuestos (Gráfica 10).

Gráfica 10. Densidad de la mezcla modificada con 25% de EAF

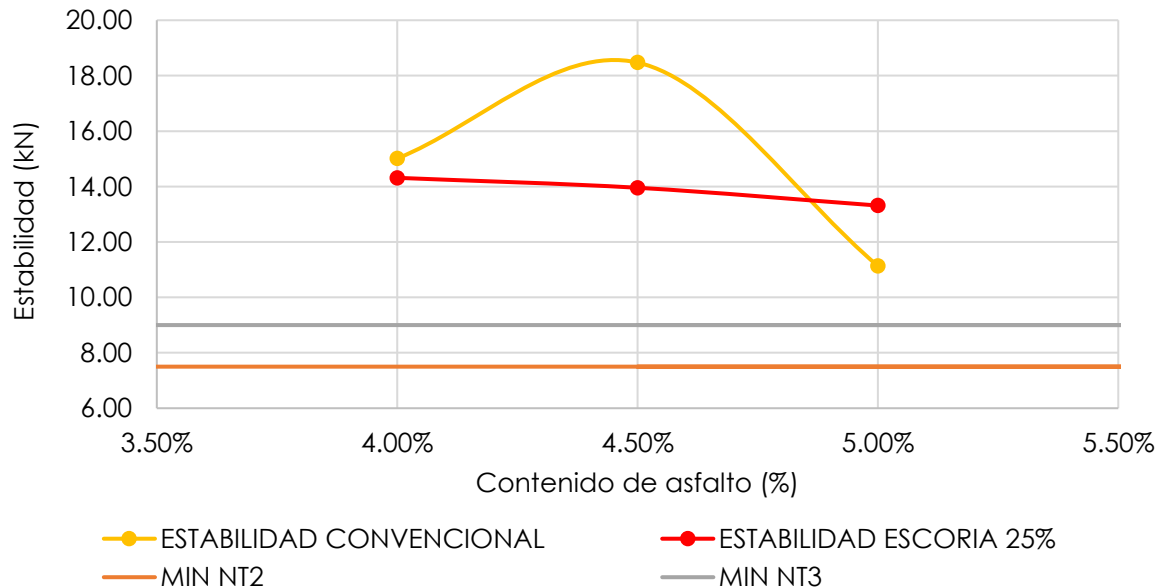


Fuente: Autores

Estabilidad

De los resultados obtenidos mediante este ensayo y expuestos en la gráfica 11 se determinó una disminución de la resistencia de la mezcla modificada en comparación con la mezcla asfáltica convencional. La estabilidad más baja fue de 13.31kN y la más alta fue de 14.31kN.

Gráfica 11. Estabilidad de la mezcla modificada con 25% de EAF

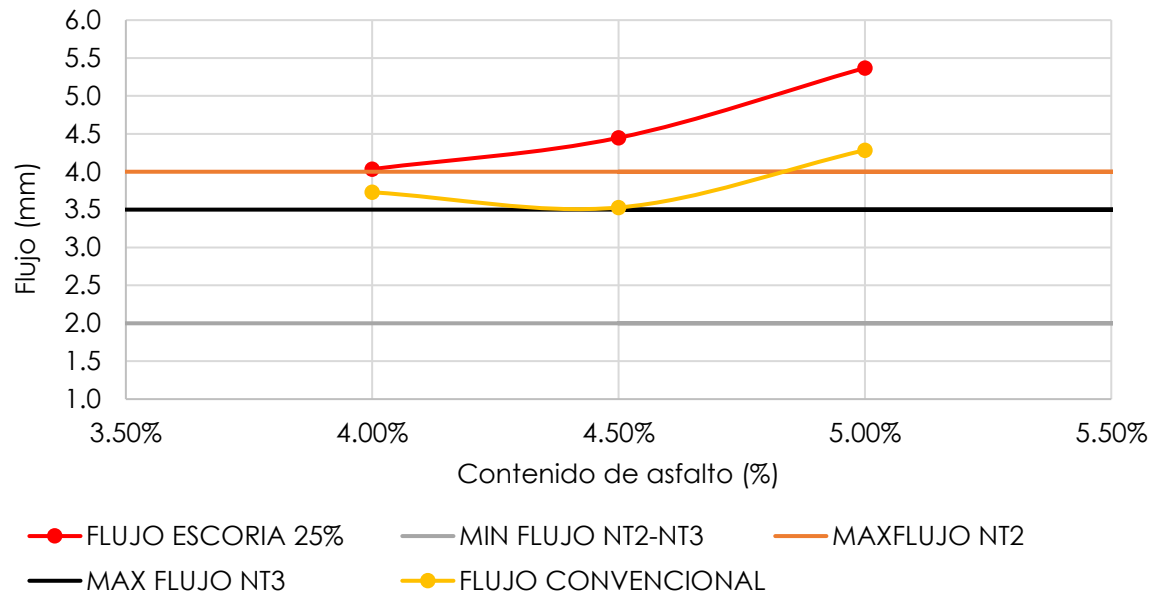


Fuente: Autores

Flujo

Se pudo considerar que el porcentaje de asfalto que produjo una menor deformación fue el de 4% sin embargo este no cumple con los requisitos mínimos.

Gráfica 12. Flujo de la mezcla modificada con 25% de EAF

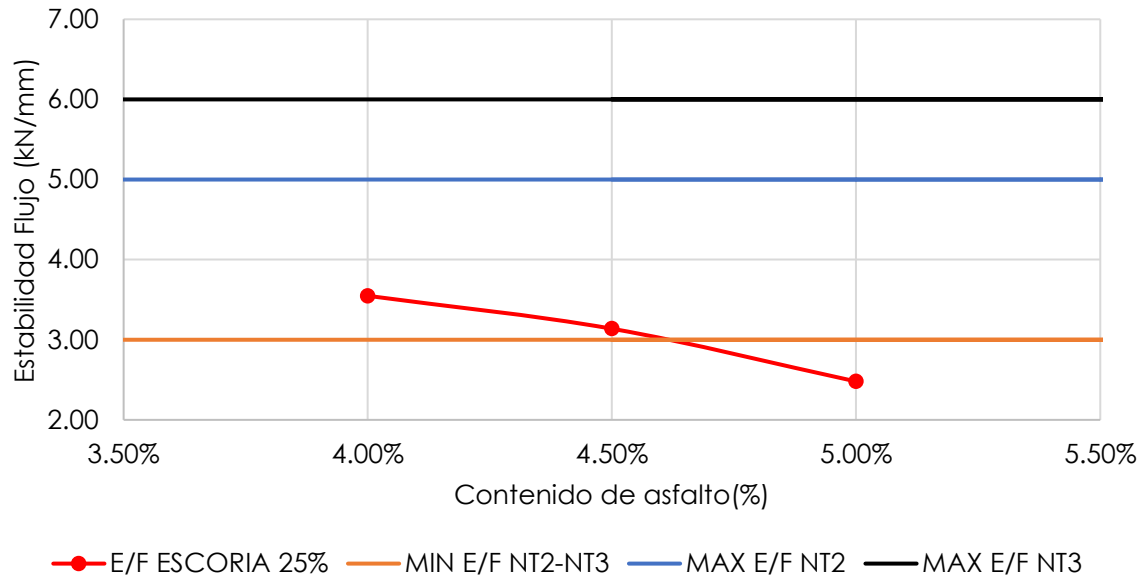


Fuente: Autores

Relación Estabilidad/Flujo

Los porcentajes de cemento asfáltico que dieron cumplimiento a los rangos establecidos por la norma fueron del 4% y 4.5% (Gráfica13).

Gráfica 13. Relación estabilidad/flujo de la mezcla modificada con 25% de EAF



Fuente: Autores

Como análisis de los resultados anteriormente descritos, se pudo determinar que todos los porcentajes de asfalto propuestos cumplen con la estabilidad mínima requerida por la normativa, sin embargo, ningún porcentaje cumple con el flujo mínimo. Por esto no se recomienda implementar el 25% de EAF en una mezcla asfáltica.

4.7.2. Mezcla modificada con 50% de EAF

En la tabla 25 se muestran los resultados obtenidos a partir de la metodología Marshall.

Tabla 25 Resultados obtenidos de la mezcla modificada con 50% de EAF metodología Marshall

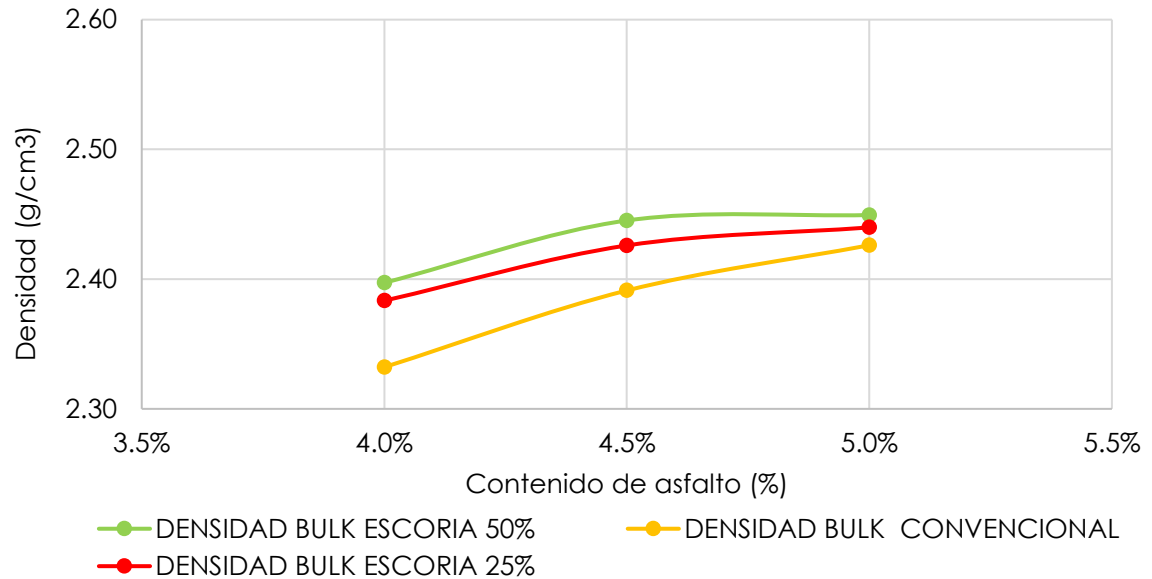
PORCENTAJE DE ASFALTO	DENSIDAD ESCORIA 50% (g/cm ³)	ESTABILIDAD ESCORIA 50% (kN)	FLUJO ESCORIA 50% (mm)	E/F ESCORIA 50% (kN/mm)
4%	2.40	12.25	3.86	3.18
4.5%	2.45	14.01	3.85	3.64
5%	2.45	12.72	5.18	2.45

Fuente: Autores

Densidad

Se hizo evidente un aumento con respecto a la mezcla convencional y a la mezcla modificada con 25% de EAF para todos los contenidos de asfalto propuestos, además se pudo definir que el mejor comportamiento lo obtuvo el porcentaje de asfalto de 5% puesto que su densidad fue mayor (Gráfica 14).

Gráfica 14. Densidad de la mezcla modificada con 50% de EAF

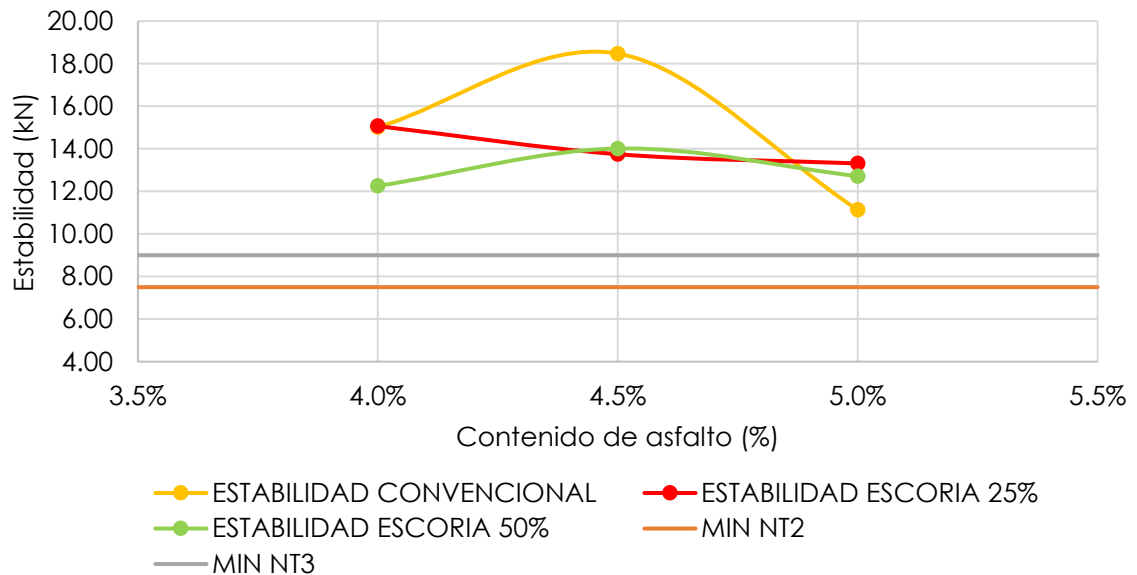


Fuente: Autores

Estabilidad

De los resultados obtenidos mediante este ensayo y expuestos en la gráfica 15 se determinó que hubo una disminución de la resistencia de la mezcla modificada con 50% de EAF en comparación con la mezcla asfáltica convencional y la mezcla modificada con 25% de EAF. La estabilidad más baja fue de 12.25 kN y la más alta fue de 14.01 kN.

