

**ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS DENSAS**

**ROBIN JULIÁN MÉNDEZ CASTELLANOS
OMAR IVÁN BECERRA CASTRO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS DENSAS**

**ROBIN JULIÁN MÉNDEZ CASTELLANOS
OMAR IVÁN BECERRA CASTRO**

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil

**Director:
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
PhD. en ingeniería civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios por tantas bendiciones recibidas salud, fortaleza y sabiduría. Por haber puesto en mi camino a personas que han sido mi apoyo y compañía.

A mi padre por su ejemplo y consejos oportunos.

A mi madre por su amor y apoyo incondicional en todo momento, por ser la mujer que ha dedicado su vida y sus esfuerzos para que nada me falte.

A mi hermano y hermana por apoyarme a lo largo de mi formación profesional.

A mis amigos que ofrecieron su confianza y apoyo en buenos y malos momentos.

Y a cada miembro de mi familia por su apoyo y confianza puesta en mí.

Robin Julián Méndez Castellanos

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme permitido culminar mis estudios y darme la salud y paciencia necesaria para llegar a este punto.

A mi madre Gloria

Por haberme acompañado en todo momento sin importar las dificultades, por sus consejos, valores y muestras de amor que me formaron como persona.

A mi padre Arturo

Por sus ejemplos de lucha y constancia de no rendirse ante las adversidades, por su afecto y sus enseñanzas que me permitieron triunfar como estudiante y ahora como ingeniero.

A mis hermanas Jenny y Diana

Por estar siempre a mi lado apoyándome en todo momento, dándome consejo para crecer como persona y sobre todo por el amor que me demuestran siempre lo que me ayuda siempre a salir adelante sin importar las dificultades

A mi tío John

Quien en toda mi niñez me acompañó y guio, dándome consejos y formándome como persona de bien para progresar en el futuro.

Omar Iván Becerra Castro

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVO	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 DEFINICIÓN DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN LA MEZCLA.	18
2.2 TIPOS DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN MEZCLAS DENSAS.	18
2.2.1 Ahuellamiento por fallas en la subrasante	19
2.2.2 Ahuellamiento por falla en la capa asfáltica	19
2.2.3 Abultamientos en la capa asfáltica.....	20
2.3 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DESARROLLO DEL AHUELLAMIENTO.....	21
2.3.1 Granulometría de los agregados pétreos.....	21
2.3.2 Forma, tamaño y textura de los agregados pétreos.....	21
2.3.3 Contenido de polvo mineral en la mezcla	22
2.4 TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO	22
2.5 CONDICIONES AMBIENTALES.....	23
2.5.1 Temperatura	23
2.5.2 Agua.	24
2.6 METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.	24
2.6.1 Ensayos triaxiales	24
2.6.2 Ensayo sobre pista.	25
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	27
3.1 AGREGADO MINERAL Y LIGANTE ASFÁLTICO.....	27

3.1.1 Identificación de los materiales necesarios para el diseño	27
3.1.2 Equivalente de arena de suelos y agregados finos I.N.V. E – 133 – 13	27
3.1.3 Masa unitaria aparente (Densidad Aparente) del llenante mineral en tolueno I.N.V. E – 225-013	27
3.1.4 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados I.N.V. E – 227-13	27
3.1.5 Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras I.N.V. E – 230-13	28
3.1.6 Análisis granulométrico I.N.V. E–213-13	28
3.1.7 Diseño Marshall INV-E-748-13	28
3.2 AGREGADO PÉTREO Y LLENANTE MINERAL.....	29
3.2.1 Fórmula de trabajo de mezcla No. 1 tipo MDC-19	29
3.2.1.1 Análisis granulométrico.....	29
3.2.1.2 Caracterización del cemento asfáltico 60/70 convencional.....	31
3.2.1.3 Fórmula Marshall de diseño.....	31
3.2.2 Fórmula de trabajo de mezcla No. 2 tipo MDC-19.....	32
3.2.2.1 Análisis granulométrico	32
3.2.2.2 Caracterización del cemento asfáltico 60/70 convencional.....	33
3.2.2.3 Fórmula Marshall de diseño.....	34
4. PREPARACIÓN DE PROBETAS ASFÁLTICAS MDC-19	35
4.1 PROCESO DE MEZCLADO.....	35
4.2 PROCESO DE COMPACTACIÓN.....	37
5. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO	41
5.1 ACONDICIONAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES.....	41
5.2 EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO.....	42
6. RESULTADOS DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO.....	45
6.1 DEFORMACIONES EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE CADA PROBETA.	46
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
7.1 DEFORMACIONES PROMEDIO.....	48
7.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS AGREGADOS.....	49

7.3 COMPARACIÓN CON MSC-19 Y MGC-25.....50
8. CONCLUSIONES55
BIBLIOGRAFÍA.....57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Deformaciones permanentes	19
Figura 2. Falla en la subrasante.....	19
Figura 3- Falla por mezcla asfáltica	20
Figura 4. Abultamiento en el pavimento.....	20
Figura 5. Esquematización ensayo triaxial.....	25
Figura 6. Ensayo de pista (Wheel tracking test - EN 12697-22)	25
Figura 7. Tamices y agregado utilizado	29
Figura 8. Curva comportamiento granulométrico de la mezcla asfáltica densa MDC-19	30
Figura 9. Material tamizado.	31
Figura 10. Curva comportamiento granulométrico.	33
Figura 11. Material tamizado.....	33
Figura 12. Acondicionamiento agregado pétreo	36
Figura 13. Acondicionamiento asfalto	36
Figura 14. Proceso de mezclado.	36
Figura 15. Temperatura de mezclado.	37
Figura 16. Molde para compactación.....	38
Figura 17. Martillo demoledor	38
Figura 18. Punta metálica.	39
Figura 19. Proceso de compactación.....	39
Figura 20. Probetas compactadas.	40
Figura 21. Acondicionamiento especímenes.	41
Figura 22. Inicio de ensayo	42
Figura 23. Deformímetro.....	42
Figura 24. Distribución de las mediciones en las probetas.	43

Figura 25. Toma de datos.....	43
Figura 26. Probetas planta 1.....	44
Figura 27. Probetas Planta 2.....	44
Figura 28. Deformaciones Mezcla No 1.....	45
Figura 29. Deformaciones Mezcla No 2.....	46
Figura 30. Sección transversal probeta A.....	46
Figura 31. Sección transversal probeta B.....	47
Figura 32. Sección transversal probeta A.....	47
Figura 33. Sección transversal probeta B.....	47
Figura 34. Deformaciones proporcionales 10000 ciclos.....	48
Figura 35. Deformaciones proporcionales 30000 ciclos.....	49
Figura 36. Probetas A-B Planta 1.....	49
Figura 37. Probetas A-B Planta 2.....	49
Figura 38. Deformaciones promedio para cada mezcla.....	52
Figura 39. Parámetros relacionados con el ahuellamiento.....	53
Figura 40. Proporción agregado grueso y fino.....	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen ensayos de caracterización de agregados pétreos.....	29
Tabla 2. Granulometría adoptada	30
Tabla 3. Parámetros básicos cemento asfáltico 60/70.....	31
Tabla 4. Resumen de parámetros óptimos de diseño.....	31
Tabla 5. Resumen ensayos de caracterización de los agregados pétreos.	32
Tabla 6. Granulometría adoptada	32
Tabla 7. Parámetros básicos de asfalto 60/70	33
Tabla 8. Resumen de parámetros óptimos de diseño.....	34
Tabla 9. Criterio de preparación.....	35
Tabla 10. Características de ensayo.....	41
Tabla 11. Resultados de deformación.	45
Tabla 12. Propiedades volumétricas de mezclas en caliente	50
Tabla 13. Deformaciones para tipo de mezcla.....	51
Tabla 14. Proporción de agregados.....	53

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS*

AUTORES: ROBIN JULIÁN MÉNDEZ CASTELLANOS
OMAR IVÁN BECERRA CASTRO**

PALABRAS CLAVES: Ahuellamiento, Mezcla Densa, Ensayo de Ahuellamiento, Caracterización de Material.

