

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

**JOSÉ ANDREY MARROQUÍN RAMIREZ
DARIO JOSÉ URIBE RIOS**

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

2017

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

**JOSÉ ANDREY MARROQUÍN RAMIREZ
DARIO JOSÉ URIBE RIOS**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil.

**Director:
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Ph.D. en Ingeniería civil**

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

2017

DEDICATORIA

"Darse por vencido no es excusa para decir que no se pudo lograr el objetivo" por esta y mil razones más agradezco a Dios que me dio la sabiduría, salud y las ganas para culminar este proyecto del cual me siento muy orgulloso y así mismo cumplir mi meta de ser ingeniero civil.

A mi papá Gustavo que con mucho esfuerzo, paciencia, experiencia y sabiduría me guío para cumplir con lo propuesto al inicio de toda esta carrera.

A la mujer más humilde y noble que lucha incansablemente noche y día porque nunca nos falte nada, sin su apoyo incondicional y gran amor orgullosamente le dedico este triunfo a mi madre Odilia.

A mis hermanas Eliana y Alejandra que con sus locuras y amor incondicional siempre me apoyaron en cada una de mis decisiones durante todo este tiempo.

Y a todas las personas que de una u otra forma me ayudaron para culminar con éxito esta etapa de mi vida, mil gracias a todos...

JOSÉ ANDREY MARROQUÍN RAMIREZ

DEDICATORIA

A Dios por ser la luz que guía mi camino y el que bendice mi vida.

A mis padres Carmen Elisa y Manuel Dario por su amor incondicional, su apoyo y la formación recibida como ser humano. Son una bendición y un tesoro invaluable en mi vida, sin ellos este logro no hubiera sido posible.

A mi hermana Silvia Nathaly por su amor y sus opiniones que enriquecen mi conocimiento, ha sido una persona maravillosa que con su forma de ver la vida nos ha aportado madurez.

A mi novia Karol Vanessa que con su amor ha llenado mi vida de felicidad, sus consejos y buen ejemplo han sido una referencia para lograr este paso de mi vida.

A todos mis familiares que con sus muestras de amor y cariño hacen feliz cada momento de mi vida.

Al profesor Eduardo Alberto Castañeda Pinzón quien nos brindó su valiosa asesoría y estuvo dispuesto en todo momento a compartir sus conocimientos. A todas las personas que de una u otra forma me han acompañado en este logro.