Gráfica 15. Estabilidad de la mezcla modificada con 50% de EAF

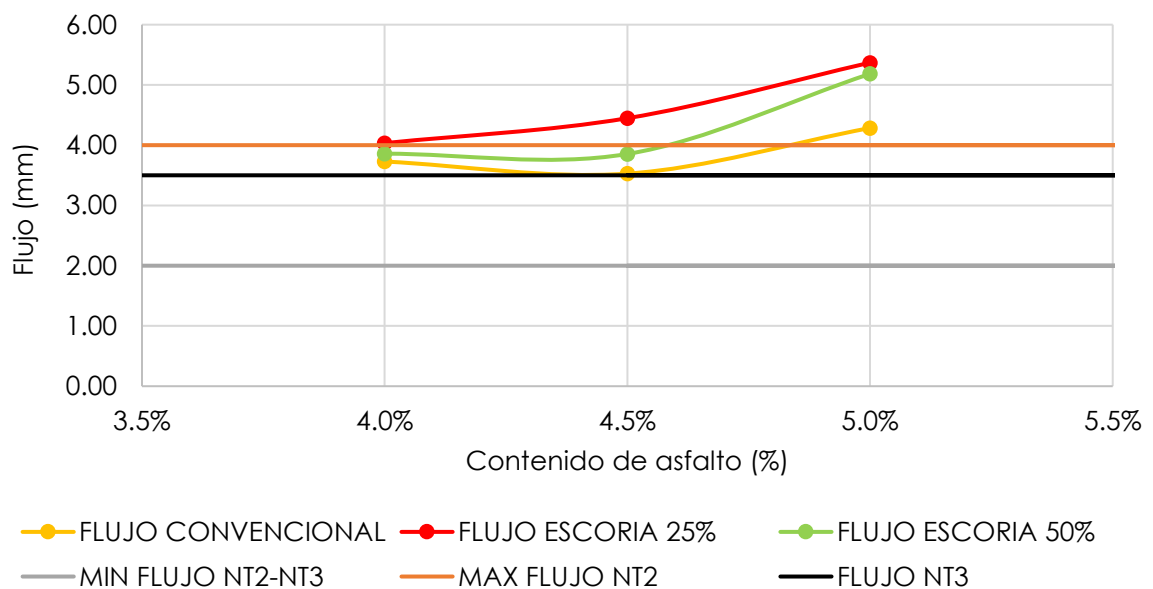


Fuente: Autores

Flujo

Se pudo determinar que los porcentajes de asfalto que dan cumplimiento a los requisitos mínimos son 4% y 4.5% con resultados de 3.83 mm y 4 mm respectivamente (Gráfica 16).

Gráfica 16. Flujo de la mezcla modificada con 50% de EAF

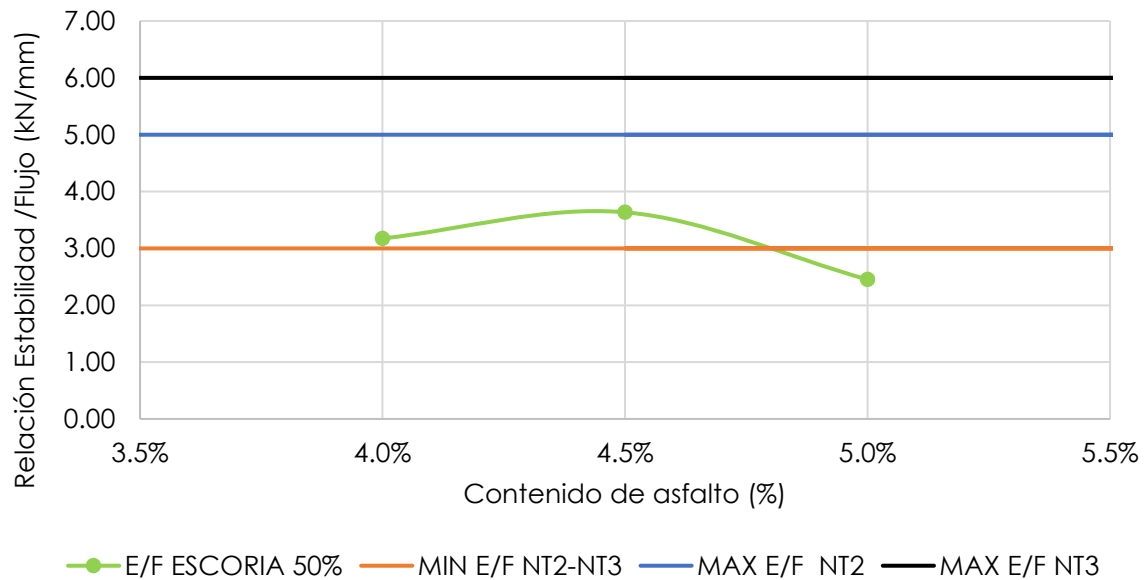


Fuente: Autores

Relación Estabilidad/Flujo

Los porcentajes de cemento asfáltico que dieron cumplimiento a los rangos establecidos por la norma fueron del 4% y 4.5% (Gráfica 17).

Gráfica 17. Relación estabilidad/flujo de la mezcla modificada con 50% de EAF



Fuente: Autores

Como análisis de los resultados anteriormente descritos, se pudo determinar que todos los porcentajes de asfalto propuestos cumplen con la estabilidad mínima requerida por la normativa. Es de resaltar que el menor flujo y la mayor densidad la obtuvo el porcentaje de asfalto de 4.5% por estas razones puede llegar a implementarse esta dosificación.

4.7.3. Mezcla modificada con 75% de EAF

En la tabla 26 se muestran los resultados obtenidos a partir de la metodología Marshall.

Tabla 26. Resultados obtenidos de la mezcla modificada con 75% de EAF metodología Marshall

PORCENTAJE DE ASFALTO	DENSIDAD ESCORIA 75% (g/cm ³)	ESTABILIDAD ESCORIA 75% (kN)	FLUJO 75% ESCORIA (mm)	E/F ESCORIA 75% (kN/mm)
4%	2.45	16.09	3.79	4.24
4.5%	2.46	13.44	3.81	3.53

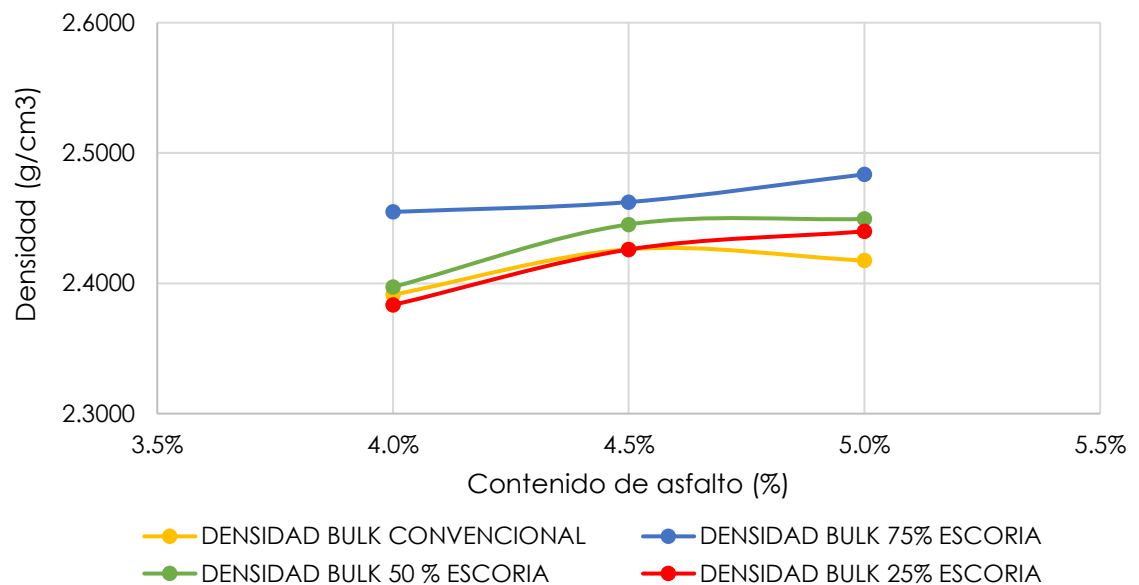
5%	2.48	14.28	4.30	3.32
----	------	-------	------	------

Fuente: Autores

Densidad

Se hizo evidente un aumento con respecto a la mezcla convencional y la mezcla modificada con el 25% y 50% de EAF para todos los contenidos de asfalto propuestos. Además, se pudo definir que el mejor comportamiento lo obtuvo el porcentaje de asfalto del 5%, puesto que su densidad fue mayor (Gráfica 18).

Gráfica 18. Densidad de la mezcla modificada con 75% de EAF



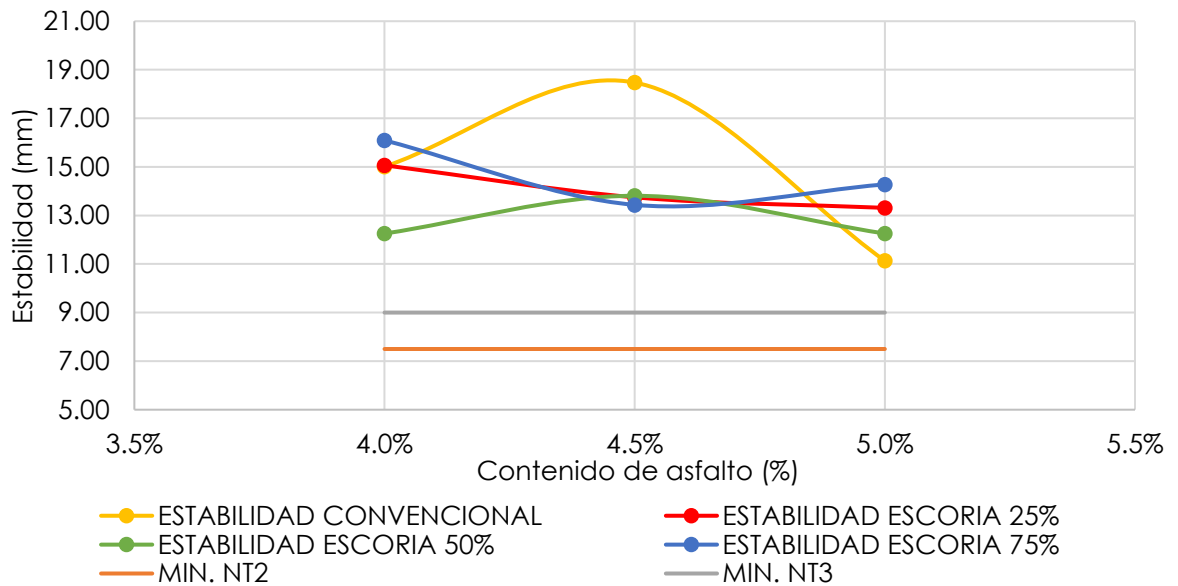
Fuente: Autores

Estabilidad

De los resultados obtenidos mediante este ensayo y expuestos en la gráfica 19 se analizó que los porcentajes del 4% y 5% de asfalto tuvieron un aumento

en comparación con la mezcla asfáltica convencional y la mezcla modificada con el 25% y 50% de EAF.

Gráfica 19. Estabilidad de la mezcla modificada con 75% de EAF

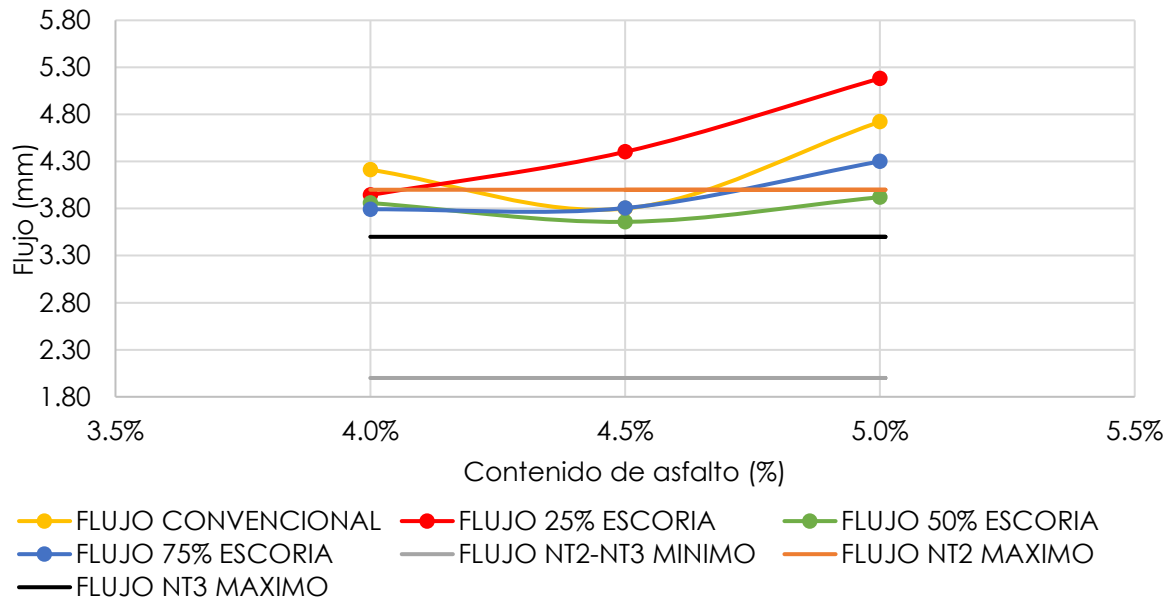


Fuente: Autores

Flujo

Se pudo determinar que los porcentajes de asfalto que dan cumplimiento a los requisitos mínimos son 4% y 4.5% con resultados de 3.79 mm y 3.81 mm respectivamente (Gráfica 20).

Gráfica 20. Flujo de la mezcla modificada con 75% de EAF

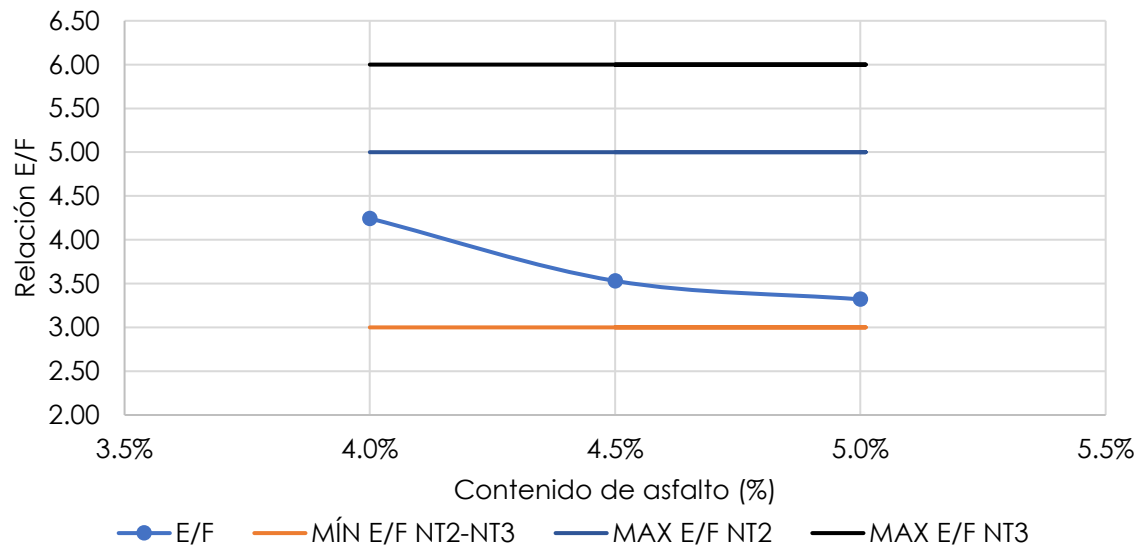


Fuente: Autores

Relación Estabilidad/Flujo

De los resultados obtenidos mediante este ensayo se evidencia que todos los porcentajes de cemento asfáltico dieron cumplimiento a los rangos establecidos por la norma (Gráfica 21).