DESCRIPCIÓN:

Se evalúan las deformaciones permanentes o ahuellamiento que experimentan las muestras de mezclas densas en caliente de gradación continua (MDC-19) debido al efecto de la repetición de cargas en laboratorio. Se inició con la caracterización de los materiales siguiendo los diseños suministrados por las empresas de la zona metropolitana de Bucaramanga con el fin de fabricar las probetas teniendo como criterio los lineamientos y especificaciones contempladas en el documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS. Los materiales como agregados y cemento asfáltico 60/70 convencional fueron suministrados por cada una de las empresas ya mencionadas. Fabricadas las probetas, se sometieron a ensayo empleando la máquina de ahuellamiento contemplando la norma europea EU-12697-22:2003 Wheel tracking Test (Large Size Device) para medir las deformaciones permanentes que experimentan las mezclas densas en caliente bajo condiciones específicas de carga, velocidad y temperatura. Para el ensayo se utilizaron cuatro probetas, dos por empresa acondicionándolas a una temperatura de 60 grados centígrados y siendo sometidas a 10000 y 30000 ciclos de carga para evaluar la susceptibilidad al ahuellamiento que presentaron ante esta repetición de carga. Medidas las deformaciones se comparan los resultados obtenidos al trabajar con mezclas asfálticas en caliente de tipo denso (MDC), semidenso (MSC) y grueso (MGC) de acuerdo a especificaciones internacionales para establecer el nivel de vulnerabilidad de las mismas.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón Ingeniero Civil, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE SUSCEPTIBILITY TO THE SEALING IN ASPHALTIC MIXED DENSES *

AUTHORES: ROBIN JULIÁN MÉNDEZ CASTELLANOS
OMAR IVÁN BECERRA CASTRO**

KEYWORDS: Ahuellamiento, dense mixture, Wheel tracking test, characterization of Material.

DESCRIPTION:

The permanent deformations or rutting that the samples of dense hot mixes of continuous gradation (MDC-19) undergo due to the effect of the repetition of charges in the laboratory are evaluated. It began with the characterization of the materials following the designs provided by the companies of the metropolitan area of Bucaramanga with the purpose of manufacturing the test pieces taking as criteria the guidelines and specifications contemplated in the normative document of the National Institute of Vías INVIAS. Materials such as aggregates and conventional 60/70 asphalt cement were supplied by each of the aforementioned companies. The test pieces were made, they were tested using the rutting machine contemplating the European standard EU-12697-22: 2003 Wheel tracking test (Large Size Device) to measure the permanent deformations experienced by hot dense mixtures under specific loading conditions, speed and temperature. For the test four test tubes were used, two per company conditioning them at a temperature of 60 degrees Celsius and being subjected to 10000 and 30000 load cycles to evaluate the susceptibility to rutting presented to this repetition of load. Measures The deformations are compared the results obtained when working with hot asphalt mixtures of dense (MDC), semi-dense (MSC) and coarse (MGC) type according to international specifications to establish their level of vulnerability.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón Ingeniero Civil, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las condiciones de rodadura para una carretera son mucho más estrictas que en la antigüedad, variando tanto en la normatividad que regían como el número de vehículos que circulaban. La industrialización impulsó el aumento de fabricación de vehículos ocasionando que las carreteras hasta esa época se vieran afectadas debido a que como una carretera es una estructura formada por una carpeta asfáltica, base y sub base diseñadas para soportar cargas específicas y estas al aumentar no logra que se distribuyan de manera adecuada los esfuerzos facilitando la aparición de deformaciones permanentes brindando un mal servicio al usuario. Uno de estos fenómenos de deformación más estudiado para el diseño de un pavimento es el ahuellamiento que son producidas tanto por la temperatura ambiente, como vacíos en la mezclas a la hora de seleccionar la granulometría adecuada para su preparación.

El presente trabajo muestra el análisis realizado a muestras de pavimento bituminoso de mezcla densa producidas en caliente en la zona metropolitana de Bucaramanga. Se hicieron medidas en laboratorio mediante la máquina de ahuellamiento (Wheel tracker EN12697-22 Large device) sobre mezclas tipo MDC-19 de acuerdo con los diseños de dos plantas de producción de mezclas asfálticas. Se hace la comparación de los resultados con los valores obtenidos en estudios previos sobre mezclas semidensa y gruesas.

1. OBJETIVO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las deformaciones permanentes que experimentan las muestras de mezcla densa en caliente por efecto de la repetición de cargas en laboratorio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medir las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas densas, bajo condiciones específicas de carga, velocidad y temperatura empleando la máquina de ahuellamiento (Wheel tracker EN12697-22 Large device)
- Comparar los resultados de las deformaciones obtenidas al trabajar con mezclas asfálticas en caliente de tipo denso (MDC), semidensa (MSC) y grueso (MGC) de acuerdo a especificaciones internacionales para establecer el nivel de vulnerabilidad de las mismas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIÓN DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN LA MEZCLA.

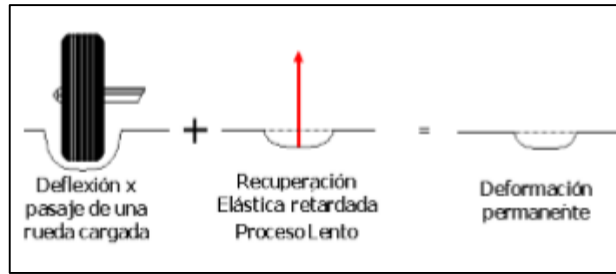
Las deformaciones permanentes o ahuellamiento en la mezcla asfáltica se caracteriza por un desplazamiento lateral a lo largo de la trayectoria de los vehículos donde circula la llanta.

Se presenta a manera de deformación permanente ya que es una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable producida cada vez que se le aplica una carga, generando reducción volumétrica del material que compone la mezcla asfáltica y grandes magnitudes de esfuerzos cortantes. El paso de los vehículos hace que el pavimento sufra un deterioro progresivo donde las deformaciones se hacen permanentes hasta llegar a ser notorias.

2.2 TIPOS DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN MEZCLAS DENSAS.

Las deformaciones permanentes se pueden apreciar visiblemente como depresiones o canales a lo largo de la trayectoria por donde ruedan los vehículos en el pavimento.

Figura 1. Deformaciones permanentes

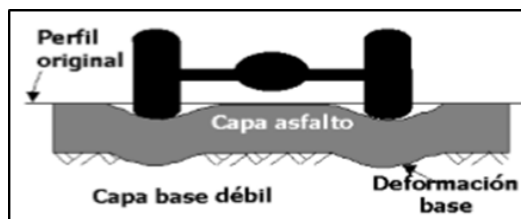


Fuente. Nieto, Juan P. “Susceptibilidad al ahuellamiento en carpetas asfálticas”

El comportamiento de una mezcla asfáltica varía dependiendo de la temperatura, las propiedades individuales de los materiales y del tiempo de aplicación de la carga, existen tres tipos principales de fallas plásticas en una muestra asfáltica¹.

2.2.1 Ahuellamiento por fallas en la subrasante Su aparición se debe a un exceso de esfuerzos en las capas inferiores (base o subbase) caracterizado por un hundimiento donde circulan las llantas de los vehículos como se observa en la figura 2, generando una deformación en las capas inferiores y manteniendo el espesor de la mezcla asfáltica.

Figura 2. Falla en la subrasante



Fuente. Pablo, N. “Susceptibilidad al ahuellamiento en carpetas asfálticas”

2.2.2 Ahuellamiento por falla en la capa asfáltica Esta se presenta por la falta de resistencia de la mezcla ante la petición de cargas producida por la reducción

¹ NIETO, Juan P. Susceptibilidad al ahuellamiento en carpetas asfálticas. [PhD Tesis]. Buenos Aires, Argentina: Centro de Investigaciones Viales, 2009

volumétrica del material que compone la mezcla y por las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes que transmite las cargas del tránsito.