DARIO JOSÉ URIBE RIOS

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 18 |
| 1. OBJETIVOS | 20 |
| 1.1 GENERAL..... | 20 |
| 1.2 ESPECÍFICOS..... | 20 |
| 2. MARCO TEORICO | 21 |
| 2.1. DEFINICIÓN DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS..... | 21 |
| 2.2. TIPOS DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS | 22 |
| 2.2.1. Ahuellamiento por fallas en la subrasante. | 23 |
| 2.2.2. Ahuellamiento por falla en la mezcla asfáltica. | 24 |
| 2.3. MECANISMOS DE FORMACIÓN DE AHUELLAMIENTO..... | 25 |
| 2.3.1. Solicitaciones de cargas a un pavimento..... | 28 |
| 2.3.2. Naturaleza cíclica de las cargas que actúan en un pavimento. | 29 |
| 2.3.3. Estado de esfuerzos que producen las cargas en función de su magnitud y tipología | 31 |
| 2.4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DE AHUELLAMIENTO..... | 32 |
| 2.4.1. Granulometría de los agregados pétreos..... | 32 |
| 2.4.2. Forma, Tamaño y Textura de los agregados pétreos. | 33 |
| 2.4.3. Contenido de Polvo Mineral (Filler) en la mezcla..... | 35 |
| 2.4.4. Tipo de Ligante Asfáltico..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.5. Contenido de Ligante Asfáltico. | 38 |
| 2.4.6. Contenido de Vacíos en el Agregado Mineral..... | 39 |
| 2.4.7. Contenido de Vacíos en la Mezcla Asfáltica. | 39 |
| 2.4.8. Cargas por Eje Equivalente de los vehículos y Presión de contacto de los neumáticos con el pavimento | 41 |
| 2.4.9. Número de Repeticiones de carga..... | 41 |
| 2.4.10. Empleo de modificadores asfálticos..... | 42 |
| 2.4.11. Temperatura medioambiental. | 45 |
| 2.4.12. Agua..... | 45 |
| 2.5. CURVA TÍPICA DE AHUELLAMIENTO..... | 46 |
| 3. METODOLOGIA Y RECOPIACION DE LA INFORMACIÓN..... | 47 |
| 3.1 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS | 47 |
| 3.1.1. Agregado pétreo | 47 |
| 3.1.2. El ligante asfaltico | 50 |
| 3.1.3. Caracterización de la mezcla | 51 |
| 3.1.3.1. Gravedad específica máxima teórica (Gmm)..... | 51 |
| 3.1.3.2. Gravedad específica Bulk y densidad de mezcla asfáltica compactada ... | 53 |
| 3.1.3.3. Calculo de los porcentajes de vacíos..... | 55 |
| 3.2. FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA LA UTILIZACIÓN EN LA MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO..... | 57 |
| 4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 59 |
| 4.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO..... | 59 |
| 4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES | 61 |
| 4.3. RELACION DE VACIOS (VAM, VA, VFA). | 61 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4. ENSAYO DE PROBETAS EN LA MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO. | 63 |
| 4.5. DEFORMACIONES MÁXIMAS EN CADA UNA DE LAS PROBETAS | 67 |
| 4.6. CURVAS DE AHUELLAMIENTO PARA CADA UNA DE LAS PROBETAS.... | 68 |
| 4.7. PENDIENTES EN LAS CURVAS DE AHUELLAMIENTO | 69 |
| 4.8. SECCIÓN TRANSVERSAL EN CADA UNA DE LAS PROBETAS DESPUES DEL ENSAYO..... | 69 |
| 4.9. DEFORMACIÓN EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL MEDIA DE LAS PROBETAS | 72 |
| 4.10. GRÁFICAS EN LA ESCALA LOGARÍTMICA DE LA PROFUNDIDAD PROPORCIONAL (%) CONTRA EL NÚMERO DE CICLOS EN CADA PROBETA..... | 74 |
| 4.11. ANÁLISIS DE DAÑOS CAUSADOS DEBIDO A LA COMPACTACIÓN EN EL AGREGADO..... | 77 |
| 5. CONCLUSIONES | 78 |
| 6. RECOMENDACIONES..... | 79 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |
| BIBLIOGRAFÍA | 87 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Ahuellamiento. | 19 |
| Figura 2. Ahuellamiento en la carpeta de rodadura. | 23 |
| Figura 3. Ahuellamiento por falla en la mezcla asfáltica. | 24 |
| Figura 4. Estado de esfuerzos en una sección longitudinal de un pavimento. Referencia, (28). | 30 |
| Figura 5. Etapas en un ensayo de ahuellamiento. | 46 |
| Figura 6. Tamices empleados para la granulometría. | 48 |
| Figura 7. Agregados retenidos en cada tamiz en el análisis granulométrico. | 48 |
| Figura 8. Agregado grueso. | 49 |
| Figura 9. Agregado fino en el proceso para el cálculo de la gravedad específica. | 49 |
| Figura 10. Llenante mineral en el proceso para el cálculo de la gravedad específica. | 50 |
| Figura 11. Asfalto 60-70 sometido al proceso para el cálculo de su gravedad específica. | 51 |
| Figura 12. Mezcla asfáltica sin compactar para el cálculo de Gmm. | 52 |
| Figura 13. Mezcla asfáltica sin compactar en el proceso para el cálculo de Gmm. | 52 |
| Figura 14. Herramientas utilizadas para la compactación de las probetas. | 54 |
| Figura 15. Mezcla asfáltica compactada. | 54 |
| Figura 16. Molde para la compactación de la mezcla. | 57 |
| Figura 17. Equipo compactador, consta de un taladro demoledor de 31 Kg y una punta arreglada para este procedimiento. | 58 |
| Figura 18. Máquina de ahuellamiento. | 58 |
| Figura 19. Granulometría ideal. | 60 |
| Figura 20. Molde de la probeta para la máquina de ahuellamiento. | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Máquina de ahuellamiento en funcionamiento (wheel tracker en 12697-22 large device). | 64 |
| Figura 22. Probeta antes y después de ser ensayada en la máquina de ahuellamiento..... | 65 |
| Figura 23. Probetas luego del paso por la máquina de ahuellamiento. | 65 |
| Figura 24. Resultados obtenidos en la máquina de ahuellamiento para las probetas A, B, C y D, sometidas a 10000 ciclos. | 67 |
| Figura 25. Resultados obtenidos en la máquina de ahuellamiento para las probetas C y D, sometidas a 30000 ciclos. | 67 |
| Figura 26. Resultados obtenidos en la máquina de ahuellamiento para las probetas en estudio. | 68 |
| Figura 27. Sección transversal de la probeta A luego de ser ensayada. | 70 |
| Figura 28. Sección transversal de la probeta B luego de ser ensayada. | 70 |
| Figura 29. Sección transversal de la probeta C luego de ser ensayada. | 71 |
| Figura 30. Sección transversal de la probeta D luego de ser ensayada. | 71 |
| Figura 31. Deformación causada en la probeta A, referenciados en el punto medio de la toma de deformaciones según los ciclos..... | 72 |
| Figura 32. Deformación causada en la probeta B, referenciados en el punto medio de la toma de deformaciones según los ciclos..... | 72 |
| Figura 33. Deformación causada en la probeta C, referenciada en el punto medio de la toma de deformaciones según los ciclos..... | 73 |
| Figura 34. Deformación causada en la probeta D, referenciada en el punto medio de la toma de deformaciones según los ciclos..... | 73 |
| Figura 35. Gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra número de ciclos para la probeta A. | 74 |
| Figura 36. Gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra número de ciclos para la probeta B. | 75 |
| Figura 37. Gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra número de ciclos para la probeta C. | 75 |

Figura 38. Gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra número de ciclos para la probeta D.76

Figura 39. Comparación mezcla asfáltica desintegrada, original y con modificación en el contraste.....77