Gráfica 21. Relación estabilidad/flujo de la mezcla modificada con 75% de EAF



Fuente: Autores

A partir de los resultados de los análisis anteriormente descritos se determinó que todos los porcentajes de asfalto propuestos cumplieron con la estabilidad mínima requerida. También se hizo evidente que solo los porcentajes de 4% y 4.5% de asfalto aprobaron los requisitos permitidos en el flujo, sin embargo, el porcentaje de 4.5% presento una mayor densidad. Por esto se recomienda usar este porcentaje de asfalto junto con el 75% de EAF para una mezcla densa en caliente tipo 19.

4.7.4. Mezcla modificada con 100% de EAF

En la tabla 27 se muestran los resultados obtenidos a partir de la metodología Marshall.

Tabla 27. Resultados obtenidos de la mezcla modificada con 100% de EAF metodología Marshall

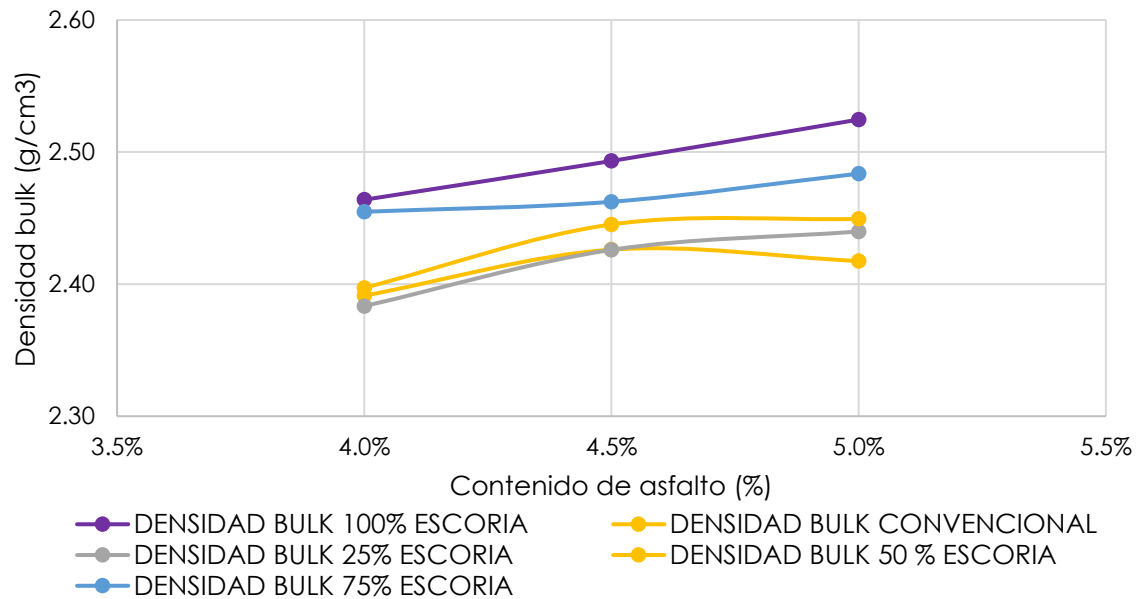
PORCENTAJE DE ASFALTO	DENSIDAD ESCORIA 100% (g/cm ³)	ESTABILIDAD ESCORIA 100% (kN)	FLUJO 100% ESCORIA (mm)	E/F ESCORIA 100% (kN/mm)
4%	2.46	16.45	4.44	4.02
4.5%	2.49	15.55	4.47	3.97
5%	2.52	15.20	5.19	3.21

Fuente: Autores

Densidad

Se hizo evidente un aumento con respecto a la mezcla convencional y la mezcla modificada con el 25%, 50% y 75% de EAF para todos los contenidos de asfalto propuestos. También se pudo definir que el mejor comportamiento lo obtuvo el porcentaje de asfalto del 5% puesto que su densidad fue mayor (Gráfica 22).

Gráfica 22. Densidad de la mezcla modificada con 100% de EAF

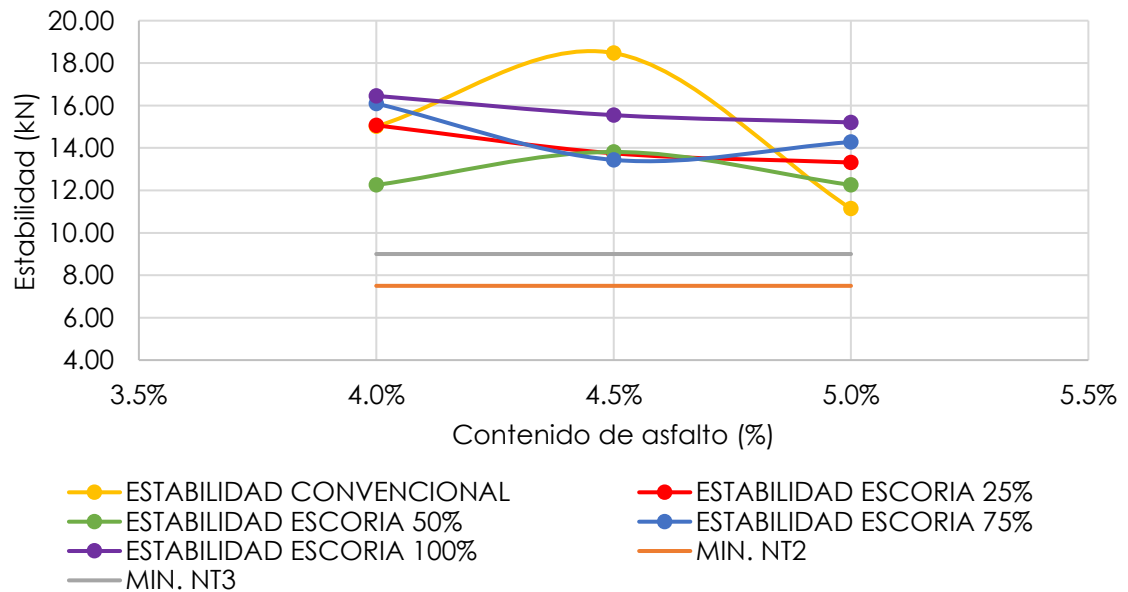


Fuente: Autores

Estabilidad

De los resultados obtenidos mediante este ensayo y expuestos en la gráfica 23 se analizó que los porcentajes del 4% y 5% de asfalto tuvieron un aumento en comparación con la mezcla asfáltica convencional y la mezcla modificada con el 25%, 50% y 75% de EAF.

Gráfica 23. Estabilidad de la mezcla modificada con 100% de EAF

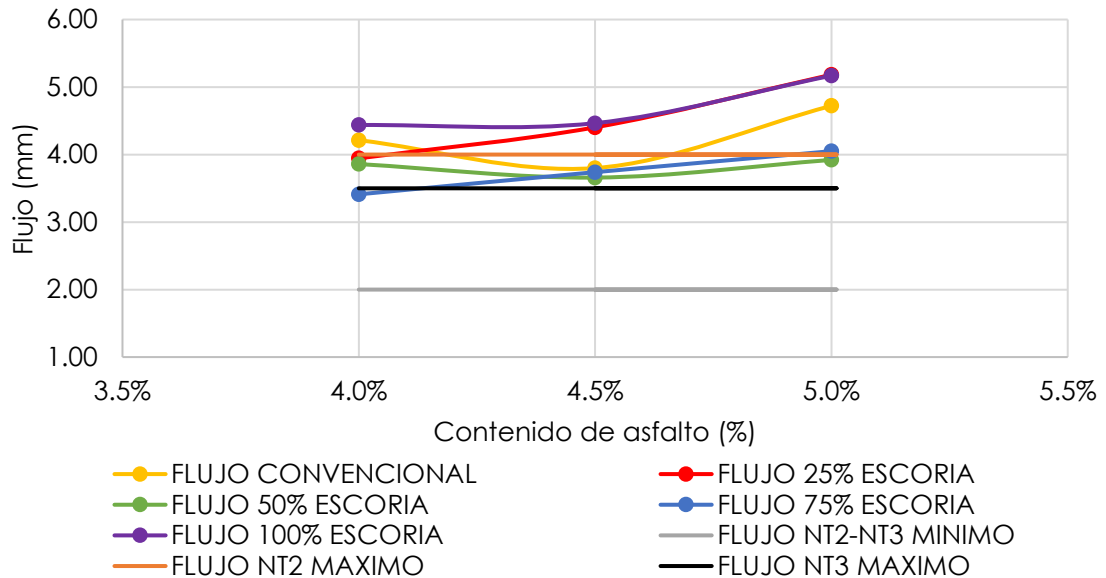


Fuente: Autores

Flujo

Por medio de los resultados obtenidos en este ensayo se pudo determinar que ningún porcentaje de asfalto propuesto cumplió con los requisitos mínimos establecidos por la normativa.

Gráfica 24. Flujo de la mezcla modificada con 100% de EAF

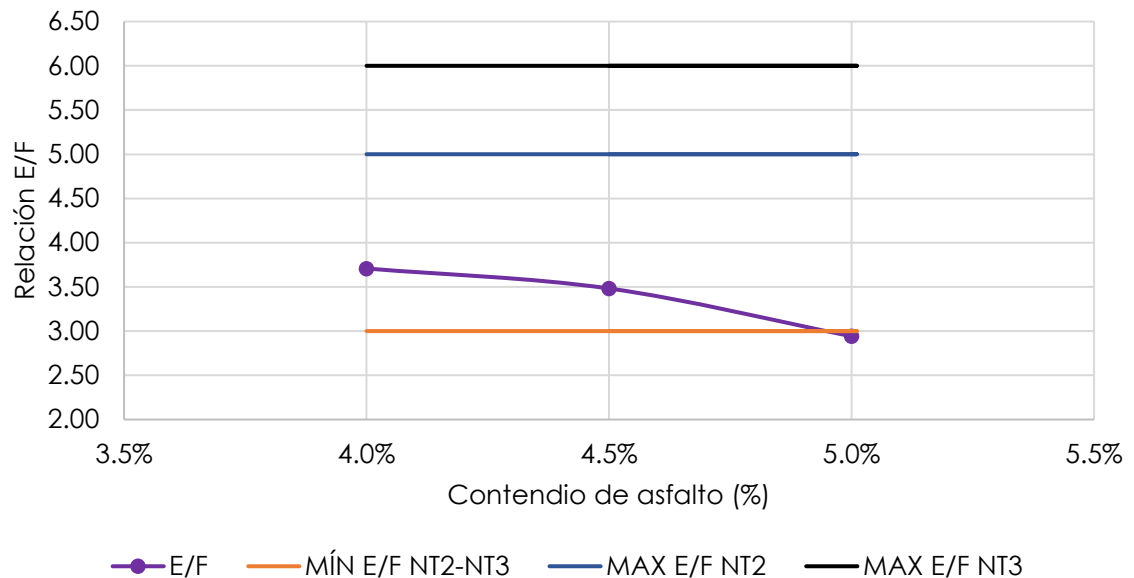


Fuente: Autores

Relación Estabilidad/Flujo

De los resultados conseguidos en el ensayo de estabilidad y flujo se pudo determinar que los porcentajes de cemento asfáltico que dieron cumplimiento a los rangos establecidos por la norma fueron del 4% y 4.5% (Gráfica 25).

Gráfica 25. Relación estabilidad/flujo de la mezcla modificada con 100% de EAF



Fuente: Autores

Como análisis de los resultados anteriormente descritos, se pudo determinar que todos los porcentajes de asfalto propuestos cumplen con la estabilidad mínima requerida por la normativa, sin embargo, en términos de flujo ningún porcentaje cumplió, por dicha razón no se recomienda implementar el 100% de EAF como agregado grueso en las mezclas asfálticas.

Se estableció que el contenido de escoria óptimo sería el de 75%, ya que este logró los mejores estándares en cuanto a densidad, estabilidad, flujo y relación estabilidad/flujo en comparación con las mezclas modificadas con 25%, 50% y 100% de EAF.

4.8. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON 10% DE GCR

Los resultados obtenidos fueron adoptados de literatura existente de cementos asfálticos modificados con el 10% de GCR (Tabla 28 y 29).

Tabla 28. Verificación de propiedades del cemento asfáltico modificado con 10% de GCR

PROPIEDADES	GRADO DE PENETRACIÓN			RESULTADOS
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	

	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	
Penetración (25°C, 100g, 5 s), 0,1 mm	25	75	25	75	50	100	41
Punto de ablandamiento, °C	52	58	48	54	45	52	57*
Viscosidad absoluta (60°C), P	2000	-	1500	-	1000	-	5554.6*

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADOS
Asfalto original ya modificado con GCR				
Penetración a 25°C, 1/10 mm	INV E-706-07	40	70	41
Punto de ablandamiento, °C	INV E-712-07	52	-	57*

Fuente: Autores y (Pineda Rodriguez & Rey Moreno, 2012)*

Tabla 29. Ensayos de verificación de asfalto modificado con GCR

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO
Penetración 25°C, 100g, 5seg	57 ASTM:D5-97 60-70
Ductilidad 25°	69 ASTM:D113 >75
Punto de Ablandamiento	57 ASTM:D36 40-55
Gravedad específica 27°	1.03 ASTM:D70 >0.99
Viscosidad 135° (cSt)	412 ASTM:D2170 >150

Fuente: (Bansal *et al.*, 2017)

4.9. DISEÑO DE MEZCLA MODIFICADA CON ESCORIA NEGRA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO Y GRANO DE CAUCHO RECICLADO METODOLOGÍA MARSHALL

Para determinar la dosis óptima del cemento asfáltico modificado con 10% de GCR, cada espécimen tuvo un análisis de densidad, estabilidad, flujo y relación estabilidad-flujo.