Figura 3- Falla por mezcla asfáltica



Fuente. Pablo, N. "Susceptibilidad al ahuellamiento en carpetas asfálticas"

2.2.3 Abultamientos en la capa asfáltica. Es un deterioro en la capa asfáltica que produce un abultamiento en pequeño o grandes áreas de la carretera en ocasiones acompañadas por fisuras; es producido por la expansión de la subrasante generando presiones en la parte de debajo de la capa asfáltica como se observa en la figura 4.

Figura 4. Abultamiento en el pavimento



Fuente. Gutiérrez, Francisco A. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Manual para la inspección de pavimentos flexibles [Manual LPC]: Instituto Nacional de Vías, 2006

2.3 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DESARROLLO DEL AHUELLAMIENTO.

Una mezcla asfáltica se enfrenta a varios factores que intervienen en el desarrollo del ahuellamiento llevando a que esta sea más o menos resistente a deformaciones permanentes.

2.3.1 Granulometría de los agregados pétreos. Las granulometrías densas son las más ampliamente utilizadas en la elaboración de las mezclas asfálticas. Cuando las mezclas asfálticas densas o de granulometrías continuas se compactan propiamente se logran mezclas con menor porcentaje de vacíos y con mayores puntos de contacto entre las partículas que las mezclas de granulometría abierta.

Según Thenoux, recientes investigaciones indican que para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento debe existir un contacto íntimo entre las partículas gruesas, más resistentes y de mayor fricción interna. La cantidad de agregado de menor tamaño debe ser tal que pueda ser colocado en el espacio que dejan los agregados más gruesos sin interferir en su contacto interarticular y así sucesivamente con los tamaños más finos²

2.3.2 Forma, tamaño y textura de los agregados pétreos. Para que una estructura asfáltica tenga buena resistencia al ahuellamiento se debe verificar la textura de la superficie de los agregados dependiendo del clima donde se usará.

Según Uge y Van de Loo (1974) las mezclas asfálticas elaboradas con materiales con agregados angulares son menos susceptibles a las deformaciones plásticas. El contenido de agregado en una mezcla asfáltica, la forma, textura y compactación que se le dé a la mezcla son factores que influyen en sus propiedades elásticas.

² THENOUX G, CARRILLO H. Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. [PhD Tesis]: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001

Cuando se da una compactación adecuada la mezcla presenta un mejor comportamiento elástico, haciendo que los vacíos sean mínimos³.

2.3.3 Contenido de polvo mineral en la mezcla Los materiales como el polvo mineral que componen las mezclas asfálticas cobran gran importancia y permiten establecer condiciones para la cantidad de ligantes que se debe emplear.

Según Padilla las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (Filler) y otro 5% de ligantes asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligantes asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

El Filler junto con los ligantes forma una masa asfáltica o mastico cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica⁴.

2.4 TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO

Cuando los ligantes asfálticos son poco viscosos, provocan que las mezclas asfálticas sean muy susceptibles a las deformaciones plásticas o a la formación de roderas, por eso se recomienda utilizar cementos asfálticos más duros (mayor viscosidad) en los climas cálidos para la construcción de pavimentos. (Moni Smith et al., 1985).

³ PADILLA Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. [PhD Tesis]. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2004

⁴ Ibíd.

El tipo de asfalto influye enormemente en la resistencia de la estructura, mezclas con mismas granulometrías y mismo tipo de agregados pétreos pero con diferente tipo de ligante pueden apreciarse diferencias en su resistencia por ello mismo.

El punto de ablandamiento puede valorar la aportación de los ligantes asfálticos convencionales a la resistencia de deformaciones plásticas de las mezclas, pero no es válido cuando se incluyen asfaltos modificados. Los asfaltos modificados tienen una baja susceptibilidad térmica a la de los convencionales, lo que favorece su buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.

El empleo de asfaltos de baja penetración y asfaltos modificados disminuyen el riesgo de las deformaciones plásticas. La componente elástica del ligantes asfáltico contribuye a aumentar el comportamiento elástico de la mezcla, de igual forma, el ligantes influye decisivamente en la componente viscosa y su mayor presencia dentro de la mezcla hace que aumente esta componente⁵.

2.5 CONDICIONES AMBIENTALES

2.5.1 Temperatura. Es conocido el hecho de que la temperatura medioambiental elevada reblandece el asfalto de las mezclas en los pavimentos, ocasionando una enorme susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas debido a que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso que la hace fluir y desplazarse con mucha facilidad.

Según Ruiz, a medida que aumente la temperatura la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones generadas por el tráfico se incrementan produciendo ahuellamiento en la mezcla debido a su componente viscosa. La temperatura

⁵ Ibíd.

medioambiental, por lo tanto, es un factor que influye de manera relevante en las deformaciones plásticas de los pavimentos porque permite que una mezcla asfáltica se comporte de manera viscosa o elástica⁶.

2.5.2 Agua. El agua puede aumentar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como una parte del proceso de evaluación de las mezclas.

Un estudio realizado en la universidad del estado de Oregón demostró que la susceptibilidad a las rodaduras de las mezclas asfálticas se incrementa significativamente si está sujeta a saturación. Como resultado se obtuvo un incremento en la superficie de rodadura de deformaciones visibles que pueden afectar el servicio prestado a los usuarios⁷.

2.6 METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Dentro de los procedimientos de laboratorio para estudiar el ahuellamiento de las mezclas asfálticas se destacan los ensayos triaxiales cíclicos con confinamiento constante y los ensayos sobre pista (I.N.V. 756).

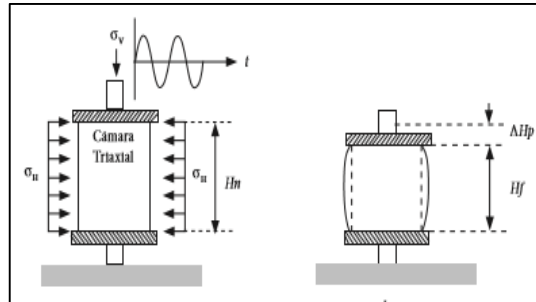
2.6.1 Ensayos triaxiales Someten a los materiales asfálticos que conforman la estructura de pavimento a condiciones de esfuerzo similares a los producidos por el paso de vehículos en la superficie, las probetas se introducen dentro de la cámara triaxial donde son sometidas a una condición de esfuerzo vertical de compresión que varía con una función sinusoidal (σ_v), a una presión horizontal estática e

⁶ Ibíd.

⁷ Ibíd.

isotrópica (σ_H) y a una temperatura constante. En las condiciones descritas, la muestra de ensayo experimenta alteraciones en su geometría: la altura total de la muestra disminuye por la aparición de deformaciones permanentes (ΔHP) y la probeta experimenta un achatamiento que genera variaciones en su radio⁸.

Figura 5. Esquemmatización ensayo triaxial.



Fuente. CARO, S. CORAL, L. CAICEDO, B. Modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas de pavimentos. [PhD Tesis]. Bogotá, Colombia: Universidad de los andes, 2003

2.6.2 Ensayo sobre pista. La norma I.N.V. 756 especifica el ensayo de ahuellamiento en pista para materiales bituminosos. El procedimiento es aplicable a mezclas en caliente y consiste en someter a una probeta al paso reiterado de una rueda, en condiciones determinadas de presión, temperatura y frecuencia de aplicación de carga⁹.

Figura 6. Ensayo de pista (Wheel tracking test - EN 12697-22)

⁸ CARO, S. CORAL, L. CAICEDO, B. Modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas de pavimentos. [PhD Tesis]. Bogotá, Colombia: Universidad de los andes, 2003

⁹ Ibíd.



Para el estudio de ahuellamiento en mezclas densas en caliente MDC-19 se empleó el ensayo sobre pista.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.1 AGREGADO MINERAL Y LIGANTE ASFÁLTICO

El agregado mineral y el ligante asfáltico empleado para la fabricación de las probetas con mezcla densa en caliente tipo MCD-19 y cemento asfáltico 60/70 convencional fueron suministrados por dos empresas ubicadas en el área metropolitana de Bucaramanga.