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Valores obtenidos mediante el proceso descrito en la norma INVIAS INV E-735-07. | 53 |
| Tabla 2. Valores obtenidos para el cálculo de la gravedad específica Bulk de la mezcla compactada. | 55 |
| Tabla 3. Valores obtenidos para el cálculo de porcentajes de vacíos..... | 56 |
| Tabla 4. Franjas establecidas para deferentes mezclas, para este proyecto se utilizó la mezcla semidensa MSC-19. | 59 |
| Tabla 5. Granulometría adoptada para el desarrollo del proyecto. | 60 |
| Tabla 6. Valores obtenidos mediante la caracterización de los materiales. | 61 |
| Tabla 7. Valores obtenidos para el cálculo de los vacíos. | 61 |
| Tabla 8. Relación de vacíos obtenidas. | 61 |
| Tabla 9. Porcentajes de vacíos permitidos en la norma INVIAS 2012..... | 62 |
| Tabla 10. Características de la probeta para ser ensayada en la máquina de ahuellamiento..... | 63 |
| Tabla 11. Características de los ensayos que se realizaron para cada una de las probetas. | 66 |
| Tabla 12. Pendientes porcentuales de la curva Profundidad proporcional (%) vs Número de ciclos..... | 69 |

LISTA DE ANEXOS¹

ANEXO A. RESULTADOS PRUEBA 1

ANEXO B. RESULTADOS PRUEBA 2

¹ Ver anexos en carpeta adjunta al CD y puede visualizarlos en base de datos biblioteca UIS

RESUMEN

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

AUTOR: JOSÉ ANDREY MARROQUÍN RAMIREZ
DARIO JOSÉ URIBE RIOS**

PALABRAS CLAVE: Ahuellamiento, Ensayo Marshall, franjas granulométricas, MAC (mezcla asfáltica compactada), caracterización de materiales.

DESCRIPCIÓN:

Se analizó la susceptibilidad al ahuellamiento de la mezcla asfáltica semidensa de gradación continua en caliente (MSC-19) [1] especificada en el documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS 2012, teniendo en cuenta la compactación, clima y tráfico. Se realizó la caracterización de materiales determinando la gravedad específica Bulk, gravedad específica Aparente, gravedad específica Bulk sobresaturada superficialmente seca (SSS) y el porcentaje de absorción en los agregados fino y grueso, gravedad específica Bulk en el llenante mineral y ligante asfáltico, y por último, densidad en el ligante asfáltico empleados en el diseño de la mezcla, suponiendo los porcentajes de agregados dentro de las franjas granulométricas especificadas y un porcentaje de asfalto. Se realizaron probetas para el ensayo Marshall y se determinaron los factores influyentes para calcular los vacíos que se presentan en la mezcla asfáltica compactada (MAC), cumpliendo los estándares establecidos en la especificación INVIAS 2012. Con la mezcla óptima se fabricaron las probetas para ensayar en la máquina de ahuellamiento y conocer las deformaciones presentadas. Se realizaron cuatro probetas, A y B, que fueron sometidas a 10000 ciclos, C y D, a 30000 ciclos, acondicionadas a una temperatura de 60 ° C y carga de 5KN. Se observan las deformaciones progresivas que sufrieron permitiéndonos conocer la susceptibilidad que presentan al ahuellamiento, posteriormente se hizo una comparación de los resultados obtenidos con especificaciones internacionales como la Europea.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico -mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: CASTAÑEDA, Eduardo Alberto. Ingeniero civil, Ph.D

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF SUSCEPTIBILITY TO STORAGE IN SEMI-ASTHALTIC ASFALIC MIXTURES*

AUTHOR: JOSÉ ANDREY MARROQUÍN RAMIREZ
DARIO JOSÉ URIBE RIOS**

KEYWORDS: Runoff, Marshall test, granulometric strips, MAC (compacted asphalt mix), material characterization..

DESCRIPCIÓN:

The susceptibility to rutting of the semidense continuous hot graded asphalt mixture (MSC-19) [1] was specified in the normative document of the National Institute of Roads INVIAS 2012, taking into account compaction, climate and traffic. Characterization of materials was determined by determining the specific gravity Bulk, specific gravity Apparent, specific gravity Bulk surface supersaturated Bulk (SSS) and the percentage of absorption in the fine and coarse aggregates, specific gravity Bulk in the mineral filler and asphalt binder, and Last, density in the asphalt binder used in the design of the mixture, assuming the aggregate percentages within the specified particle size ranges and a percentage of asphalt. Samples were made for the Marshall test and influential factors were calculated to calculate the voids presented in the compacted asphalt mixture (MAC), meeting the standards established in the INVIAS 2012 specification. With the optimum mixture, test specimens were fabricated in The roasting machine and know the deformations presented. Four specimens, A and B, were performed, which were subjected to 10000 cycles, C and D, at 30000 cycles, conditioned at a temperature of 60 ° C and loading of 5KN. We observe the progressive deformations that they suffered, allowing us to know the susceptibility that they present to the rutting, after which a comparison was made of the results obtained with international specifications such as the European one.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. Civil Engineering school. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Ingeniero civil, PhD

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de la mejora continua de las vías con pavimento flexible, refiriéndonos a calidad en la carpeta de rodadura surge esta investigación, la cual nos permite conocer la susceptibilidad de la mezcla asfáltica semidensa en caliente (MSC-19) al ahuellamiento, fenómeno definido como la deformación permanente creada en la carpeta de rodadura que obedece a una depresión acanalada creada por las cargas repetidas que producen el tránsito de los vehículos, condiciones climáticas, malos procesos constructivos, fallas en la subrasante y otros factores. El ahuellamiento genera deterioro de la estructura de pavimento, peligrosidad al transitar la vía, pérdida en la comodidad vial y además factores socioeconómicos negativos. El conocimiento acerca de las mezclas densas es mayor que el de las mezclas semidensas en Colombia, siendo esta una de las razones que justifican nuestro trabajo, con el cual buscamos aportar información y deseamos que se continúe con el estudio de las demás clases de mezclas usadas en nuestras vías, teniendo esta información, analizarla y compararla, para determinar alternativas de mejora en la composición de las mezclas, procesos constructivos y demás factores que influyen en este fenómeno.