La tabla 30 evidencia los resultados obtenidos a partir de la metodología Marshall.

Tabla 30. Resultados obtenidos de la modificación con EAF y GCR metodología Marshall

PORCENTAJE DE ASFALTO	DENSIDAD ESCORIA 75% CON GCR (g/cm ³)	ESTABILIDAD ESCORIA 75% CON GCR (kN)	FLUJO 75% ESCORIA CON GCR (mm)	E/F ESCORIA CON GCR (kN/mm)
-----------------------	---	--------------------------------------	--------------------------------	-----------------------------

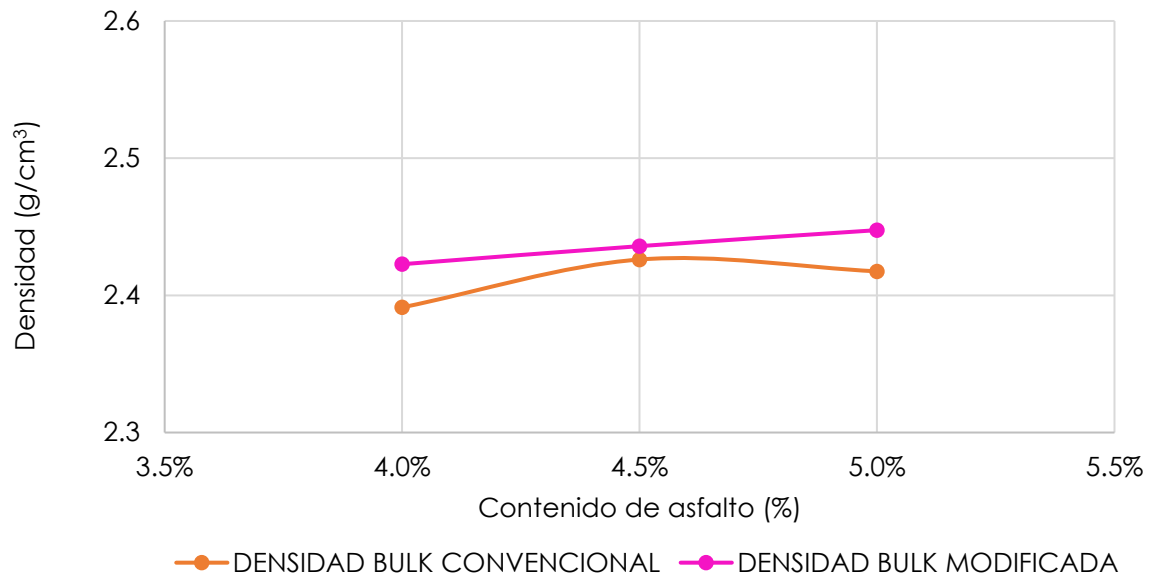
4%	2.42	20.52	4.41	4.65
4.5%	2.44	18.14	4.46	4.07
5%	2.45	19.00	4.89	3.88

Fuente: Autores

Densidad

Se hizo evidente un aumento con respecto a la mezcla convencional para todos los contenidos de asfalto propuestos, además se pudo definir que el mejor comportamiento lo obtuvo el porcentaje de asfalto de 5% puesto que su densidad fue mayor (Gráfica 26).

Gráfica 26. Densidad de la mezcla modificada con 75% de EAF y 10% GCR



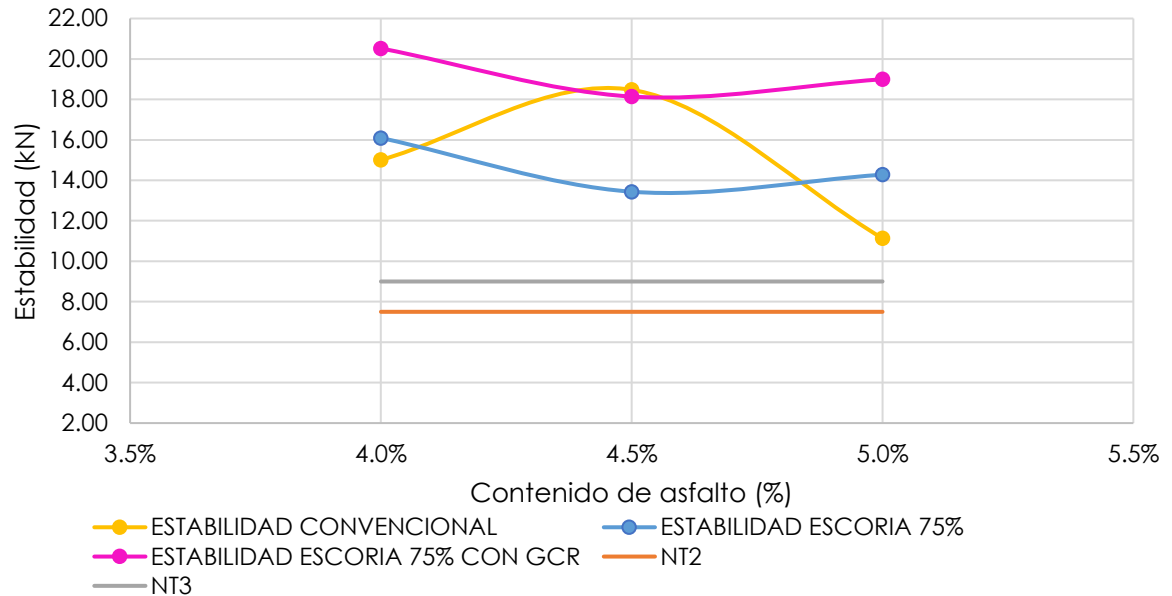
Fuente: Autores

Estabilidad

De los resultados obtenidos mediante este ensayo y expuestos en la gráfica 27 se analizó que los porcentajes de 4% y 5% de asfalto tuvieron un aumento significativo en comparación con la mezcla asfáltica convencional y la mezcla modificada con 75% de EAF. En cuanto al porcentaje de cemento

asfáltico de 4.5% tuvo un comportamiento bastante similar que el de la mezcla convencional.

Gráfica 27. Estabilidad de la mezcla asfáltica modificada con 75% de EAF y 10 % de GCR

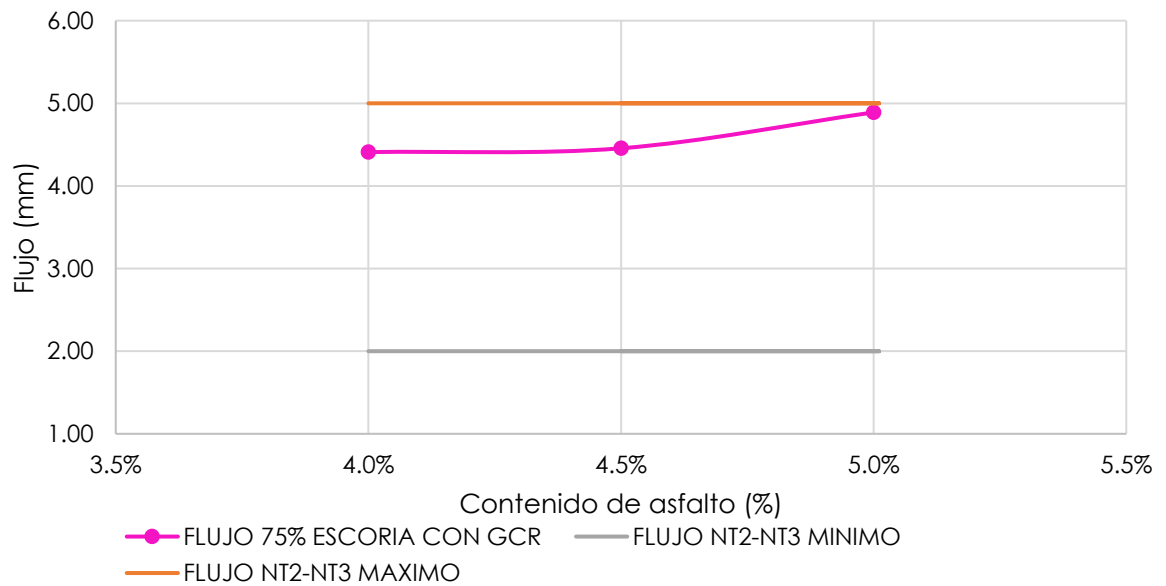


Fuente: Autores

Flujo

Según los resultados evidenciados en la gráfica 28 se pudo definir que todos los porcentajes de asfalto propuestos cumplen con el requisito. Dado que la norma INVIAS en el Art.450 indica que "para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros, se podrá aceptar un valor de flujo mayor (hasta 5 mm)"

Gráfica 28. Flujo de la mezcla modificada con 75% de EAF y 10% de GCR

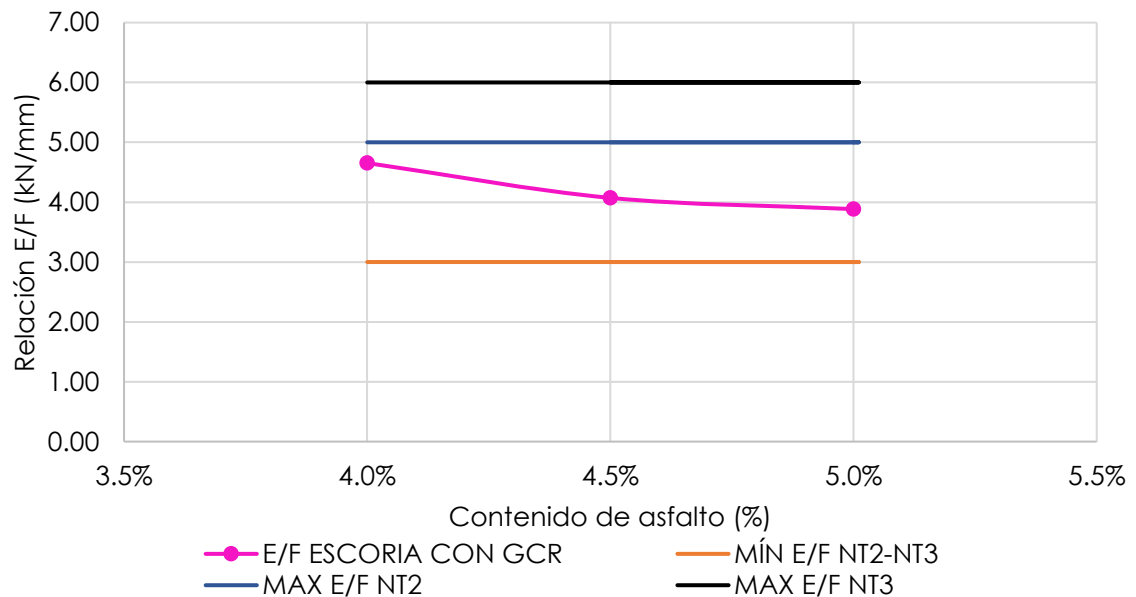


Fuente: Autores

Relación Estabilidad/Flujo

Se evidencia que todos los porcentajes de cemento asfáltico dieron cumplimiento a los rangos establecidos por la norma (Gráfica 29).

Gráfica 29. Relación de estabilidad/flujo de la mezcla asfáltica modificada con 75% de EAF y 10% de GCR



Fuente: Autores

Como análisis de los resultados anteriormente descritos, se pudo determinar que todos los porcentajes de asfalto propuestos cumplen con la estabilidad, el flujo y están dentro de los rangos establecidos para niveles de tránsito 2 y 3, además se hizo evidente un mejor comportamiento mecánico en comparación con una mezcla asfáltica convencional. Por estas razones se puede implementar un tipo de mezcla asfáltica densa en caliente con variaciones en el agregado grueso de 75% de EAF y modificaciones en el cemento asfáltico de 10% de GCR.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Se considera conveniente la implementación de la EAF junto con el GCR en una mezcla asfáltica densa en caliente tipo 19, si su dosificación es del 75% de EAF para el agregado grueso y un porcentaje de asfalto tipo 60-70 modificado con el 10% de GCR del 4.5%.

A partir de la ejecución de los ensayos pertinentes para la caracterización de los diferentes tipos de agregados implementados, se pudo definir que estos cumplen con lo establecido en el art. 450-13 del INVIAS (Tabla 1), garantizando así que la mezcla asfáltica no presente problemas de trabajabilidad, inestabilidad, durabilidad y de resistencia al deslizamiento.

En cuanto a las mezclas modificadas con EAF, cabe resaltar que se puede llegar a efectuar una dosificación del 50% de EAF y del 50% de agregado grueso convencional junto con el 4.5% de cemento asfáltico, si y solo si su propósito es causar un menor impacto ambiental, ya que esta proporción cumple con las especificaciones establecidas por la norma INVIAS, pero no supera el comportamiento mecánico de una mezcla convencional.

Otra dosificación que se distinguió fue la fabricada con el 75% de EAF y el 4.5% de cemento asfáltico, pues esta presentó el mejor comportamiento en comparación con la mezcla asfáltica convencional y las mezclas modificadas con el 25%, 50% y 100% de EAF.

Respecto a la parte ambiental evaluada, se pudo concluir que las mezclas fabricadas con EAF no se consideran residuos peligrosos o desechos tóxicos en cuanto a su lixiviación, ya que se encuentran por debajo de los límites permitidos. Con esto se confirma que puede ser una alternativa viable para ocasionar un menor impacto ambiental.

Finalmente, con los resultados obtenidos en esta investigación se demostró que desde el punto de vista mecánico y ambiental evaluado es posible la incorporación de la EAF como alternativa parcial del agregado grueso y del GCR como modificante del cemento asfáltico en las mezclas densas en caliente tipo 19, ya que presentó un mejoramiento en comparación con la mezcla asfáltica convencional y las mezclas modificadas con el 25%, 50%, 75% y 100% de la EAF.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda realizar ensayos de propiedades volumétricas, adherencia, resistencia al ahuellamiento, módulo resiliente y resistencia a la fatiga con el fin de proporcionar la verificación al diseño preliminar de la mezcla conformada por el 75% de agregado grueso y del 4.5% de cemento asfáltico modificado con el 10% de GCR.