3.1.1 Identificación de los materiales necesarios para el diseño Las empresas ya mencionadas suministraron los diseños de mezcla densa en caliente MCD-19 por lo cual no se realizaron pruebas al agregado mineral y al asfalto. Los resultados fueron tomados de estos diseños como se muestra a continuación para cada una de las plantas de producción.

3.1.2 Equivalente de arena de suelos y agregados finos I.N.V. E – 133 – 13 Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos.

3.1.3 Masa unitaria aparente (Densidad Aparente) del llenante mineral en tolueno I.N.V. E – 225-013 Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la masa unitaria aparente de un material llenante, por sedimentación, empleando como medio líquido el tolueno.

3.1.4 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados I.N.V. E – 227-13 Esta norma describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos.

3.1.5 Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras I.N.V. E – 230-13 Esta norma describe el procedimiento que se deben seguir, para la determinación de los índices de aplanamiento y de alargamiento, de los agregados que se van a emplear en la construcción de carreteras. Se aplica a los agregados de origen natural o artificial, incluyendo los agregados ligeros y no es aplicable a los tamaños de partículas menores de 6.3mm ($\frac{1}{4}$ ") o mayores de 63 ($2 \frac{1}{2}$ ").

3.1.6 Análisis granulométrico I.N.V. E-213-13 Los resultados de la granulometría se emplean para determinar el cumplimiento de las especificaciones en relación con la distribución de los agregados de las mezclas que los contengan.

3.1.7 Diseño Marshall INV-E-748-13 El objetivo del diseño de una mezcla asfáltica es determinar la cantidad óptima de cemento asfáltico para que cumpla con las características principales del ensayo como son: La estabilidad, el flujo, los VAM, VFA, para unos V_a , (vacíos con aire), de diseño. Para determinar el porcentaje óptimo de ligante se preparan mezclas con la granulometría de diseño obtenida de acuerdo al criterio del INVIAS, donde recomienda que la curva tenga un comportamiento sensiblemente paralelo a las franjas granulométricas establecidas para cada tipo de mezcla. Para encontrar este contenido óptimo de ligante se realizan variaciones en los contenidos de ligante desde un 4.5% hasta 6.5% para tener un barrido de las propiedades de la mezcla con estas diferentes proporciones de participación de los materiales y así determinar el porcentaje óptimo de ligante.

3.2 AGREGADO PÉTREO Y LLENANTE MINERAL.

Los agregados y el llenante mineral fueron suministrados por dos empresas ubicadas en el área metropolitana de Bucaramanga.

Figura 7. Tamices y agregado utilizado



El material utilizado se caracterizó de acuerdo con los diseños suministrados por dichas empresas donde se dan los siguientes resultados:

3.2.1 Fórmula de trabajo de mezcla No. 1 tipo MDC-19 En la siguiente tabla (Tabla 1) se presenta a modo de resumen los resultados obtenidos luego de realizar los ensayos a los agregados pétreos.

Tabla 1. Resumen ensayos de caracterización de agregados pétreos.

Propiedad	Normas INVIAS	Resultado
Equivalente de arena (%)	INV E-133	73,6 %
Peso unitario en Tolueno	INV E-225	0,78 gr/ml
Caras fracturadas (%)	INV E-227	93,3%
Índice de alargamiento (%)	INV E-230	19,5%
Índice de aplanamiento (%)	INV E-230	17,2%

3.2.1.1 Análisis granulométrico A continuación, se presenta la granulometría del agregado empleado para la fabricación de las probetas y el uso granulométrico

determinado por la especificación INVIAS-13 en el artículo 450-13 tabla 450-7 para mezclas asfálticas densas MDC-19.

Tabla 2. Granulometría adoptada

TAMIZ	COMBINACIÓN
mm	%pasa
25	100
19	100
12,5	82,9
9,5	78,4
4,75	60,4
2	40,5
0,425	20
0,18	10,7
0,074	5,6

Esta curva granulométrica se obtiene combinando 22% de material triturado de ¾”, 40% de Arena de Triturada Gruesa (pasa 3/8”) y 38% Arena Triturada Fina.

Figura 8. Curva comportamiento granulométrico de la mezcla asfáltica densa MDC-19

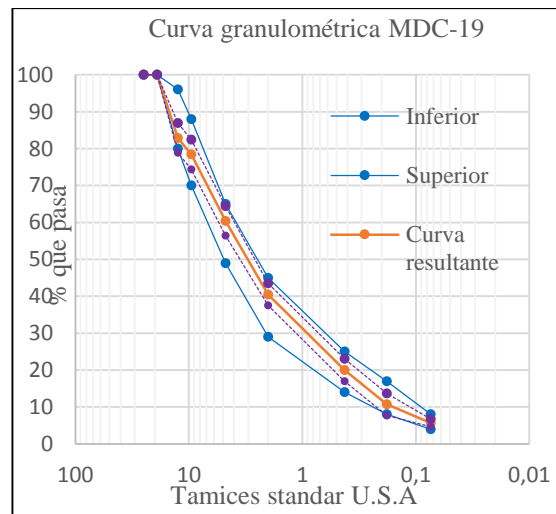


Figura 9. Material tamizado.



3.2.1.2 Caracterización del cemento asfáltico 60/70 convencional. Para la preparación de la mezcla asfáltica en caliente tipo MDC-19 se utilizó un cemento asfáltico 60/70 convencional con las siguientes características:

Tabla 3. Parámetros básicos cemento asfáltico 60/70.

Parámetro	Norma	Dato
Penetración (25°C, 100 g, 5s) 0,1 mm	INV E-706-13	64
Punto de ablandamiento °C	INV E-712-13	49,2
Índice de penetración	INV E-724-13	-0,82
Viscosidad absoluta (60°C) Cp	INV E 717-13	2280
Temperatura de mezclado °C	ASTM D-1559	147-152
Temperatura de compactación °C	ASTM D-1559	138-143

3.2.1.3 Fórmula Marshall de diseño. A continuación, se relacionan los resultados obtenidos en la elaboración de un diseño Marshall para mezcla asfáltica tipo MDC-19 con cemento asfáltico 60/70 convencional.

Tabla 4. Resumen de parámetros óptimos de diseño

Parámetro	Resultado
Transito NT3	
Numero de golpes por cara	75
Contenido óptimo de ligante 60/70 (%)	5,3
Gravedad especifica Bulk (gr/cm ³)	2,325
Estabilidad óptima Kg-f	1425
Gravedad especifica máxima teórica- Gmm	2,45
Vacíos en la mezcla total (aire) Va (%)	4,85
Vacíos en los agregados minerales VAM (%)	15,9
Vacíos llenos con asfalto VFA (%)	69,2

Parámetro	Resultado
Relación llenante/ligante efectivo (%)	1,18
Relación estabilidad/flujo (Kg-f/mm)	508

3.2.2 Fórmula de trabajo de mezcla No. 2 tipo MDC-19. En la tabla 5 se presenta a modo de resumen los resultados obtenidos luego de realizar los ensayos a los agregados pétreos.

Tabla 5. Resumen ensayos de caracterización de los agregados pétreos.

Propiedad	Norma INVIAS	Resultado
Equivalente de arena (%)	INV E-133	51 %
Peso unitario en Tolueno	INV E-225	0,61 gr/ml
Caras fracturadas (%)	INV E-227	95,82%
Índice de alargamiento (%)	INV E-230	19,5%
Índice de aplanamiento (%)	INV E-230	17,2%

3.2.2.1 Análisis granulométrico A continuación, se presenta la granulometría del agregado empleado para la fabricación de las probetas y el uso granulométrico determinado por la especificación INVIAS-13 en el artículo 450-13 tabla 450-7 para mezclas asfálticas densas MDC-19.

Tabla 6. Granulometría adoptada

TAMIZ	COMBINACIÓN
mm	%pasa
25	100
19	100
12,5	88,9
9,5	81,3
4,75	57,9
2	40,3
0,425	17,5
0,18	9,2
0,074	5,5

Figura 10. Curva comportamiento granulométrico.