Figura 1. Ahuellamiento.



Fuente: SLIDE SHARE Mezclas asfálticas modificadas [en línea] disponible en:
<http://es.slideshare.net/alexa842003/presentacin-asfalto-caucho>

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Medir deformaciones permanentes en muestras de mezcla asfáltica semidensa sometidas al paso reiterado de cargas en laboratorio.

1.2 ESPECÍFICOS

- Estudiar las deformación acumulada de dos muestras de mezcla asfáltica semidensa fabricadas con base en especificaciones de INVIAS (INVIAS, 2012).
- Utilizar la máquina de ahuellamiento de rodillo grande para observar los cambios, principalmente las deformaciones, en las mezclas asfálticas semidensas, sometidas a una carga canalizada constante cíclica y a temperatura constante.
- Comparar los resultados de la deformación de las muestras con exigencias internacionales para establecer un nivel de vulnerabilidad de las mezclas asfálticas semidensas al ahuellamiento.

2. MARCO TEORICO

2.1. DEFINICIÓN DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

Las deformaciones plásticas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

Las deformaciones plásticas se caracterizan principalmente por una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original, asociado a temperaturas relativamente altas. Para esto se necesita que la mezcla esté elaborada con un cemento asfáltico consistente, lo más próximo posible a un sólido elástico también a temperaturas relativamente altas.

El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación de ahuellamiento está íntimamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico, la composición granulométrica y calidad de los agregados pétreos y aditivos (en ciertos casos) empleados en la fabricación de la mezcla.

La temperatura funcional del asfalto es de gran importancia, así como los gradientes de temperatura que en ocasiones pueden ser cambiados debido a la conductividad térmica de la mezcla, así como la brillantez o la reflectividad, por medio de la selección del agregado, lo que afecta a la deformabilidad de los

pavimentos. La distribución lateral de la zona de rodadas está influenciada por la velocidad del tráfico, el ancho del carril y la profundidad de las ahuellamiento. Las velocidades bajas del tráfico, corresponden a frecuencias de carga más bajas, algo que contribuye directamente al desarrollo de ahuellamiento en las capas asfálticas.

La acumulación de deformaciones plásticas en una capa de concreto asfáltico pueden ser causadas por una reducción volumétrica del material que compone la mezcla asfáltica y por las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes que transmiten las cargas del tráfico [2].

2.2. TIPOS DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS

La deformación plástica permanente se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño, se llama permanente, porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. Existen dos principales tipos de ahuellamiento: ahuellamiento por fallas en la subrasante y ahuellamiento por fallas en la capa de asfalto, ésta última, de gran interés, debido a que representa el tema principal de este trabajo.

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. La densificación de material es un fenómeno secundario dentro de la formación de ahuellamiento, potencialmente contribuye en menos de 5 mm, en la profundidad de la rodera. Otras causas que influyen en la producción de hundimientos en los pavimentos asfálticos son los espesores delgados de pavimento, pérdida de material en la superficie por donde ruedan los vehículos y deformaciones plásticas en la capa de asfalto [3].

2.2.1. Ahuellamiento por fallas en la subrasante. Son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto. Aunque los materiales duros pueden reducir este tipo de ahuellamiento, es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí. Esencialmente, no hay suficiente fuerza en el pavimento o dureza para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable. También puede ser causado por un inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad. La deformación ocurre en las capas inferiores.

Figura 2. Ahuellamiento en la carpeta de rodadura.



Fuente: UPCOMMONS Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos, [en línea] disponible en: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15>

Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento, por debajo en la estructura del pavimento. Si la capa de pavimento es suficientemente flexible, se deformará por tener espesores delgados. Los hundimientos por ahuellamiento tienden a ser de anchos que van desde los 750 mm. Hasta los 1000 mm, con poca profundidad y formas curvadas cruzando la sección del pavimento sin fisurarse. Si se hiciera una zanja o corte, la deformación de pavimento indicaría, que el espesor del pavimento permanece constante y cualquiera de las capas granulares (base o sub-base) tiene deformaciones. Si la estructura del pavimento es lo

suficientemente rígida a la deformación, ocurrirán fisuras por fatiga de un lado a otro en el ancho entero de la trayectoria de la llanta.

Algunas veces atravesando toda la sección del pavimento, parecería un tipo de falla por punzonamiento, con piezas quebradas empujadas hacia abajo. Algunas ahuellamiento tienden a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la rueda [4].

2.2.2. Ahuellamiento por falla en la mezcla asfáltica. Es el tipo de ahuellamiento que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, se produce debido a la escasez de la capacidad portante o a la insuficiencia de soportar cargas pesadas, una mezcla asfáltica débil, va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, las ahuellamiento pueden ocurrir en la capa superficial de asfalto o debido a debilitamiento en las capas inferiores de asfalto.

Figura 3. Ahuellamiento por falla en la mezcla asfáltica.