Como la dosificación del 50% de EAF y del 50% de agregado grueso convencional junto con el 4.5% de cemento asfáltico cumplieron con las especificaciones de la norma INVIAS, se recomienda realizar la modificación del cemento asfáltico implementada en esta investigación y establecer su comportamiento mecánico en comparación con una mezcla convencional.

GLOSARIO

1. **AC:** Asphalt Cement por sus siglas en inglés o Cemento Asfáltico.
2. **ASFALTO:** Material cementante, de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes de origen natural u obtenidos por refinación del petróleo
3. **AHUELLAMIENTO:** Surcos o huellas que se presentan en la superficie de rodadura de una carretera pavimentada o no pavimentada y que son el resultado de la consolidación o movimiento lateral de los materiales por efectos del tránsito.
4. **ABRASIÓN:** Desgaste mecánico de agregados y rocas resultante de la fricción y/o impacto.
5. **AGREGADO FINO:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
6. **AGREGADO GRUESO:** Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No.4).
7. **AGLOMERANTE:** Material capaz de unir partículas de material inerte por efectos físicos o transformaciones químicas o ambas.
8. **BITUMEN:** Un tipo de sustancia cementante de color negro u oscuro (sólida, semisólida, o viscosa), natural o fabricada, compuesta principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, siendo típicos los asfaltos, las breas (o alquitranes), los betunes y las asfaltitas.
9. **BRIQUETA:** Es un cilindro de 63.5 mm de altura por 4" de diámetro hecho de la combinación de agregados finos y gruesos mezclado con un material ligante (cemento asfáltico)
10. **BOF:** Las escorias siderúrgicas de convertidores
11. **CAPA DE RODADURA:** Capa superior del pavimento formado por mezclas bituminosas
12. **CONCRETO ASFÁLTICO:** Mezcla procesada, compuesta por agregados gruesos y finos, material bituminoso y de ser el caso aditivo de acuerdo a diseño y especificaciones técnicas. Es utilizada como capa de base o de rodadura y forma parte de la estructura del pavimento.
13. **CUARTEO:** Procedimiento para reducir la muestra de un material con el fin de conseguir una muestra representativa de dicho material.
14. **CURVA GRANULOMÉTRICA:** Representación gráfica de la distribución de tamaños de las partículas que forman dicho material.
15. **DENSIDAD BULK:** Es la masa del material por metro cúbico del material a una determinada temperatura, generalmente 25 °C.
16. **DOSIFICACIÓN:** Consiste en establecer las porciones apropiadas de varios materiales.
17. **DUCTILIDAD:** Propiedad de una sustancia de ser estirada o estrechada en forma delgada. Aun cuando la ductilidad se considera como una característica importante del cemento asfáltico en muchas de sus

aplicaciones, la presencia o ausencia de ductilidad es generalmente considerada más importante que el mismo grado de ductilidad.

18. EAF: Escoria Negra de Horno de Arco eléctrico.

19. ESCORIA: Residuo siderúrgico de la producción de acero.

20. ESTABILIDAD: Es la capacidad de una mezcla asfáltica para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetida

21. ENSAYO MARSHALL: Procedimiento para obtener el contenido de asfalto y diferentes parámetros de calidad de una mezcla bituminosa.

22. ESPECIFICACIONES: Recopilación de disposiciones y requisitos para la ejecución de una obra.

23. FLUJO: Es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

24. FILLER: También conocido como llenante mineral, es un material no plástico de tamaño arcilla es decir pasa por el tamiz No 200.

25. GCR: Grano de caucho reciclado, residuo producto del reencauche de llantas.

26. GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK: Es la relación entre la masa de un volumen dado de material y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

27. KEROSENE: Es un líquido transparente destilado del petróleo natural

28. MEZCLA ASFÁLTICA: Generalmente compuesta por agregados pétreos o materiales granulares ligados con productos asfálticos los cuales deben ser inertes y provienen de depósitos naturales, generalmente requieren de procesos de trituración para ser utilizados.

29. MDC-19: Mezcla Densa Caliente tipo 19.

30. PAVIMENTOS: Son un conjunto de capas superpuestas diseñadas para resistir las cargas impuestas por el tránsito, además las condiciones ambientales

BIBLIOGRAFÍA

- Ambiental, C., Empresarial, D., Ambiental, S., El, S., Actual, M., Usados, T., Por, G., Parque, E. L., & Bogotá, A. D. E. (2011). Diagnostico ambiental sobre el actual manejo de llantas y neumaticos usados. *Union Temporal Ocade Ltda(Colombia), Siniplan (R.J- Brasil), Ambiental S.a (Argentina)*, 1–18. <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>
- Bansal, S., Kumar Misra, A., & Bajpai, P. (2017). Evaluation of modified bituminous concrete mix developed using rubber and plastic waste materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.07.009>
- Cardoza, Marialejandra; Angulo, G., & Palomino, K. (2019). *Pavimento flexible utilizando una mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado para su sostenibilidad en Colombia*.
- Castañeda, J. N. (2009). *Carpetas Asfálticas*. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10577/Capitulo7.pdf%5Cnhttp://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/handle/123456789/2978>
- Díaz, C., & Castro, L. (2017). *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá*No Title.
- Forrest, M. J. (2014). *Recycling and Re-use of Waste Rubber*. Shrewsbury: Smithers Rapra.
- Gaspar, J. (2017). Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. *Control*, 3(July), 2007–2008. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=465549683002>
- Gonzales, J., & Cotrina, M. (2019). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente con incorporación de grano de caucho reciclado en pavimento flexible*, Av. Santa Rosa, 2019.
- Higuera Sandoval, C. H., Olarte Riaño, B. N., & Soler Sánchez, R. D. (2019). Effect of the recycled rubber grain in the rutting of an asphalt mixture type MD-12. *Respuestas*, 24(1), 86–97. <https://doi.org/10.22463/0122820x.1810>
- López-Díaz, A., Ochoa-Díaz, R., & Grimaldo-León, G. E. (2018). Use of BOF slag and blast furnace dust in asphalt concrete: An alternative for the construction of pavements. *DYNA (Colombia)*, 85(206), 24–30. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.70404>

- Lozano, I., & Reyes, C. (2020). *Evaluación del comportamiento de un asfalto modificado con Policloruro de Vinilo (PVC) y Grano de Caucho Reciclado (GCR)*.
- Modarres, A., & Rahmanzadeh, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 66, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002>
- Morcote, C. (2019). *Evaluación del desempeño mecánico de mezclas asfálticas con escorias de acero*.
- Motz, H., & Geiseler, J. (2000). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Journal of Petrology*, 369(1), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Muniandy, R., Aburkaba, E., & Taha, R. (2013). Effect of mineral filler type and particle size on the engineering properties of stone mastic asphalt pavements. *Journal of Engineering Research*, 10(2), 13–32. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol10iss2pp13-32>
- Nguyen, H. Q., Lu, D. X., & Le, S. D. (2018). Investigation of using steel slag in hot mix asphalt for the surface course of flexible pavements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 143(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012022>
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2018). Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3458–3468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.037>
- Pineda Rodriguez, Y. A., & Rey Moreno, F. A. (2012). "Mezclas Asfálticas Drenante Modificada Con Grano De Caucho Reciclado." *Universidad Piloto de Colombia*, 102.
- Presti, L. D. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. In *Construction and Building Materials* (pp. 863–881).
- Rondón, H., & Reyes, F. (2015a). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*.
- Rondón, H., & Reyes, F. (2015b). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. https://books.google.com.co/books?id=zuwcDgAAQBAJ&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Sánchez, H. (2014). Estado del arte sobre las escorias negras de horno de

arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. V Congreso de Ingeniería Civil, 1-14.
<http://www.ustatunja.edu.co/cong/images/Articulos/-ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS ESCORIAS NEGRAS DE HORNO DE ARCO ELECTRICO Y SUS APLICACIONES EN PAVIMENTOS.pdf>

NORMAS TECNICAS

INV E 133 - 13 Equivalente de arenas.

INV E 213 - 13 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos.

INV E 215 - 13 Análisis granulométrico del llenante mineral utilizado en la elaboración de mezclas asfáltica.

INV E 218 - 13 Resistencia de la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles.

INV E 223 - 13 Gravedad específica de agregados gruesos.

INV E 225 - 13 Densidad bulk del llenante mineral en kerosene.

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

INV E 230 - 13 Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados gruesos y finos.

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

INV E 702 - 13 Ductilidad de los materiales asfálticos.

INV E 706 - 13 Penetración de los materiales bituminosos.

INV E 709 - 13 Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland.

INV E 712 - 13 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos aparato de anillo y bola.

INVE E 717 - 13 Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional.

INV E 724 - 13 Índice de penetración.

INV E 733 - 13 Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.

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

Art. 410 - 13 Suministro de cemento asfáltico.

Art. 413 - 13 Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado.

Art. 450 - 13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico).

Sección 560 - 11 Especificación técnica: mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho.

APÉNDICES Y ANEXOS

BITÁCORA

ACTIVIDAD \ FECHA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
Revisión bibliográfica y recopilación de información secundaria.					
Solicitud de permiso para ingreso a la universidad para realizar ensayos de laboratorio.					
Recolección los materiales necesarios para realizar los ensayos de laboratorio.					
Inicio fase 1: Caracterización de los materiales					
Caracterización de agregados gruesos y finos (gravas, arenas y llenante mineral).					
Caracterizaciones materiales modificantes (EAF Y GCR).					
Caracterización de ligante asfáltico (AC-60-70).					
Inicio fase 2: Diseño de mezcla					
Definición de la curva de diseño.					
Elaboración de briquetas convencionales y modificadas.					
Selección de porcentaje óptimo de EAF y GCR.					
Inicio fase 3: Análisis de resultados					
Elaboración del documento final.					
Entrega del documento al director.					
Corrección de observaciones por parte del tutor.					

	EJECUTADO
	SIN EJECUTAR

ANEXOS



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ENSAYO MICRO-DEVAL
INV E-238-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Gerdau Diaco Tuta
 Ubicación : Tunja ,Boyaca
 Material: Escoria
 Tamaño maximo nominal: 1/2 "
 Tipo de gradacion: B
 Fecha de ensayo: Abril 2021

MASA DE ESFERAS (g)	5000
TIEMPO DE ENSAYO (min)	120
A (g)	1502.6
B (g)	1367.2
PERDIDA (g)	135.4

Perdida por abrasion micro-deval (%)
9.0

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ENSAYO MICRO-DEVAL
INV E-238-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Tecniasfaltos
 Ubicación : Tunja ,Boyaca
 Material: Grava
 Tamaño maximo nominal: 1/2 "
 Tipo de gradacion: B
 Fecha de ensayo: Abril 2021

MASA DE ESFERAS (g)	5000
TIEMPO DE ENSAYO (min)	120
A (g)	1500.3
B (g)	1373.9
PERDIDA (g)	126.4

Perdida por abrasion micro-deval (%)
8.4

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ENSAYO DESGASTE DE LOS ÁNGELES
INV E-218-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Gerdau Diaco Tuta
 Ubicación: Tunja, Boyaca
 Material: Grava
 Tamaño máximo nominal: 1/2"
 Fecha de ensayo: Abril 2021

%		TIPO DE GRADACION			
PASA	RETENIDO	A	B	C	D
1 1/2"	1"	1250			
1"	3/4"	1250			
3/4"	1/2"	1250	2500		
1/2"	3/8"	1250	2500		
3/8"	1/4"			2500	
1/4"	No.4			2500	
No.4	No.8				5000
TOTAL		5000	5000	10000	5000
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6

P1	Masa de la muestra de ensayo en g	5000.5
P2	Masa de la muestra seca despues del ensayo, previo lavado sore tamiz No 12 (1.70 mm)g	4021.6

Coeficiente de desgaste de los ángeles (%)

20.00

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ENSAYO DESGASTE DE LOS ÁNGELES
INV E-218-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Tecniasfaltos
 Ubicación: Tunja, Boyaca
 Material: Grava
 Tamaño máximo nominal: 1/2"
 Fecha de ensayo: Abril 2021

%		TIPO DE GRADACION			
PASA	RETENIDO	A	B	C	D
1 1/2"	1"	1250			
1"	3/4"	1250			
3/4"	1/2"	1250	2500		
1/2"	3/8"	1250	2500		
3/8"	1/4"			2500	
1/4"	No.4			2500	
No.4	No.8				5000
TOTAL		5000	5000	10000	5000
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6

P1	Masa de la muestra de ensayo en g	5000.4
P2	Masa de la muestra seca despues del ensayo, previo lavado sore tamiz No 12 (1.70 mm)g	4053.6

Coeficiente de desgaste de los ángeles (%)

19.00

Observaciones:

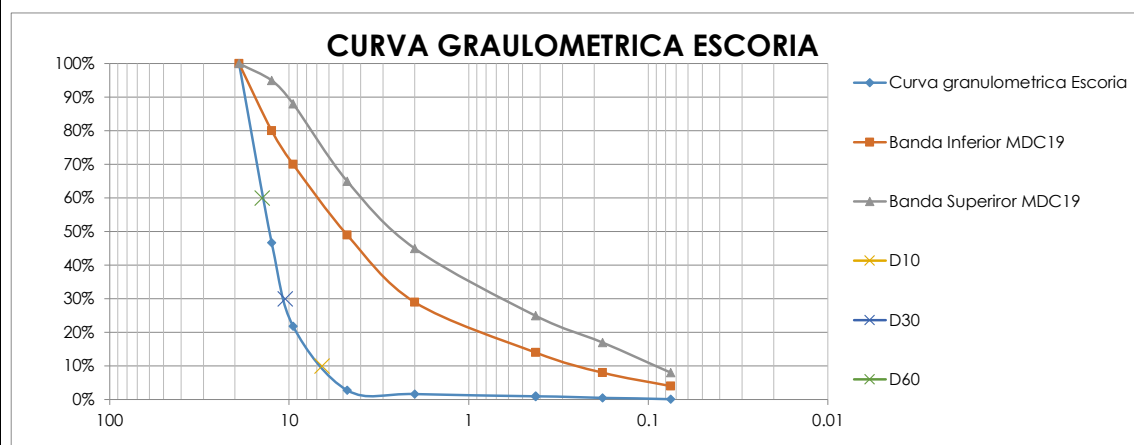


UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ENSAYO MICRO-DEVAL
INV E-213-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Gerdau Diaco Tuta
Ubicación: Tunja, Boyaca
Material: Escoria
Fecha de ensayo: Abril 2021