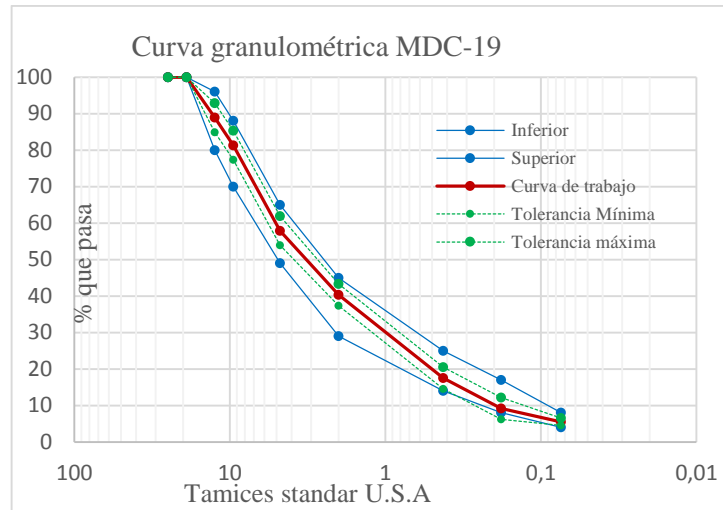


Figura 11. Material tamizado



3.2.2.2 Caracterización del cemento asfáltico 60/70 convencional. Para la preparación de la mezcla asfáltica en caliente tipo MDC-19 se utilizó un cemento asfáltico 60/70 convencional que presenta las siguientes características:

Tabla 7. Parámetros básicos de asfalto 60/70

Parámetro	Resultado
Penetración (25°C, 100 g, 5s) 0,1 mm	65
Punto de ablandamiento °C	47,5
Índice de penetración	-0,82
Viscosidad absoluta (60°C) Cp	1850
Contenido de agua (%)	0,11
Temperatura de mezclado °C	143-147
Temperatura de compactación °C	133-137

3.2.2.3 Fórmula Marshall de diseño. En la tabla 8, se muestra a manera de resumen el diseño Marshall para la mezcla MDC-19.

Tabla 8. Resumen de parámetros óptimos de diseño

Parámetro	Resultado
Transito NT3	
Numero de golpes por cara	75
Contenido óptimo de 60/70 Pbe (%)	5,1
Gravedad especifica Bulk (gr/cm3)	2,297
Estabilidad optima Kg-f	1165
Vacíos con aire (rodadura asfáltica) Va (%)	5,0
Vacíos mínimos en agregados minerales VAM (%)	16,3
Vacíos llenos de asfalto VFA (%)	69
Relación llenante/ligante efectivo (%)	1,12
Relación estabilidad/flujo (Kg-f/mm)	400

4. PREPARACIÓN DE PROBETAS ASFÁLTICAS MDC-19

La preparación de las probetas asfálticas se realizó basado en la elaboración de probetas cilíndricas para los ensayos Marshall para las dos empresas con las siguientes condiciones:

Tabla 9. Criterio de preparación.

Tipo de mezcla	MDC-19
Tipo de capa	Base
Categoría de tránsito	NT3
Temperatura para la mezcla	150 °C
Temperatura de compactación	135 °C

4.1 PROCESO DE MEZCLADO.

Teniendo la granulometría respectiva para cada empresa se realizó el proceso de acondicionamiento tanto del agregado pétreo como del cemento asfáltico 60/70 llevándolos a temperatura óptima.

Figura 12. Acondicionamiento agregado pétreo



Figura 13. Acondicionamiento asfalto



El proceso de mezclado se hizo manualmente a temperatura indicada en la tabla 9 y como se observa en las figuras 14 y 15 para luego iniciar el proceso de compactación.

Figura 14. Proceso de mezclado.



Figura 15. Temperatura de mezclado.



4.2 PROCESO DE COMPACTACIÓN.

Se estableció la densidad que debería tener el material con base al diseño Marshall previamente definido en las tablas 4 y 8 para cada formula de trabajo. Con esta densidad se calculó la cantidad de material necesario para obtener un volumen de 9000 cm³.

Este proceso se realizó haciendo uso de moldes paralelepípedos de dimensiones 18x50x10 [cm] como se observa en la figura 16, con la temperatura de compactación indicada en la tabla 9 y la cantidad de material mezclado necesario para llenar un volumen de 9000 cm³.

Figura 16. Molde para compactación.



Para la compactación de las probetas se siguió el procedimiento planteado por Vergel Jhoan y Tavera Jairo en el proyecto de grado “DEFINICIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS CON CARACTERÍSTICAS HOMOGÉNEAS PARA LA UTILIZACIÓN EN LA MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO” [6], haciendo uso de un martillo demoledor (martillo compactador) de marca dewalt D25980 de 31 [Kg] capaz de entregar 68 [J] por impacto, con una adaptación en su extremo de placa metálica con dimensiones 10 [cm] de largo y 9 [cm] de ancho.

Figura 17. Martillo demoledor



Figura 18. Punta metálica.



Se supone una malla imaginaria de 2 por 5 rectángulos sobre la superficie de compactación, con dimensiones de 9 [cm] de ancho y 10 [cm] de largo, medidas de la adaptación de la placa metálica; haciendo tres pasadas cada una de 10 segundos desplazando el martillo por la superficie de compactación proporcionando 200 golpes de 68 [J].

Figura 19. Proceso de compactación



Finalmente se hacen otros tres puntos de aplicación para distribuir de manera uniforme los esfuerzos a 4,5 [cm] del borde y en el centro de la probeta, realizando ocho recorridos cada uno de 10 segundos otorgando 500 golpes de 68 [J] obteniendo resultados como se observa en la figura 20.

Figura 20. Probetas compactadas.



5. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO

El ensayo de ahuellamiento se realizó mediante la maquina Wheel tracking Test (Large Size Device) siguiendo los siguientes pasos:

Tabla 10. Características de ensayo.

Número de especímenes	2 de Mezcla No 1 2 de Mezcla N0 2
Dimensiones especímenes	18x50x10 [cm]
Temperatura acondicionamiento	60 °C
Carga rueda	5 [KN]
Velocidad de aplicación	60 [ciclos/minuto]
Número de ciclos	100-30000 [ciclos]

5.1 ACONDICIONAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES

La máquina Wheel tracking Test (Large Size Device) permite introducir dos especímenes para ser ensayados después de 4 horas mientras la probeta llega a una temperatura de 60 °C para dar inicio al ensayo.

Figura 21. Acondicionamiento especímenes.



Llegando a la temperatura deseada se procede a iniciar los ciclos correspondientes para la toma de datos.

Figura 22. Inicio de ensayo



5.2 EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO.

Se procede a iniciar el ensayo con las probetas ya acondicionadas cumpliendo los ciclos necesarios para la medición de deformaciones.

Figura 23. Deformímetro.



Se toman las lecturas a lo largo de la probeta en 5 partes mediante los tres sensores como se muestra en la figura 24 con el fin de obtener las curvas de deformación. Para este tipo de mezclas los datos de mayor relevancia son los de 10000 y 30000 ciclos.

Figura 24. Distribución de las mediciones en las probetas.

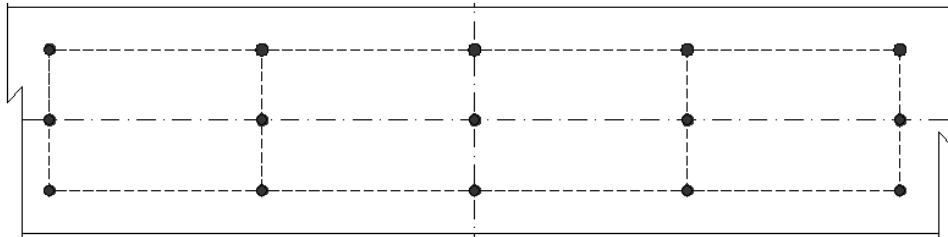


Figura 25. Toma de datos.