Fuente: UPCOMMONS Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos, [en línea] disponible en: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15>

Las ahuellamiento en una mezcla débil ocurren típicamente durante el verano, cuando el pavimento se encuentra sometido a temperaturas altas, esto podría sugerir que las ahuellamiento son causadas por el sol, pero es más correcto pensar, que es una combinación de la resistencia de los agregados pétreos y el ligante asfáltico empleado.

Las ahuellamiento como se ha dicho antes son la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes y una manera de incrementar la fuerza contra el deslizamiento es no solamente utilizar asfaltos más duros, sino otro que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas. Así cuando se aplique la carga el material podrá deformarse y volver a su posición original. Otra manera de prevenir los desplazamientos es seleccionar agregados que tengan un alto grado de fricción interna, que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula. Cuando se le aplica una carga a una mezcla asfáltica, las partículas de los agregados se cierran unidas de tal manera que fungen como una sola, larga y elástica piedra, y como el asfalto actuará como una banda de goma, volverá a su forma original cuando desaparezca la carga, de esta forma no se acumula una deformación permanente [5].

2.3. MECANISMOS DE FORMACIÓN DE AHUELLAMIENTO.

Cuando las ahuellamiento son causadas por deformaciones en la mezcla asfáltica, el material asfáltico es desplazado lateralmente a lo largo de la trayectoria de los vehículos en el plano de la mezcla, y la rodera se forma por depresión en el área de carga por donde rueda el neumático o los neumáticos, dejando crestas de mezcla en ambos lados a lo largo de la trayectoria de los vehículos. La superficie dentro de la trayectoria del neumático usualmente está lisa y rica en asfalto. El fondo de la rodera tal vez sea lisa y en forma de cuchara. Muchas veces una o

más pequeñas crestas existen de la rodera entre los espacios de las llantas duales. Las ahuellamiento formadas por deformación tienden a cambiar gradualmente a lo largo de la carretera, por lo tanto el pavimento continúa proporcionando el servicio de rodadura a pesar de tener ahuellamiento.

La aparición de ahuellamiento como ya se mencionó es causada por la falta de resistencia ante las cargas generadas en la mezcla asfáltica, por la aplicación de cargas verticales en la superficie. En ocasiones la falta de resistencia puede ser causada por el desequilibrio entre el asfalto y la mezcla. Dicho desequilibrio puede ser causado por daños por humedad en la mezcla o debilitamiento del esqueleto mineral. Las ahuellamiento en los materiales del pavimento se desarrollan gradualmente con el incremento del número de aplicaciones de carga.

La importancia de utilizar materiales para la superficie de los pavimentos, con alta densidad, pueden minimizar el orden de magnitud de las deformaciones permanentes. Se ha mencionado en estudios de investigación que las ahuellamiento mayormente son causadas por flujos de deformación acompañadas de cambios de volumen en los materiales

Hofstra y Klomp (1972) encontraron que la deformación a través de las capas de concreto asfáltico es mayor cerca de la superficie donde se aplican las cargas y gradualmente decrece en las capas de niveles inferiores.

Las ahuellamiento son causadas básicamente por flujo plástico, a mayor profundidad de la mezcla, existe una mayor resistencia al flujo plástico y también a mayor profundidad se reducen los niveles de tensión. La deformación plástica en una capa de pavimento, puede verse incrementada en la medida en que dicha capa es de menor espesor.

Las mezclas asfálticas están compuestas por partículas de agregados de naturaleza elástica, que son los que deben soportar las cargas del tráfico y un ligante de naturaleza viscoelástica, que actúa como pegamento manteniendo unido el esqueleto mineral.

El ligante asfáltico no puede resistir las cargas del tráfico, pues debido a su naturaleza viscosa- elástica puede fluir en función de la carga y su tiempo de aplicación, sin embargo el ligante debe tener la suficiente cohesión para prevenir el desprendimiento de partículas y para resistir los esfuerzos de corte que se generan en los puntos de contacto entre agregados y que superan la fricción entre los mismos. Si el ligante no es capaz de sujetar las partículas en su sitio, estas pueden moverse compactando el esqueleto a una configuración más densa.

Las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, apareciendo el comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando.

-En invierno, cuando las temperaturas son bajas, no existen deformaciones plásticas, porque la mezcla se comporta de manera elástica.

-En otoño y primavera, cuando hay regularmente temperaturas intermedias, la mezcla tiene gran parte de su comportamiento elástico y las deformaciones plásticas son mínimas

En verano, a altas temperaturas, la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones originadas por el tráfico se incrementan. Parte de estas deformaciones se dan en la

Componente viscosa de la mezcla, no siendo recuperables y apareciendo las deformaciones plásticas permanentes o ahuellamiento.

Normalmente la magnitud de las deformaciones permanentes es baja y no supone ningún problema, sin embargo si las deformaciones son muy altas o la mezcla tiene un comportamiento predominantemente viscoso las deformaciones permanentes pueden ser muy significativas [6].

2.3.1. Solicitaciones de cargas a un pavimento. El tránsito tiene una gran influencia en la aplicación de las cargas en un pavimento y su caracterización es bastante compleja debido no solo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para caracterizar las solicitaciones producidas por el tránsito a un pavimento se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, número de ejes que circulan, y número de repeticiones de carga).

Forma geométrica de cada sollicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).

Velocidad de los vehículos y tiempo de sollicitación en un punto.

Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc).

Características de las capas del firme [7].