Peso muestra lavada(g): 5774.1

MALLA	w Ret +Plat (g)	W Retenido (g)	Corrección (g)	W corregido (g)	% retenido	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa	w plat
3/4"	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
1/2"	3261.9	3069.8	7.7	3077.5	53.3	53.3	46.7	192.1
3/8"	1641.5	1431.3	3.6	1434.9	24.9	78.1	21.9	210.2
# 4	1301.1	1099.2	2.8	1102.0	19.1	97.2	2.8	201.9
# 10	132.9	64.9	0.2	65.1	1.1	98.4	1.6	68.0
# 40	101.8	35.8	0.1	35.9	0.6	99.0	1.0	66.0
# 80	101.2	28.1	0.1	28.2	0.5	99.5	0.5	73.1
# 200	87.9	22.6	0.1	22.7	0.4	99.9	0.1	65.3
fondo	75.7	7.9	0.0	7.9	0.1	100.0	0.0	67.8
suma		5759.6		5774.1	100.0	100.0	100.0	



D10	6.6
D30	10.5
D60	14.1

CU	2.2
CC	1.2

Observaciones: _____



UNIVERSIDAD
SANTO TOMAS

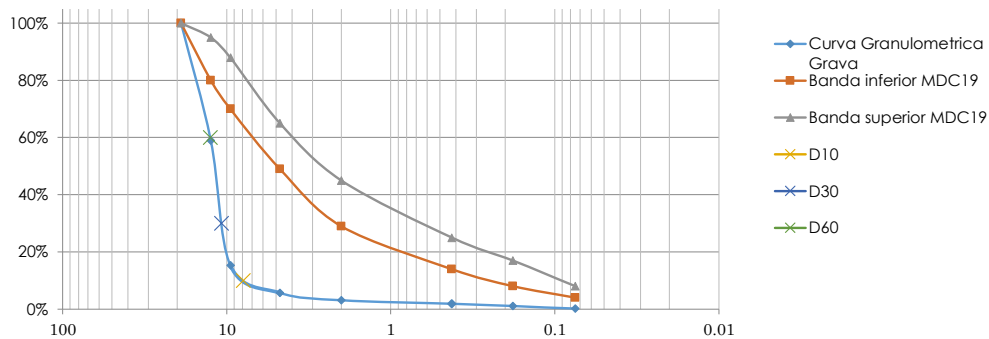
UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ENSAYO MICRO-DEVAL
INV E-213-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Tecniasfaltos
Ubicación: Tunja, Boyaca
Material: Grava
Fecha de ensayo: Abril 2021

Peso muestra lavada (g) 2047.6

MALLA	W Retenido(g)	Corrección (g)	W corregido (g)	% retenido	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa
3/4"	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	839.7	0.12	839.82	41.01	41.01	58.99
3/8"	893.1	0.13	893.23	43.62	84.64	15.36
# 4	198.7	0.03	198.73	9.71	94.34	5.66
# 10	52.7	0.01	52.71	2.57	96.92	3.08
# 40	25.5	0.00	25.50	1.25	98.16	1.84
# 80	15.5	0.00	15.50	0.76	98.92	1.08
# 200	18.3	0.00	18.30	0.89	99.81	0.19
Fondo	3.8	0.00	3.80	0.19	100.00	0.00
Suma	2047.3		2047.60			

CURVA GRANULOMETRICA GRAVA



D10	7.93
D30	10.73
D60	12.57

CU	1.59
CC	1.16

Observaciones: _____



UNIVERSIDAD
SANTO TOMAS

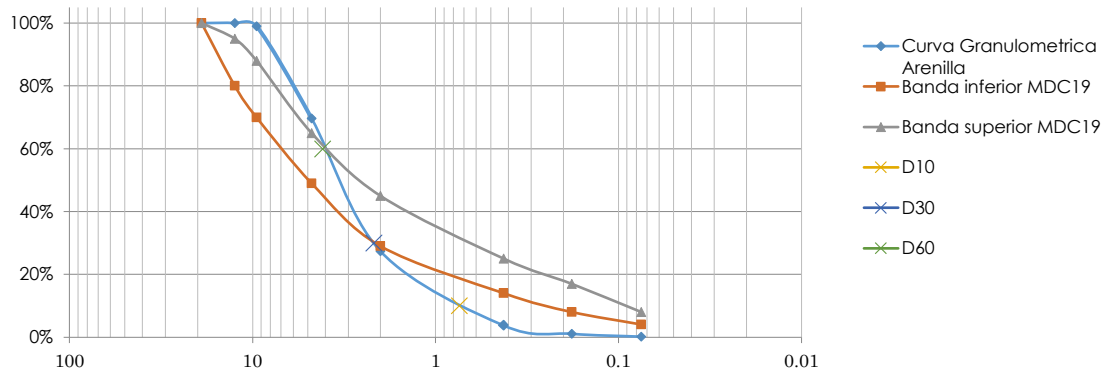
UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ENSAYO MICRO-DEVAL
INV E-213-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Tecniasfaltos
Ubicación: Tunja, Boyaca
Material: Arenilla
Fecha de ensayo: Abril 2021

Peso muestra sin lavar (g) 1197.6
Peso muestra lavada (g) 1161.8

MALLA	W Retenido(g)	Corrección (g)	W corregido (g)	% retenido	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa
3/4"	0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	11.8	0.00	11.80	1.02	1.02	98.98
# 4	341.2	-0.03	341.17	29.37	30.38	69.62
# 10	490.5	-0.04	490.46	42.22	72.60	27.40
# 40	275.4	-0.02	275.38	23.70	96.30	3.70
# 80	30.9	0.00	30.90	2.66	98.96	1.04
# 200	10.6	0.00	10.60	0.91	99.87	0.13
Fondo	1.5	0.00	1.50	0.13	100.00	0.00
Suma	1161.9		1161.80			

CURVA GRANULOMETRICA ARENILLA



D10	0.74
D30	2.17
D60	4.12

CU	5.57
CC	1.54

Observaciones: _____


**UNIVERSIDAD
SANTO TOMAS**

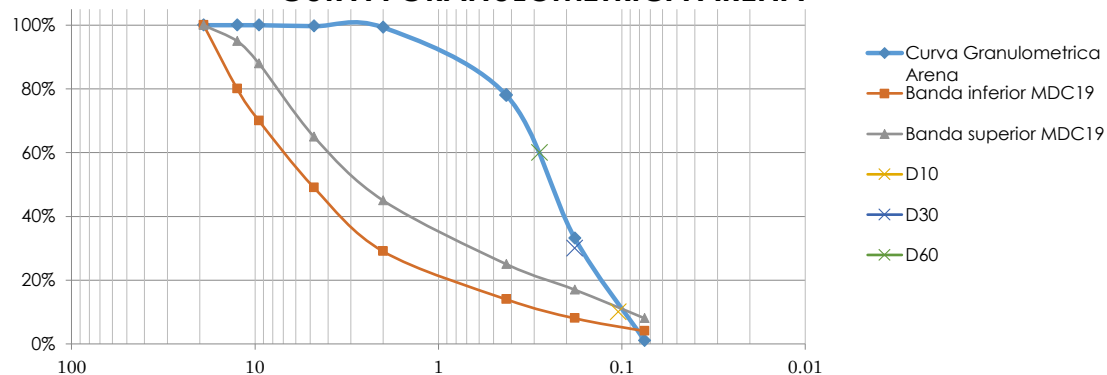
**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ENSAYO MICRO-DEVAL
INV E-213-13**

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: BLF Agregados y Construcciones
 Ubicación: Tunja, Boyaca
 Material: Arena
 Fecha de ensayo: Abril 2021

Peso muestra sin lavar (g) 1000.6
Peso muestra lavada (g) 935.3

MALLA	W Retenido(g)	Corrección (g)	W corregido (g)	% retenido	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa
3/4"	0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
# 4	3.1	0.12	3.22	0.34	0.34	99.66
# 10	3.6	0.14	3.74	0.40	0.74	99.26
# 40	190.7	7.59	198.29	21.20	21.95	78.05
# 80	404.4	16.10	420.50	44.96	66.90	33.10
# 200	288.6	11.49	300.09	32.08	98.99	1.01
Fondo	9.1	0.36	9.46	1.01	100.00	0.00
Suma	899.5		935.30			

CURVA GRANULOMETRICA ARENA



D10	0.10
D30	0.18
D60	0.28

CU	2.68
CC	1.11

Observaciones: _____



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
DENSIDAD BULK DEL LLENANTE MINERAL EN KEROSENE
INV E-225-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Cemento Tequendama
Ubicación: Tunja, Boyaca
Material: filler(cemento asfaltico)
Fecha de ensayo: may-21

Peso muestra (g) 100

MALLA	W Retenido(g)	Corrección (g)	W corregido (g)	% retenido	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa
# 40	0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
# 100	0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
# 200	0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Fondo	100	0.00	100.00	100.00	100.00	0.00
Suma	100		100.00			

Error %	0.00
ΔP	100

GRANULOMETRIA LLENANTE MINERAL DE APORTE

% PASA TAMIZ No.40 100
% PASA TAMIZ No.100 > 90
% PASA TAMIZ NO.200 >75

Observaciones: _____



**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA**

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DEL
AGREGADO FINO)
INV E-222-13**

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Tecniasfalto
 Ubicación: Tunja ,Boyaca
 Material: Arenilla
 Fecha de ensayo: Abril 2021

Masa al aire de la muestra seca al horno(g)	493.3
Masa del picnometro aforado lleno de agua,g	664.316
Masa total del picnometro aforado con la muestra y lleno de agua (g)	974.4
Masa de la muestra SSS (g)	500.2

Densidad relativa (gravedad especifica)	2.59
Densidad relativa (gravedad especifica)SSS	2.63
Densidad relativa aparente	2.69
Densidad condicion seca al horno SH (kg/m ³)	2588.24
Densidad condicion seca al horno SH (lb/pie ³)	161.57
Densidad en condision saturada y superficialmente seca(kg/m ³)	2624.45
Densidad en condision saturada y superficialmente seca(lb/pie ³)	163.83
Densidad aparente (kg/m ³)	2685.72
Densidad aparente (lb/pie ³)	167.66
Absorcion %	1.40

Observaciones:



UNIVERSIDAD
SANTO TOMAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECIFICA) Y ABSORCION DEL
AGREGADO GRUESO
INV E-223-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Gerdau Diaco Tuta
Ubicación: Tunja ,Boyaca
Material: ESCORIA
Fecha de ensayo: mar-21

Masa al aire de la muestra seca al horno (g)	2001.10
Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seaca (g)	2057.20
Masa aparente de la muestra saturada en agua (g)	1399.50

Densidad relativa (gravedad especifica)SSS	3.13
Densidad relativa aparente	3.33
Densidad condicion seca al horno SH (kg/m3)	3034.97
Densidad condicion seca al horno SH (lb/pie3)	189.46
Densidad en condision saturada y superficialmmente seca SSS(kg/m3)	3120.0502
Densidad en condision saturada y superficialmmente seca(lb/pie3)	194.77246
Densidad aparente (kg/m3)	3317.9808
Densidad aparente (lb/pie3)	207.12849
Absorcion %	2.8034581

Observaciones:

DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECIFICA) Y ABSORCION DEL AGREGADO FINO)
INV E-222-13

Masa al aire de la muestra seca al horno,g	496.2
Masa del picnometro aforado lleno de agua,g	664.30304
Masa total del picnometro aforado con la muestra y lleno de agua,g	877.6
Masa de la muestra \$\$\$,g	500.1

Densidad relativa (gravedad especifica)	1.73
Densidad relativa (gravedad especifica)SSS	1.74
Densidad relativa aparente	1.75
Densidad condicion seca al horno SH (kg/m3)	1725.78192
Densidad condicion seca al horno SH (lb/pie3)	107.733774
Densidad en condision saturada y superficialmmente seca(kg/m3)	1739.3461
Densidad en condision saturada y superficialmmente seca(lb/pie3)	108.580533
Densidad aparente (kg/m3)	1749.57293
Densidad aparente (lb/pie3)	109.218954
Absorcion %	0.7859734



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECIFICA) Y ABSORCION DEL
AGREGADO GRUESO
INV E-223-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Tecniasfalto
 Ubicación : Tunja ,Boyaca
 Material: Arenilla
 Fecha de ensayo: mar-21

Masa al aire de la muestra seca al horno (g)	1978
Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca (g)	2046.2
Masa aparente de la muestra saturada en agua (g)	1259.5

Densidad relativa (gravedad especifica)SSS	2.60
Densidad relativa aparente	2.75
Densidad condicion seca al horno SH (kg/m3)	2508.01
Densidad condicion seca al horno SH (lb/pie3)	156.57
Densidad en considicion saturada y superficialmmente seca SSS(kg/m3)	2594.489
Densidad en considicion saturada y superficialmmente seca(lb/pie3)	161.96374
Densidad aparente (kg/m3)	2746.0752
Densidad aparente (lb/pie3)	171.42667
Absorcion %	3.4479272

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS

INV E-133-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Tecniasfalto
 Ubicación: Tunja, Boyaca
 Material: Combinación de las fracciones de agredo,
incluido el llenante mineral
 Fecha de ensayo: Marzo 2021

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Lectura Arcilla	4.6	4.8	4.7
Lectura Arena	3.6	3.7	3.9
Equivalente de arena	79	78	83

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
DENSIDAD BULK(PESO UNITARIO) Y PORCENTAJE DE VACIOS DE LS AGRGADOS EN SUELTO
Y COMPACTO
INV E-217-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Tecniafalto
 Ubicación : Tunja ,Boyaca
 Material: GRAVA
 Fecha de ensayo: Marzo 2021

Peso molde (Kg) 1.518
 Volumen Molde (m³) 0.003

	PESO UNITARIO SUELTO		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso de la muestra + molde (kg)	5.4	5.4	5.4
Peso muestra (kg)	3.9	3.9	3.9
Peso unitario de agregado (kg/m ³)	1285.3	1296.0	1293.3
%vacios	50.5	50.1	50.2

Peso unitario de agregado prom (kg/m³) **1292**
 %vacios prom **50**

	PESO UNITARIO COMPACTO		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso de la muestra + molde (kg)	5.7	5.7	5.6
Peso muestra (kg)	4.1	4.2	4.1
Peso unitario de agregado (kg/m ³)	1382.7	1384.0	1375.3
%vacios	46.7	46.7	47.0