Al finalizar los 30000 ciclos se registró el ahuellamiento en cada uno de los especímenes, una depresión generada por el paso reiterado de la rueda.

Figura 26. Probetas planta 1



Figura 27. Probetas Planta 2



6. RESULTADOS DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la prueba EN 12697-22:2003 Wheel tracking Test (Large Size Device) para cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 11. Resultados de deformación.

Ciclos	Mezcla No 1		Mezcla No 2	
	Defor % A	Defor % B	Defor % A	Defor % B
100	0.154	0.891	0.687	0.605
300	0.552	1.625	1.296	1.181
1000	1.176	2.284	1.959	1.937
3000	1.990	2.968	2.840	2.986
10000	3.069	3.535	3.748	3.990
30000	4.231	-	4.775	-

En las figuras 28 y 29 se observa el ahuellamiento.

Figura 28. Deformaciones Mezcla No 1.

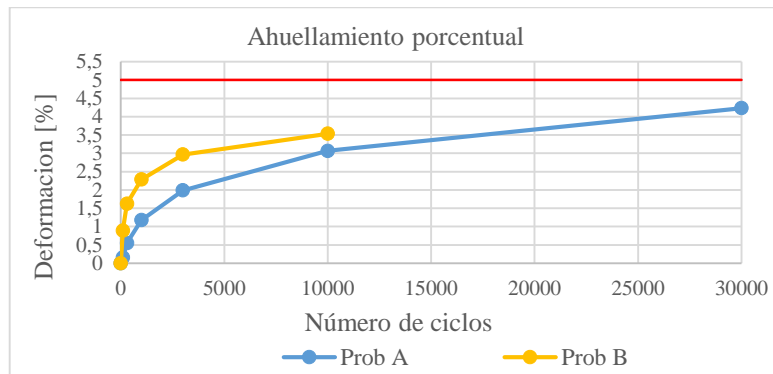
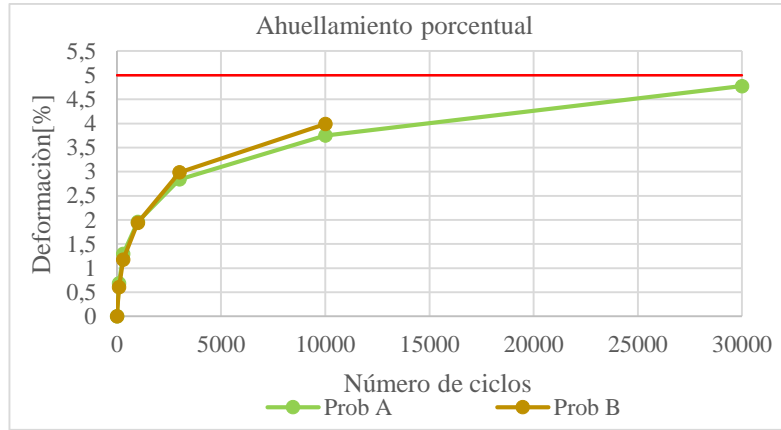


Figura 29. Deformaciones Mezcla No 2.



6.1 DEFORMACIONES EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE CADA PROBETA.

Las figuras 30 y 31 presentadas a continuación hacen parte de la mezcla 1.

Figura 30. Sección transversal probeta A.

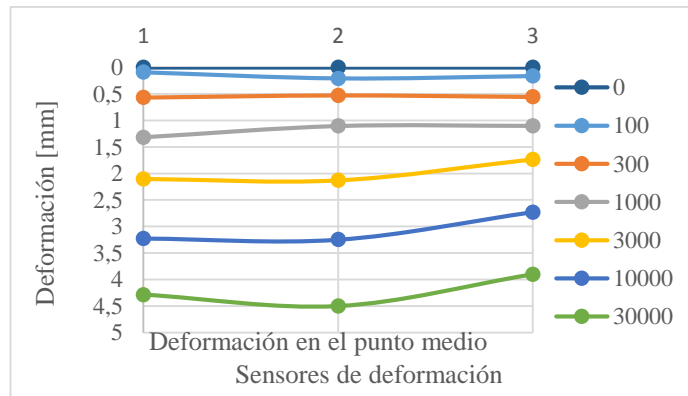
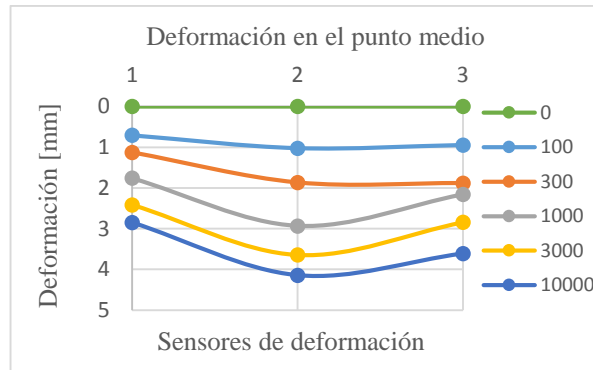


Figura 31. Sección transversal probeta B.



Las figuras 32 y 33 hacen parte de la mezcla 2.

Figura 32. Sección transversal probeta A.

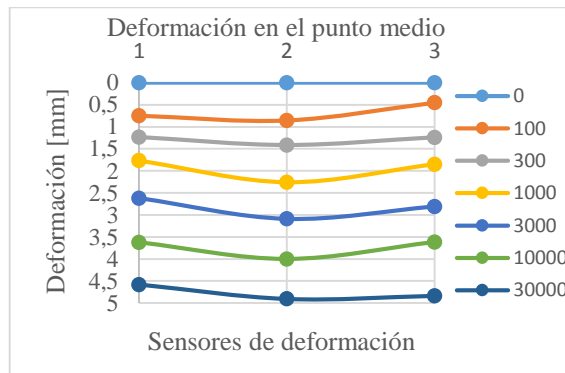
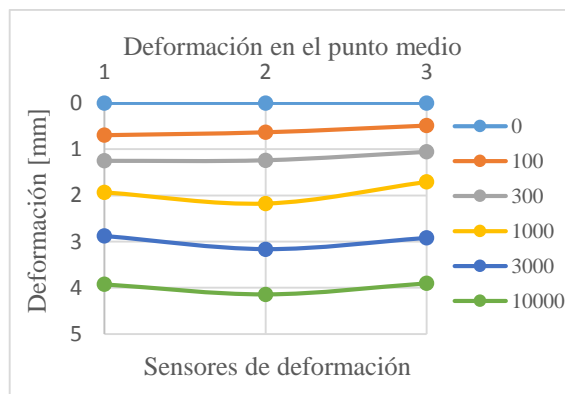


Figura 33. Sección transversal probeta B.



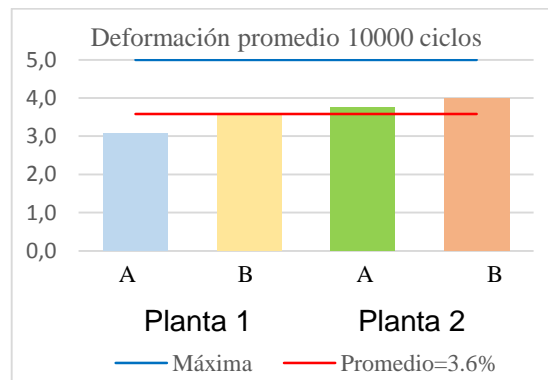
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 DEFORMACIONES PROMEDIO

La norma francesa “Routes et sécurité routière” define el valor crítico para el ahuellamiento promedio limite como 5% para especímenes de mezclas usadas para base a los 30000 ciclos de carga en la máquina de ahuellamiento UNE-EN 12697-22 dispositivo grande¹⁰

En la figura 34 se muestra las deformaciones promedio para 10000 ciclos de cada material, donde se encontró que la deformación para 10000 ciclos es de 3.6%.