2.3.2. Naturaleza cíclica de las cargas que actúan en un pavimento.

Normalmente el diseño, análisis y evaluación estructural de las condiciones de los pavimentos se basan en la teoría elástica multicapas; este acercamiento ofrece la posibilidad de una solución racional al problema. El éxito de esta aproximación depende de la precisión y la manera en que se emplean las propiedades de los materiales.

Últimamente se han cambiado los procedimientos de diseño de los pavimentos y se ha pasado de los métodos empíricos a los métodos mecanicistas, basados en el acercamiento más racional durante su diseño (Monosmith, 1962). Las principales razones de este cambio son las condiciones cambiantes en la estructura del pavimento ante la sollicitación móvil de los vehículos cargados, ya que se experimentan dos tipos de esfuerzos: los estáticos por sobrecarga y los dinámicos causados por el movimiento vehicular. Otras consideraciones importantes son el desarrollo de nuevos materiales utilizados en la construcción, nuevas configuraciones de pavimentos y la disponibilidad de programas computacionales. Dentro de los métodos racionales se encuentran los procedimientos de diseño mecanicistas; su funcionamiento es estimado y basado en las propiedades mecánicas fundamentales de las capas de pavimento. (Zaman et al., 1993).

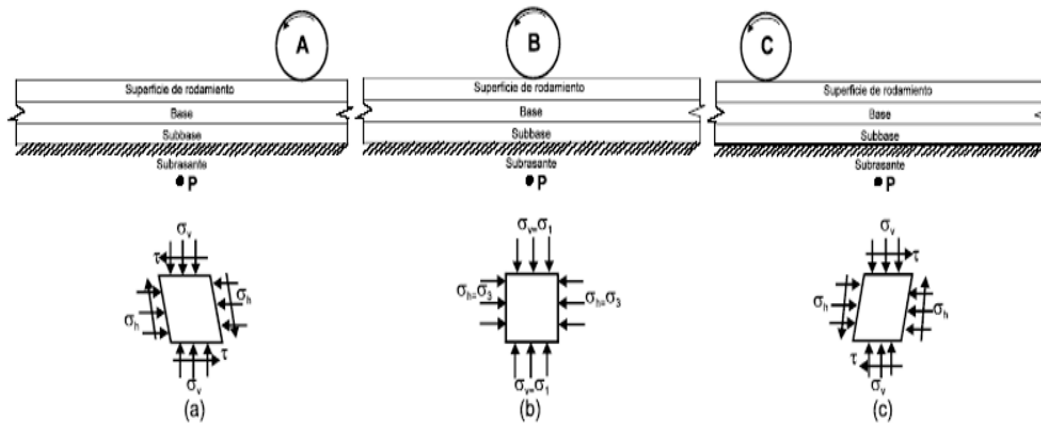
El acercamiento mecanicista en el diseño involucra el análisis teórico y el cálculo de esfuerzos y deformaciones en lugares críticos, como resultado de las aplicaciones de carga originadas por las ruedas cargadas. Los materiales que constituyen las diferentes capas del firme, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico.

El patrón de esfuerzos inducidos a una estructura de pavimento como resultado del tráfico es muy complejo. Un elemento de pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes. Los

esfuerzos son transitorios y cambian con el tiempo conforme la carga avanza. El esfuerzo cortante cambia de sentido conforme la carga pasa, provocando así una rotación de los ejes de esfuerzos principales. (Lekarp et al., 1997).

En la siguiente figura se muestra una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre la cual una carga se mueve a velocidad constante.

Figura 4. Estado de esfuerzos en una sección longitudinal de un pavimento. Referencia, (28).



Fuente: UPCOMMONS Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos, [en línea] disponible en: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15>

El estado de esfuerzos experimentado en el punto P, debido a una carga en el punto A es, que actúan tanto los esfuerzos cortantes como los esfuerzos normales (ver (a)), cuando la carga se mueve al punto B, los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan los esfuerzos normales (ver (b)), en este punto se tiene un estado triaxial de esfuerzos, debido a que sólo se presentan esfuerzos normales, por último, la dirección de los esfuerzos cortantes originados en el punto C, es contraria a la dirección de los esfuerzos originados en el punto A (ver (c)) [8].

2.3.3. Estado de esfuerzos que producen las cargas en función de su magnitud y tipología. Los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre el pavimento produciendo una huella de forma distinta para cada tipo de neumático, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando está en movimiento, además de variar la forma de la huella, aparecen solicitaciones distintas a las verticales, que son las que existen cuando el vehículo está detenido o con movimiento uniforme: aparecen esfuerzos horizontales debido al rozamiento y a los cambios de trayectoria, succiones de agua contenida en la sección estructural y esfuerzos verticales de impacto por efectos del movimiento del vehículo y las irregularidades de la carretera.

Los esfuerzos horizontales de aceleración y frenado o en curvas de pequeño radio, que se pueden producir en zonas localizadas, influyen también en el estado de esfuerzos y deformaciones del pavimento. Cuando en la superficie de un pavimento se originan esfuerzos tangenciales, éstos deben ser resistidos por los 8 – 10 cm. superiores, pero en general no afectan a las capas inferiores. Por ello, la forma práctica con la que se resuelven estos problemas, es proyectando capas de rodadura cuya resistencia al esfuerzo cortante sea suficientemente alta para garantizar que no se produzcan rupturas o deformaciones.