Peso unitario de agregado prom (kg/m³) **1381**
 %vacios prom **47**

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
DENSIDAD BULK(PESO UNITARIO) Y PORCENTAJE DE VACIOS DE LS AGRGADOS EN SUELTO
Y COMPACTO
INV E-217-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Tecniafalto
 Ubicación : Tunja ,Boyaca
 Material: ESCORIA
 Fecha de ensayo: Marzo 2021

Peso molde (Kg) 1.518
 Volumen Molde (m³) 0.003

	PESO UNITARIO SUELTO		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso de la muestra + molde (kg)	5.5	5.6	5.6
Peso muestra (kg)	4.0	4.1	4.1
Peso unitario de agregado (kg/m ³)	1337.3	1358.0	1364.7
%vacios	57.2	56.5	56.3

Peso unitario de agregado prom (kg/m³) **1353**
 %vacios prom **57**

	PESO UNITARIO COMPACTO		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso de la muestra + molde (kg)	5.9	5.9	5.8
Peso muestra (kg)	4.4	4.4	4.3
Peso unitario de agregado (kg/m ³)	1450.7	1452.0	1442.0
%vacios	53.5	44.1	44.4

Peso unitario de agregado prom (kg/m³) **1448**
 %vacios prom **47**

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

INDICES DE APLANAMINETO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS

INV E-230-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: GERDAU DIACO TUTA
Ubicación: Tunja ,Boyaca
Material: ESCORIA
Fecha de ensayo: Marzo 2021

INDICE DE APLANAMINETO

TAMIZ		Masa inicial de cada fraccion (g)	Granulometria (fraccion entre tamices) (%)	Masa de las particulas planas (g)	Indice de aplanamiento por fraccion
Pasa	Retiene				
3/4"	1/2"	413	40.0	43.4	11
1/2"	3/8"	331	32.0	13.4	4
3/8"	1/4"	289.3	28.0	13.3	5
		1033.3	100.0	70.1	

indice de aplanamiento global

7

INDICE DE ALARGAMIENTO

TAMIZ		Masa inicial de cada fraccion (g)	Granulometria (fraccion entre tamices) (%)	Masa de las particulas alargadas (g)	Indice de alargamiento por fraccion
Pasa	Retiene				
3/4"	1/2"	286.3	27.7	39.2	14
1/2"	3/8"	331.3	32.1	41.3	12
3/8"	1/4"	413.1	40.0	23.9	6
		1030.7	99.7	104.4	

indice de aplanamiento global

10

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

INDICES DE APLANAMINETO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS

INV E-230-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Tecniasfalto
Ubicación: Tunja ,Boyaca
Material: GRAVA
Fecha de ensayo: Marzo 2021

INDICE DE APLANAMINETO

TAMIZ		Masa inicial de cada fraccion (g)	Granulometria (fraccion entre tamices) (%)	Masa de las particulas planas (g)	Indice de aplanamiento por fraccion
Pasa	Retiene				
3/4"	1/2"	278.9	29.8	31.4	11
1/2"	3/8"	419.5	44.8	29.5	7
3/8"	1/4"	238.5	25.5	33.7	14
		936.9	100.0	94.6	

indice de aplanamiento global

10

INDICE DE ALARGAMIENTO

TAMIZ		Masa inicial de cada fraccion (g)	Granulometria (fraccion entre tamices) (%)	Masa de las particulas alargadas (g)	Indice de alargamiento por fraccion
Pasa	Retiene				
3/4"	1/2"	278.9	29.8	24.6	9
1/2"	3/8"	419.5	44.8	32.4	8
3/8"	1/4"	238.5	25.5	17.2	7
		936.9	100.0	74.2	

indice de aplanamiento global

8

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

PORCENTAJE DE PARTICULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GUESO

INV E-227-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: GERDAU DIACO
 Ubicación: Tunja, Boyaca
 Material: ESCORIA
 Fecha de ensayo: Marzo 2021

PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS

TAMIZ	Masa de las partículas fracturadas (g)			Porcentaje de partículas con caras fracturadas
	1 CARA	2 O MAS CARAS	0 CARAS	
1/2"	82.9	151.8	30.9	88.4
3/8"	36.7	69.8	32.4	76.7
1/4"	56.2	55.8	15.2	88.1
	175.8	277.4	78.5	

Porcentaje de partículas con una cara fracturada

85

Porcentaje de partículas con una dos fracturadas

78

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

PORCENTAJE DE PARTICULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GUESO

INV E-227-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Tecniasfalto
 Ubicación: Tunja, Boyaca
 Material: GRAVA
 Fecha de ensayo: Marzo 2021

PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS

TAMIZ	Masa de las partículas fracturadas (g)			Porcentaje de partículas con caras fracturadas
	1 CARA	2 O MAS CARAS	0 CARAS	
N4	4.7	11.4	0.8	95.3
1/2"	6.8	161.2	0.0	100.0
3/8"	66.9	306.0	14.1	96.4
1/4"	20.1	190.5	7.7	96.5
	98.5	669.1	22.6	

Porcentaje de partículas con una cara fracturada

97

Porcentaje de partículas con una dos fracturadas

97

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

PENETRACION DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS

INV E-706-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: TECNIASFALTOS
 Ubicación: Tunja, Boyaca
 Material: AC 60-70
 Fecha de ensayo: Marzo 2021

Condiciones de ensayo	Valores de ensayo
Temperatura	25
Tiempo (Segundos)	5
Carga de penetracion (g)	100

	Valores de Penetracion (dmm)
Muestra 1	64
Muestra 2	63
Muestra 3	64
Penetracion promedio	64

Observaciones:



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS

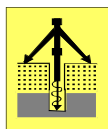
INV E-706-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Asfalto modificado en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
 Ubicación: Tunja, Boyaca
 Material: AC 60-70 Modificado con GCR
 Fecha de ensayo: Marzo 2021

Condiciones de ensayo	Valores de ensayo
Temperatura	25
Tiempo (Segundos)	5
Carga de penetracion (g)	100

	Valores de Penetración (dmm)
Muestra 1	41
Muestra 2	40
Muestra 3	42
Penetración promedio	41

Observaciones:



INGENIERIA Y GEOLOGIA LTDA.
 NIT 800 112 602 - 7
 CONSULTORIA - CONSTRUCCION
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS - CONCRETOS - PAVIMENTOS

9/16

O.S. 101/19

PROYECTO: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS SE RESIDUOS INDUSTRIALES.

LOCALIZACIÓN: PLANTA TUTA, km 27 VÍA TUNJA - PAIPA, BOYACÁ. SOLICITO: GERDAU DIACO.
 SOLICITO: DIACO SA.

MUESTRA: ESCORIA NEGRA.

FECHA DE RECEPCIONADA EN EL LABORATORIO: 25 DE OCTUBRE DE 2019.

ENSAYOS REALIZADOS: 1 análisis químico por fluorescencia de rayos X.

MUESTRA TRAIDA AL LABORATORIO POR: DIACO SA.

ANÁLISIS QUÍMICO POR FLUORECENCIA DE RAYOS X

Compuesto/ Elemento	Composición
CaO	29,60%
SiO ₂	25,28%
Fe ₂ O ₃	22,68%
Al ₂ O ₃	7,57%
MgO	5,92%
MnO	2,49%
SO ₃	2,17%
Na ₂ O	0,80%
Zn	0,77%
TiO ₂	0,62%
Cl	0,57%
Cr	0,54%
K ₂ O	0,27%
P ₂ O ₅	0,24%
Ba	0,20%
Sr	0,08%
Cu	0,05%
Pb	0,05%
Zr	0,04%
V	0,03%
Nb	40 ppm
	100%

Notas:

1. Límite de detección de la técnica es de 0.01%.
2. Los resultados se expresan en base seca a 105°C.
3. Los resultados tienen validez con referencia única y exclusiva sobre la muestra recibida.

CIPRIANO BELTRAN LEMUS
 GERENTE

C.C. 9 525 420 de Sogamoso
 M.P. 1522336994 BYC

Consejo Profesional Nacional De Ingeniería y Arquitectura

ANEXO 24



GERENCIA REFINERIA BARRANCABERMEJA
DEPARTAMENTO DE MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS

Página 1 de 1

CERTIFICADO DE CALIDAD

PRODUCTO: ASFALTO 60/70

NÚMERO DE MUESTRA: 2106110184

FECHA DE VOBO: 11/06/2021 06:35

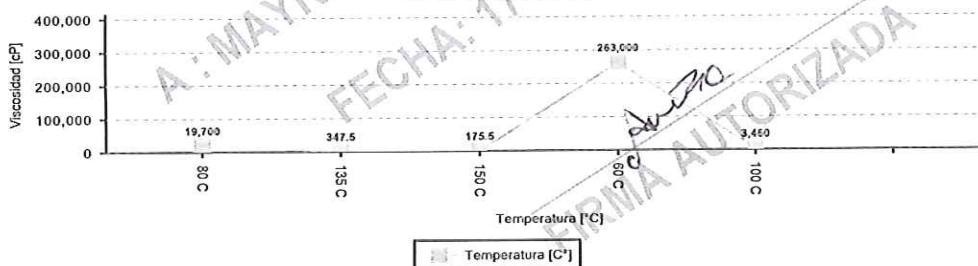
VOBO: SI

ALMACENAMIENTO: K0206

CLIENTE: Depto. Materias Primas y Productos

ANÁLISIS	FECHA DE ANALISIS	RESULTADO	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
VISCOSIDAD A 80 C	11-06-2021 09:49	19700	cP	REPORTAR	ASTM D 4402 VISCOSIDAD CENTIPOISE
VISCOSIDAD A 135 C	11-06-2021 09:49	347.5	cP	REPORTAR	ASTM D 4402 VISCOSIDAD CENTIPOISE
VISCOSIDAD A 150 C	11-06-2021 09:49	175.5	cP	REPORTAR	ASTM D 4402 VISCOSIDAD CENTIPOISE
VISCOSIDAD A 60 C	11-06-2021 09:45	263000	cP	REPORTAR	ASTM D 4402 VISCOSIDAD CENTIPOISE
VISCOSIDAD A 100 C	11-06-2021 09:45	3460	cP	REPORTAR	ASTM D 4402 VISCOSIDAD CENTIPOISE
DUCTILIDAD (25°C, 5cm/min)	11-06-2021 09:49	140	cm	100 Mínimo	ASTM D 113 DUCTILIDAD ASFALTOS
GRAVEDAD API/DENSIDAD A 15 °C					
GRAVEDAD API	11-06-2021 08:55	6.7	Grados API	REPORTAR	ASTM D 4052-18a DENSIDAD DIGITAL
DENSIDAD A 15 °C	11-06-2021 08:55	1023.2	kg/m ³	REPORTAR	ASTM D 4052-18a DENSIDAD DIGITAL
ASTRACION A 25°C, 100g, 5s	11-06-2021 08:55	65	mm/10	60 Mínimo - 70 Máximo	ASTM D 5 INDICE DE PENETRACION CALCULADO
INDICE DE PENETRACION	11-06-2021 08:55	-0.9	N/A	REPORTAR	ASTM D 5 INDICE DE PENETRACION CALCULADO
PERDIDA DE MASA	11-06-2021 09:46	0.36	g/100g	1.0 Máximo	ASTM D 2872 PERDIDA DE MASA
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	11-06-2021 09:02	48.6	°C	45 Mínimo - 55 Máximo	ASTM D 36 PUNTO ABLANDAMIENTO
PUNTO DE INFLAMACION	11-06-2021 10:05	270	°C	232 Mínimo	ASTM D 92-16b PUNTO INFLAM COPA ABIERTA CLEV
VISTO BUENO TANQUES					
VoBo	11-06-2021 10:28	SI	No Aplica	REPORTAR	VISTO BUENO
COMENTARIO	11-06-2021 10:28	NINGUNO	No Aplica	REPORTAR	VISTO BUENO

CURVA REOLÓGICA



VoBo. Nombre:

JOHNIER QUINTERO SANTIAGO

Nota 1: Si tiene alguna duda en cuanto al producto favor comunicarse con la Gerencia de Comercialización.

*Laboratorio Gerencia Refinería Barrancabermeja: CARRERA 3 CALLES 10 Y 10A -COMPLEJO INDUSTRIAL

*Coordinación de Comercialización Barrancabermeja: (097620) 5500/5507 Fax (097620) 5071 Refinería ECOPETROL S.A.

*Coordinación de Petroquímicos e Industriales Bogotá: (091234) 5501/5501/5565/4570/5571/5566 FAX (091231) 5555/5533 Calle 37 No. 7-43 Piso 8

*Coordinación de Combustibles Bogotá: (091231) 5501/5501/5567/5491 FAX (091231) 5555/5533 Calle 37 No. 7-43 Piso 8

Para tramitar un reclamo se requiere comunicación escrita informando producto, No. de factura y objeto del reclamo, además muestra del producto (Líquidos un galón, sólidos 3 kilos). Para el polietileno adicionar el número de lote.

DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD:

Los resultados de los ensayos del presente certificado corresponden a la muestra recibida en el laboratorio y son conformes con las especificaciones definidas en el mismo y con las regulaciones nacionales aplicables.

REGLA DE DECISIÓN:

Se tienen estimadas las incertidumbres de los métodos de ensayos las cuales han sido comunicadas al Departamento de Materias Primas, sin embargo, estas no están implícitas en el resultado reportado para dar cumplimiento a las Especificaciones definidas en las Regulaciones Nacionales Aplicables. Cuando el resultado reportado sea igual o cercano al límite de especificación, el nivel de riesgo dado ha sido estimado de acuerdo con la guía ILAC-G-8:09 "Regla de Decisión Simple o de Riesgo Compartido". En caso de obtener un resultado fuera de especificación, la diferencia entre estos será resuelta aplicando la norma ASTM D3244 "Práctica para utilizar resultados de ensayo con el fin de determinar la conformidad con las especificaciones".