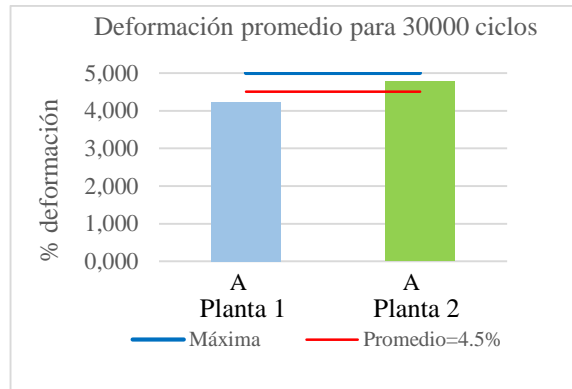
Figura 34. Deformaciones proporcionales 10000 ciclos.



En la figura 35 se muestran las deformaciones promedio para 30000 ciclos de cada material, donde se encontró que la deformación para 30000 ciclos es de 4.5 %.

¹⁰ JEAN-LUC Delorme, Chantal de la Roche y Louissette Wendling. “ROUTES ET SÉCURITÉ ROUTIÈRE”, [Manual LPC]. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. ISBN 2-7208-2588-0

Figura 35. Deformaciones proporcionales 30000 ciclos.



7.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS AGREGADOS.

Terminados los ensayos para cada una de las probetas, se realizó un corte transversal para analizar la posición de los agregados debido al proceso de compactación y el efecto de la repetición de cargas en laboratorio al que fueron sometidas.

Figura 36. Probetas A-B Planta 1.



Figura 37. Probetas A-B Planta 2.



Se observa que las mezclas presentaron una distribución uniforme de los agregados y el proceso de compactación fue adecuado.

7.3 COMPARACIÓN CON MSC-19 Y MGC-25.

Como objetivo de este proyecto de investigación se comparan los resultados de las deformaciones obtenidas bajo especificaciones internacionales para (MDC), (MSC) definido por el trabajo de grado de José A. Marroquín y Darío J. Uribe 2016¹¹, y (MGC) definido por el trabajo de grado de Álvaro J. Niño y Anthony Hernández 2017¹².

Las probetas fueron ensayadas y elaboradas bajo las mismas condiciones. A continuación se presentan las propiedades volumétricas más relevantes para cada una de las mezclas.

Tabla 12. Propiedades volumétricas de mezclas en caliente

Parámetro	Tipo de mezcla			
	MGC-25	MSC-19	MDC-19 Planta 1	MDC-19 Planta 2
Contenido Optimo de CAN 60/70 Pbe (%)	4.7	4.8	5.3	5.1
Gravedad específica Bulk gr/cm ³	2.388	2.348	2.325	2.297
Vacíos en la mezcla total (aire) Va (%)	5.01	4.0	4.85	5
Vacíos en los agregados minerales VAM (%)	14.65	14.86	15.9	16.3
Vacíos llenos con asfalto VFA (%)	65.80	73.08	69.2	69

¹¹ MARROQUÍN, J.A. Y URIBE, D.J. Estudio de la susceptibilidad al ahuellamiento en mezclas asfálticas semidensa [PhD Tesis]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016

¹² NIÑO, A.J. Y HERNÁNDEZ, A.N. Estudio de la susceptibilidad al ahuellamiento en mezclas asfálticas gruesas [PhD Tesis]. Bucaramanga, Colombia Universidad Industrial de Santander, 2017

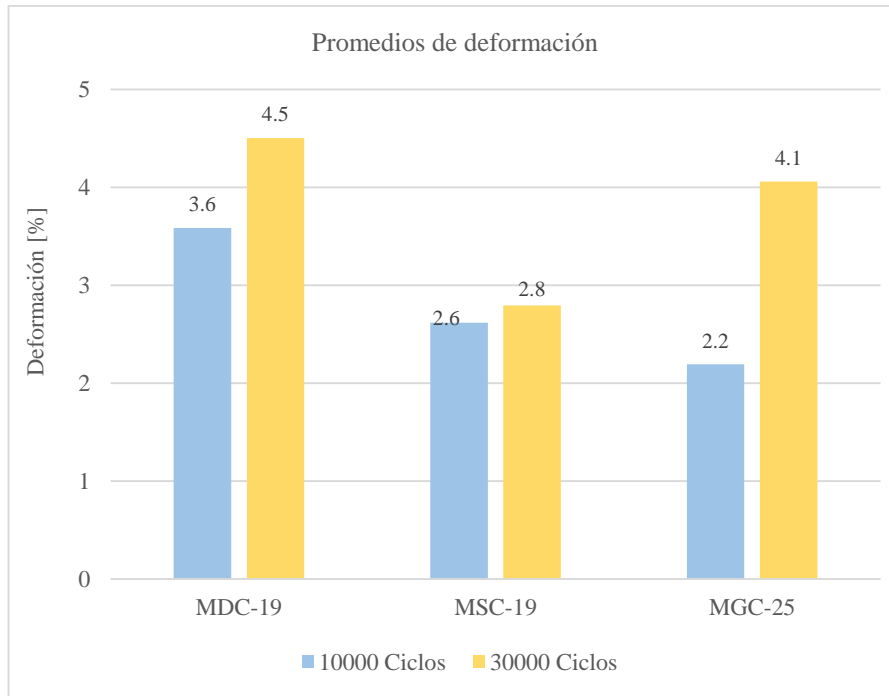
En la tabla 13 se muestran los resultados de las deformaciones y los promedios para 10000 y 30000 ciclos que fueron obtenidos para cada tipo de mezcla.

Tabla 13. Deformaciones para tipo de mezcla.

Mezcla	Empresa	probeta	Deformación	
			10000 Ciclos	30000 Ciclos
MDC-19	Planta 1	A	3.069	4.231
		B	3.535	-
	Planta 2	A	3.748	4.775
		B	3.99	-
Promedio			3.6	4.50
MSC-19	Planta 2	A	4.11	-
		B	2.02	-
		C	2.91	3.63
		D	1.43	1.96
Promedio			2.6	2.8
MGC-25	Planta 2	1-A	1.91	4.88
		2-A	3.18	3.24
		2-B	2.26	-
		3-A	1.8	-
		3-B	1.82	-
Promedio			2.2	4.1

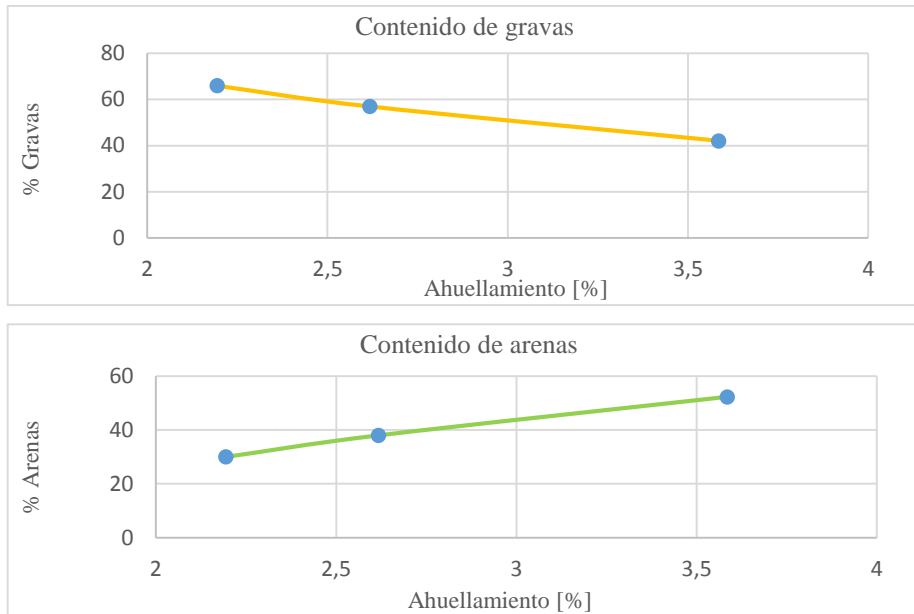
En la figura 38 se observan las deformaciones presentadas en la máquina de ahuellamiento.