Los efectos dinámicos de los vehículos en movimiento se transforman en impactos y vibraciones en los que intervienen el estado superficial del pavimento y el tipo de suspensión del vehículo. En general, los vehículos en marcha transmiten al neumático una carga de magnitud variable, según el movimiento oscilatorio de la masa suspendida, cuya frecuencia varía como la velocidad y tipo de pavimento. Los máximos pueden ser un 50 % superior a los normales con carga estática. Este aumento de cargas refleja sobre el pavimento en forma de presión de contacto y/o incremento de la superficie de rodada [9].

2.4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DE AHUELLAMIENTO.

Existen una serie de factores que afectan o intervienen en la formación de las ahuellamiento o deformaciones plásticas permanentes de los pavimentos, los cuales se describirán a continuación. Cabe mencionar que se deben tener muy en cuenta estos factores al momento de realizar el proyecto de las mezclas asfálticas y la construcción de los pavimentos flexibles [10].

2.4.1. Granulometría de los agregados pétreos. Existe suficiente evidencia que indica que las granulometrías densas son las deseables en la elaboración de las mezclas asfálticas debido a que mitigan los efectos de las ahuellamiento. 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.

Brown y Pell (1974) concluyeron que las mezclas abiertas o de granulometría discontinua exhiben una mayor susceptibilidad a las deformaciones plásticas y son aún más vulnerables a las ahuellamiento a temperaturas altas, que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas.

Elliot et al. (1991) revisaron en su estudio el efecto de la variación de la granulometría en la generación de ahuellamiento de un pavimento asfáltico. Utilizaron información de pruebas de fluencia para examinar los efectos de la vida relativa en términos del desarrollo de las ahuellamiento. Para llevar a cabo comparaciones se tomó como base una mezcla de trabajo que consiste en material que pasa la malla No. 4 y se retiene en la No. 10 de ASTM. La mezcla está compuesta de 18% de agregado granular, 37% de arena granular y 47% de arena fina. Estos porcentajes se utilizaron también para los demás variaciones de granulometrías (fina, granular, fina-granular, y granular-fina).

Los resultados mostraron que las granulometrías finas y granulares experimentaron profundidades de ahuellamiento de 7% a 10% mayores a las obtenidas para la mezcla de trabajo, mientras que las variaciones de granulometrías fina-granular y granular-fina, experimentaron profundidades de ahuellamiento de 13% a 19% mayores.

Harvey y Monismith (1993) analizaron el efecto de los tipos de agregado sobre la generación de deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Para dicho estudio se utilizaron dos tipos de agregados: granulometría con bajo contenido de finos (2.5%) y granulometría con contenido normal de finos (5.5%). La granulometría con contenido normal de finos tiene un tamaño máximo de agregados de 1". La granulometría con bajo contenido de finos es esencialmente la misma, con la variación del 3% en el contenido de finos. El efecto significativo en la deformación cortante permanente generado por la reducción en el contenido de finos en un 3% resultó sorprendente. Para el contenido bajo de finos se obtuvo un número de repeticiones promedio de 66,476, mientras que para el contenido normal de finos se presentó un valor promedio de 13,886, con lo que existe una diferencia del 131% [11].

2.4.2. Forma, Tamaño y Textura de los agregados pétreos. Para una buena resistencia a las ahuellamiento, la textura de la superficie del agregado juega un papel extremadamente importante. Particularmente en espesores gruesos de capas de asfalto y en climas calientes o en donde se requiera textura superficial rugosa. La forma de la partícula es muy importante.

Uge y Van de Loo (1974) concluyeron que las mezclas asfálticas elaboradas con agregados angulares son menos susceptibles a las deformaciones plásticas que las mezclas asfálticas elaboradas con materiales con caras lisas o de canto rodado procedentes de río, sin triturar. En este estudio el efecto de la trituración en

la textura superficial no fue definido, debido a que es muy difícil separar los efectos de la textura superficial y los de la forma, debido a las caras de fractura .

Uge y Van de Loo (1974), usaron ensayos laboratorio de deformación creep y encontraron que para las mismas curvas granulométricas, las estabilidades mayores de las mezclas se Lograron con agregados pétreos procedentes de trituración y las que menos estabilidad presentaron fueron las que tenían agregados con caras más redondeadas.

Una composición intermedia, la cual solo tiene la fracción de arena triturada, funciona o se comporta aún mejor que la que la formulación en la cual sólo el agregado grande fue triturado. Con esto se indica que el contacto entre partículas es más importante y significativo que el grado de trituración.

Cuando se aumentan las presiones de inflado de los neumáticos, las cargas axiales y las repeticiones de carga, se tiende a emplear mezclas asfálticas con piedras de mayor tamaño. Davis (1988) aportó que los pavimentos asfálticos elaborados con asfaltos suaves, granulometrías con tamaños de piedra de 1.5 pulgadas o mayores, y bajo porcentaje de vacíos, presentan una importante resistencia a las deformaciones plásticas o ahuellamiento.

Monismith et al. (1994) señalaron que un cambio en la forma, tamaño y textura superficial de los agregados, genera a su vez una variación en la resistencia a las ahuellamiento. Así pues, el cambio de una forma redondeada a una angular , incrementa la resistencia de los pavimentos a la generación de ahuellamiento. Lo mismo sucede cuando se presenta un cambio de una textura suave a una rugosa, y cuando se incrementa el tamaño máximo de los agregados.

El esqueleto mineral contribuye a la componente elástica del material; su forma y textura influye en las propiedades elásticas de las mezclas asfálticas, así como la

compactación, ya que un esqueleto mineral bien compactado tiene un mayor comportamiento elástico [12].