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORVENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS

INV E-733-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Mezcla elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
Ubicación: Tunja, Boyacá
Material: MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MDC-19
Fecha de ensayo: jun-21
Temperatura del agua (°C): 25
Densidad del agua a 25°C (g/cm³): 0.997

3.5% AC		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del especimen ene le aire (g)	A	1229.2	1213.9	1217.7
Masa en el aire del especimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1233.7	1219.5	1224.3
Masa del especimen sumergido en agua(g)	C	713.5	701.3	679.2
Graveda Especifica Bulk		2.36	2.34	2.23
Densidad Bulk		2.36	2.34	2.23
Promedio Graveda Especifica Bulk		2.31		
Promedio Densidad Bulk		2.31		
4% CA		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del especimen ene le aire (g)	A	1218.6	1223.5	1229.8
Masa en el aire del especimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1219.8	1226.3	1229.9
Masa del especimen sumergido en agua(g)	C	714.6	712.7	717.7
Graveda Especifica Bulk		2.41	2.38	2.40
Densidad Bulk		2.40	2.38	2.39
Promedio Graveda Especifica Bulk		2.40		
Promedio Densidad Bulk		2.39		
4.5% CA		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3
Masa del especimen ene le aire (g)	A	1226.8	1206.9	1226.2
Masa en el aire del especimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1227	1207.1	1226.6
Masa del especimen sumergido en agua(g)	C	724.6	709.4	722.7
Graveda Especifica Bulk		2.44	2.42	2.43
Densidad Bulk		2.43	2.42	2.43
Promedio Graveda Especifica Bulk		2.43		
Promedio Densidad Bulk		2.43		
5% AC		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C 3
Masa del especimen ene le aire (g)	A	1224.3	1227.8	1224.2
Masa en el aire del especimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1224.3	1227.8	1224
Masa del especimen sumergido en agua(g)	C	718.6	718.5	722.8
Graveda Especifica Bulk		2.42	2.41	2.44
Densidad Bulk		2.41	2.40	2.44
Promedio Graveda Especifica Bulk		2.42		
Promedio Densidad Bulk		2.42		
5.5% AC		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del especimen ene le aire (g)	A	1217.3	1253	
Masa en el aire del especimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1216.8	1235.2	
Masa del especimen sumergido en agua(g)	C	718	724.9	
Graveda Especifica Bulk		2.44	2.46	
Densidad Bulk		2.43	2.45	
Promedio Graveda Especifica Bulk		2.45		
Promedio Densidad Bulk		2.44		
Observaciones:				

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS		UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE GEOTECNIA		
		GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORVENTES EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS INV E-733-13		
Proyecto: _____ Trabajo de grado Procedencia: _____ Mezcla elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS Ubicación: _____ Tunja, Boyacá Material: _____ MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 25 % ESCORIA MDC-19 Fecha de ensayo: _____ jun-21 Temperatura del agua (°C) _____ 25 Densidad del agua a 25°C (g/cm³) _____ 0.997				
4% AC		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1249.8	1232.5	1238.8
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1250.9	1238.4	1245
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	733.1	720.5	724.1
Gravedad Específica Bulk		2.41	2.38	2.38
Densidad Bulk		2.41	2.37	2.37
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.39		
Promedio Densidad Bulk		2.38		
4.5% CA		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1218.3	1251.1	1251.9
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1219.9	1251.6	1252.1
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	717.5	731.2	745.4
Gravedad Específica Bulk		2.42	2.40	2.47
Densidad Bulk		2.42	2.40	2.46
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.43		
Promedio Densidad Bulk		2.43		
5% CA		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1251.9	1249.8	1246.5
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1252.1	1250.5	1247.8
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	745.4	739.6	733.7
Gravedad Específica Bulk		2.47	2.45	2.42
Densidad Bulk		2.46	2.44	2.42
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.45		
Promedio Densidad Bulk		2.44		
		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				
		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				
		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				
Observaciones:				



UNIVERSIDAD
SANTO TOMAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARTAO MARSHALL

INV E-748-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Mezcla Modificada elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
Ubicación: Tunja, Boyaca
Material: MEZCLA MODIFICADA 25% ESCORIA MDC-19
Fecha de ensayo: jun-21

%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.0%	C1	6.56	0.96	4.064	14.6	14.02
	C2	6.51	0.96	4.094	15.55	14.93
	C3	6.57	0.93	3.944	15.05	14.00
	PROMEDIO			4.0	15.1	14.31
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.5%	C1	6.17	1.04	4.19	13.46	14.00
	C2	6.19	1.04	4.75	14.97	15.57
	C3	6.46	0.96	4.4	12.81	12.30
	PROMEDIO			4.45	13.7	13.95
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
5.0%	C1	6.38	1	5.18	13.32	13.32
	C2	6.36	1	5.47	13.94	13.94
	C3	6.4	1	5.46	12.68	12.68
	PROMEDIO			5.37	13.3	13.31
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					

Observaciones: Se mezcla a 150°C y para compactar a 140°C



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARTAO MARSHALL

INV E-748-13

Proyecto: Trabajo de grado
 Procedencia: Mezcla Modificada elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
 Ubicación: Tunja, Boyacá
 Material: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 50% MDC-19
 Fecha de ensayo: jun-21

%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.0%	C1	6.4	1	4.78	14.96	14.96
	C2	6.42	1	3.33	7.35	7.35
	C3	6.41	1	3.47	14.45	14.45
	PROMEDIO			3.86	12.25	12.25
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.5%	C1	6.36	1	3.82	14.7	14.70
	C2	6.22	1.04	4.083	15.11	15.71
	C3	6.3	1	3.659	11.62	11.62
	PROMEDIO			3.85	13.8	14.01
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
5.0%	C1	6.33	1	5.705	14.61	14.61
	C2	6.22	1.04	5.926	12.27	12.76
	C3	5.98	1.09	3.921	9.89	10.78
	PROMEDIO			5.18	12.3	12.72
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					

Observaciones: Se mezcla a 150°C y para compactar a 140°C



**UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS**

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORVENTES EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS

INV E-733-13

Proyecto: _____ Trabajo de grado _____

Procedencia: _____ Mezcla elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS _____

Ubicación: _____ Tunja, Boyacá _____

Material: _____ MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 50% MDC-19 _____

Fecha de ensayo: _____ jun-21 _____

Temperatura del agua (°C) _____ 25 _____

Densidad del agua a 25°C (g/cm³) _____ 0.997 _____

4% AC		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1249.8	1213	1237.9
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1250.9	1218.4	1242.8
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	733.1	707.5	732.4
Gravedad Específica Bulk		2.41	2.37	2.43
Densidad Bulk		2.41	2.37	2.42
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.40		
Promedio Densidad Bulk		2.40		

4.5% CA		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1235.6	1230	1231
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1239.1	1231.3	1232.2
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	735	733.3	727
Gravedad Específica Bulk		2.45	2.47	2.44
Densidad Bulk		2.44	2.46	2.43
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.45		
Promedio Densidad Bulk		2.45		

5% CA		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1251.4	1234.1	1170.5
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1252.6	1234.7	1172
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	741.5	735.9	693.8
Gravedad Específica Bulk		2.45	2.47	2.45
Densidad Bulk		2.44	2.47	2.44
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.46		
Promedio Densidad Bulk		2.45		

		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				

		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				

Observaciones:



UNIVERSIDAD
SANTO TOMAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

INV E-748-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Mezcla Modificada elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
Ubicación: Tunja, Boyaca
Material: MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA 75% MDC-19
Fecha de ensayo: jun-21

%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.0%	C1	6.37	1	3.79	12.97	12.97
	C2	6.35	1	3.41	13.8	13.80
	C3	6.34	1	4.18	21.51	21.51
	PROMEDIO			3.79	16.09	16.09
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.5%	C1	6.34	1	3.739	13.9	13.90
	C2	6.38	1	3.778	13.04	13.04
	C3	6.31	1	3.9	11.62	13.37
	PROMEDIO			3.81	12.9	13.44
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
5.0%	C1	6.25	1	4.61	15.9	15.90
	C2	6.36	1	4.05	13.4	13.40
	C3	6.36	1	4.25	13.54	13.54
	PROMEDIO			4.30	14.3	14.28
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					

Observaciones: Se mezcla a 150°C y para compactar a 140°C



**UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS**

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORVENTES EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS

INV E-733-13

Proyecto: _____ Trabajo de grado _____

Procedencia: _____ Mezcla elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS _____

Ubicación: _____ Tunja, Boyacá _____

Material: _____ MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 75% MDC-19 _____

Fecha de ensayo: _____ jun-21 _____

Temperatura del agua (°C) _____ 25 _____

Densidad del agua a 25°C (g/cm³) _____ 0.997 _____

4% AC		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1251.7	1239.4	1259.8
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1255.6	1244.2	1262.9
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	746	740	753.3
Gravedad Específica Bulk		2.46	2.46	2.47
Densidad Bulk		2.45	2.45	2.46
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.46		
Promedio Densidad Bulk		2.45		

4.5% CA		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1248.4	1255.9	1250
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1252.7	1259.4	1252.4
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	746.4	751.1	746.9
Gravedad Específica Bulk		2.47	2.47	2.47
Densidad Bulk		2.46	2.46	2.47
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.47		
Promedio Densidad Bulk		2.46		

5% CA		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1250	1264.7	1266.3
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1258.8	1265.5	1266.9
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	755.8	759.7	757.9
Gravedad Específica Bulk		2.49	2.50	2.49
Densidad Bulk		2.48	2.49	2.48
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.49		
Promedio Densidad Bulk		2.48		

		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				

		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				

Observaciones:



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARTAO MARSHALL
INV E-748-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Mezcla Modificada elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
Ubicación: Tunja, Boyacá
Material: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 100% MDC-19
Fecha de ensayo: jul-21

%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.0%	C1	6.43	0.96	4.089	15.33	14.72
	C2	6.38	0.96	4.409	16.31	15.66
	C3	6.45	1	4.815	18.99	18.99
	PROMEDIO			4.44	16.88	16.45
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.5%	C1	6.32	1	5.156	17.47	17.47
	C2	6.37	1	4.326	15.45	15.45
	C3	6.37	1	3.913	13.72	13.72
	PROMEDIO			4.47	15.5	15.55
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
5.0%	C1	6.44	0.96	4.74	16.32	15.67
	C2	6.23	1.04	5.98	15.63	16.26
	C3	6.41	0.96	4.78	14.26	13.69
	PROMEDIO			5.17	15.4	15.20
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					

Observaciones: Se mezcló a 150°C y para compactar a 140°C



**UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS**

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORVENTES EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS

INV E-733-13

Proyecto: _____ Trabajo de grado _____

Procedencia: _____ Mezcla elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS _____

Ubicación: _____ Tunja, Boyacá _____

Material: _____ MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 100% MDC-19 _____

Fecha de ensayo: _____ jul-21 _____

Temperatura del agua (°C) _____ 25 _____

Densidad del agua a 25°C (g/cm³) _____ 0.997 _____

4% AC		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1272.8	1281.3	1290.1
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1280.1	1285.2	1293.9
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	763.3	771.2	769.1
Gravedad Específica Bulk		2.46	2.49	2.46
Densidad Bulk		2.46	2.49	2.45
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.47		
Promedio Densidad Bulk		2.46		

4.5% CA		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1268.1	1285.6	1273.2
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1269.6	1291.6	1279.3
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	766.4	778.7	765
Gravedad Específica Bulk		2.52	2.51	2.48
Densidad Bulk		2.51	2.50	2.47
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.50		
Promedio Densidad Bulk		2.49		

5% CA		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1292.9	1272	1292.3
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1295.7	1274.5	1292.4
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	781	780.3	777.7
Gravedad Específica Bulk		2.51	2.57	2.51
Densidad Bulk		2.50	2.57	2.50
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.53		
Promedio Densidad Bulk		2.52		

		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				

		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				

Observaciones:



**UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS**

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORVENTES EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS

INV E-733-13

Proyecto: _____ Trabajo de grado

Procedencia: _____ Mezcla elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

Ubicación: _____ Tunja, Boyacá

Material: _____ MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON 75% DE ESCORIA Y 10% DE GCR MDC-19

Fecha de ensayo: _____ jul-21

Temperatura del agua (°C) _____ 25

Densidad del agua a 25°C (g/cm³) _____ 0.997

4% AC		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1252.8	1244.9	1236
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1256.3	1245	1238.6
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	743.4	727.3	732.6
Gravedad Específica Bulk		2.44	2.40	2.44
Densidad Bulk		2.44	2.40	2.44
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.43		
Promedio Densidad Bulk		2.42		

4.5% CA		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1245.1	1186.1	1246.1
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1247.7	1187.1	1250
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	728.6	707.9	742.6
Gravedad Específica Bulk		2.40	2.48	2.46
Densidad Bulk		2.39	2.47	2.45
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.44		
Promedio Densidad Bulk		2.44		

5% CA		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3
Masa del espécimen en el aire (g)	A	1254.5	1245.3	1238.7
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B	1255.4	1246.8	1240.5
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C	746.3	741.6	731.9
Gravedad Específica Bulk		2.46	2.46	2.44
Densidad Bulk		2.46	2.46	2.43
Promedio Gravedad Específica Bulk		2.45		
Promedio Densidad Bulk		2.45		

		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				

		BRIQUETA C1	BRIQUETA C2	BRIQUETA C3
Masa del espécimen en el aire (g)	A			
Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco(g)	B			
Masa del espécimen sumergido en agua(g)	C			
Gravedad Específica Bulk				
Densidad Bulk				
Promedio Gravedad Específica Bulk				
Promedio Densidad Bulk				

Observaciones:


**UNIVERSIDAD
SANTO TOMAS**

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE GEOTECNIA
ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARTAO MARSHALL
INV E-748-13

Proyecto: Trabajo de grado
Procedencia: Mezcla Modificada elaborada en laboratorio, UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
Ubicación: Tunja, Boyaca
Material: MEZCLA ASFALTICA MODIFICAD CON 75% CON ESCORIA Y 10% DE GCR MDC-19
Fecha de ensayo: jul-21

%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.0%	C1	6.35	1	4.035	22.12	22.12
	C2	6.49	0.96	5.08	17.74	17.03
	C3	6.33	1	4.113	21.7	21.70
	PROMEDIO			4.41	20.52	20.28
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
4.5%	C1	6.47	0.96	4.411	17.16	16.47
	C2	5.95	1.09	4.35	16.24	13.04
	C3	6.4	1	4.306	21.02	13.37
	PROMEDIO			4.36	18.1	14.29
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
5.0%	C1	6.37	1	5.025	20.6	20.60
	C2	6.31	1	5.32	17.44	17.44
	C3	6.37	1	4.326	18.95	18.95
	PROMEDIO			4.89	19.0	19.00
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					
%AC	BRIQUETA	ALTURA(mm)	CORRECCION	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD (kN)	ESTABILIDAD CORREGIDA (kN)
	C1					
	C2					
	C3					
	PROMEDIO					

Observaciones: Se mezcla a 150°C y para compactar a 140°C