Figura 38. Deformaciones promedio para cada mezcla.



Se revisó la granulometría de las tres mezclas estudiadas con el fin de establecer posibles parámetros que influyan significativamente en el ahuellamiento como se muestra en la figura 39.

Figura 39. Parámetros relacionados con el ahuellamiento



Además, aplicando el método de Bailey¹³ para encontrar de manera más apropiada la proporción de agregados grueso y fino en las mezclas de gradación continua estudiadas en laboratorio, con el fin de identificar una granulometría más eficiente para reducir el ahuellamiento en posteriores estudios. Se encontraron los siguientes resultados:

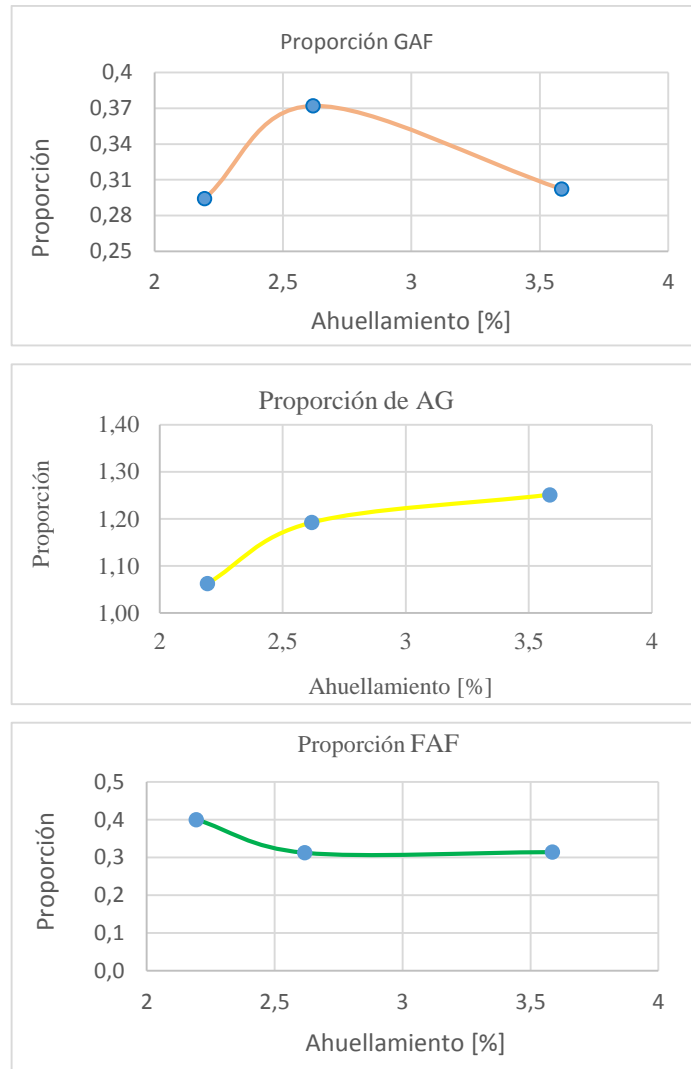
Tabla 14. Proporción de agregados

	DENSA	SEMIDENSA	GRUESA
Proporción AG	1.251	1.192	1.063
Proporción GAF	0.302	0.372	0.294
Proporción FAF	0.314	0.313	0.4

En la figura 40 se muestran las gráficas de proporción de los agregados gruesos (AG), proporción gruesa de agregados finos y proporción fina de los agregados finos (FAF) respecto al ahuellamiento presentado en cada mezcla.

¹³ PÉREZ, Gabriel Alexis. Análisis de los parámetros de Bailey y su influencia en la segregación de mezclas densas en caliente [PhD Tesis]. Bucaramanga, Colombia Universidad Industrial de Santander, 2012

Figura 40. Proporción agregado grueso y fino



8. CONCLUSIONES

1. Luego de realizado el ensayo de ahuellamiento para las mezclas estudiadas (MDC-19, MSC-19 y MGC-25) se encontró que la mezcla asfáltica con mayores deformaciones permanentes es la mezcla densa en caliente MDC-19 tanto para 10000 como 30000 ciclos de carga, con deformaciones de 3.6% y 4.5% con relación a la altura de la probeta respectivamente. La mezcla de mayor resistencia al ahuellamiento fue la mezcla semidensa en caliente MSC-19, siendo menor un 28% para 10000 ciclos y un 38% para 30000 ciclos respecto a la mezcla densa en caliente MDC-19.

2. A pesar de las mayores deformaciones alcanzadas por las probetas del material MDC-19, los resultados fueron inferiores a la deformación máxima de 5% establecida por la normativa francesa "Routes et sécurité routière", siendo resistentes a deformaciones plásticas y permitiendo ser usadas en capas de pavimento que requieran tener un buen desempeño ante deformaciones permanentes. Se debe aclarar que esta normativa se ajusta a climas muy diferentes a los de Colombia. En climas tropicales donde prácticamente en todo el año se presentan temperaturas cálidas, el ahuellamiento pudiera ser mayor y no ajustarse a la necesidad de nuestras condiciones medioambientales.

3. Relacionando las granulometrías de las tres mezclas trabajadas se encontró que la mezcla con menor porcentaje de gravas y mayor porcentaje de arenas presenta un mayor ahuellamiento para los diferentes ciclos de carga.

4. Haciendo uso del método de Bailey se identificó una tendencia del material grueso a relacionarse con el ahuellamiento, a mayor proporción de agregado grueso mayor ahuellamiento presentará la mezcla. Por eso, para estudios posteriores se

recomienda controlar los parámetros propuestos por Bailey buscando diseños de mezclas más eficientes.

5. Finalizado los procedimientos de ensayo para mezclas densas se pudo identificar que las investigaciones realizadas por el ingeniero Guillermo Thenoux avalan los estudios realizados para este tipo de mezclas. La resistencia al ahuellamiento depende de la cohesión entre partículas gruesas y la cantidad de agregado de menor tamaño debe ocupar el espacio dejado por el agregado más grueso durante el proceso de compactación; por esta razón se recomienda escoger granulometrías para mezclas densas donde el material de menor tamaño sea el necesario para cumplir con estos requisitos.

BIBLIOGRAFÍA

CARO, S. CORAL, L. CAICEDO, B. Modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas de pavimentos. [PhD Tesis]. Bogotá, Colombia: Universidad de los andes, 2003.

GUTIÉRREZ, Francisco A. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Manual para la inspección de pavimentos flexibles [Manual LPC]: Instituto Nacional de Vías, 2006.

INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras: <http://www.invias.gov.co>, (Citado el: 5 de noviembre de 2017).

JEAN-LUC DELORME, Chantal de la Roche y Louissette Wendling. "Routes et sécurité ROUTIÈRE", [Manual LPC]. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. ISBN 2-7208-2588-0.

MARROQUÍN, J.A. y URIBE, D.J. Estudio de la susceptibilidad al ahuellamiento en mezclas asfálticas semidensa [PhD Tesis]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2016.

NIETO, Juan P. Susceptibilidad al ahuellamiento en carpetas asfálticas. [PhD Tesis]. Buenos Aires, Argentina: Centro de Investigaciones Viales, 2009.

NIÑO, A.J. y HERNÁNDEZ, A.N. Estudio de la susceptibilidad al ahuellamiento en mezclas asfálticas gruesas [PhD Tesis]. Bucaramanga, Colombia Universidad Industrial de Santander, 2017.

PADILLA Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. [PhD Tesis]. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2004.

PÉREZ, Gabriel Alexis. Análisis de los parámetros de Bailey y su influencia en la segregación de mezclas densas en caliente [PhD Tesis]. Bucaramanga, Colombia Universidad Industrial de Santander, 2012

THENOUX G, CARRILLO H. Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. [PhD Tesis]: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001.

VERGEL, J.A. y TAVERA, J.D. Definición del proceso de fabricación de probetas con características homogéneas para la utilización en la máquina de ahuellamiento [PhD Tesis]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2015.