2.4.3. Contenido de Polvo Mineral (Filler) en la mezcla. El polvo mineral junto con el ligante forman una masa asfáltica o mastico cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica. Los factores que intervienen para conseguir un buen mastico son diversos:

- a) La relación Polvo Mineral / Asfalto de manera que cuanto más alta es ésta relación, más elevada es la viscosidad de masa y más rígida es la mezcla.
- b) La Finura del Polvo Mineral y su afinidad por el agua. Estos dos factores están relacionados en muchos casos, pero también pueden ser bastante independientes. Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia conservada en ensayo de inmersión –compresión. Con éste ensayo puede detectarse con aceptable precisión el riesgo de degradación de la mezcla por la acción del agua sobre sus componentes minerales más finos.

El riesgo de sensibilidad al agua del mortero de la mezcla puede deberse no solamente a la naturaleza del polvo mineral sino también a ciertas composiciones químicas de algunos asfaltos.

El polvo mineral tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas por su elevada superficie específica, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla. Puede ser el contenido en los áridos procedente de la trituración de los mismos, un producto comercial de naturaleza pulverulenta como el cemento o la ceniza volante

procedente de central térmica o un polvo en general calizo especialmente preparado para este fin.

El Polvo Mineral o Filler forma parte del esqueleto mineral y por lo tanto soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas, además cumple con las siguientes funciones:

Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto. Sustituye parte del asfalto o betún que de otra manera sería necesario para conseguir unos huecos en mezcla suficientemente bajos.

Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.

Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los áridos más gruesos.

Hace la mezcla más trabajable al envolver los áridos gruesos y evitar su segregación.

Las especificaciones suelen dar recomendaciones sobre si el polvo mineral de las mezclas asfálticas puede ser el propio de los agregados si es una calidad adecuada y suficiente a la requerida o debe ser necesariamente, en todo o en parte, de aportación; en cualquier caso,

Sea cual sea, debe tratarse de un material no plástico. En otras unidades de obra diferentes de las mezclas, esta fracción no se suele considerar separadamente del resto del árido fino y, por supuesto, es de la misma naturaleza [13].

2.4.4. 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 ahuellamiento, por eso se recomienda utilizar cementos asfálticos más duros (mayor viscosidad) en los climas cálidos para la construcción de pavimentos. (Monismith et al., 1985).

Un tipo de asfalto puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. En una mezcla que contenga la misma granulometría y el mismo tipo de agregados pétreos, con un mismo contenido de asfalto e igual contenido de vacíos, puede ser resistente o no a las deformaciones plásticas en función de las propiedades del ligante asfáltico que se le añada a la mezcla aunque sea de similar penetración.

El punto de reblandecimiento puede valorar la aportación de los ligantes asfálticos convencionales a la resistencia a las 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 ligante asfáltico contribuye a aumentar el comportamiento elástico de la mezcla, de igual forma, el ligante influye decisivamente en la componente viscosa y su mayor presencia dentro de la mezcla hace que aumente esta componente.

Corté et al. (1994) Realizaron una serie de pruebas en la pista circular del Laboratorio Central des Ponts et Chaussées (LCPC), en Francia, con el fin de determinar el efecto del tipo de asfalto en la formación de ahuellamiento, y para

esto utilizaron tres tipos de asfalto, un convencional 60/70, un asfalto modificado con polímeros SBS y un asfalto multigrado Shell, también utilizaron una capa muy delgada de asfalto sobre un material de módulo alto (asfalto duro de grado 10/20). Los resultados mostraron que los asfaltos modificados con polímeros, multigrados y duros, mejoran la resistencia a las deformaciones plásticas de una capa de pavimento [14].

2.4.5. Contenido de Ligante Asfáltico. El contenido de ligante asfáltico o cemento asfáltico afecta la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir las deformaciones plásticas. El Método Marshall y Hveem son los dos métodos generalmente utilizados para seleccionar de manera preliminar el porcentaje de cemento asfáltico.

Monosmith et al., (1988) recomendaron que la mezcla asfáltica debe tener un contenido asfáltico semejante al contenido de vacíos de aproximadamente 4%. Para excluir los problemas de inestabilidad de las mezclas asfálticas, recomendaron el mínimo absoluto del 3% de vacíos en la mezcla. Este criterio debe necesariamente estar asociado con mezclas de adecuada estabilidad debido al empleo de agregados de alta calidad.

Mahboub y Little (1988) indicaron que grandes contenidos de asfalto producen bajos contenidos de vacíos en las mezclas y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación plástica de la mezcla. Ellos propusieron que la reducción en contenido de vacíos en la mezcla es resultado del incremento en el contenido de asfalto, indicaron que el espacio destinado a los vacíos es rellenado con el ligante asfáltico. Introducir a la mezcla un contenido de asfalto mayor al debido, es equivalente a introducir lubricante entre las partículas de agregado y por otro lado se ajusta en gran medida la red de contenido de vacíos. Este fenómeno causa que la mezcla con alto contenido de asfalto sea también muy susceptible a las ahuellamiento [15].

2.4.6. Contenido de Vacíos en el Agregado Mineral. Cooper, Brown and Pooley (1985) concluyeron que la buena resistencia a la deformación plástica de las mezclas requieren bajo contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA) y que la granulometría deseada para mínimos contenidos de VMA puede ser determinada usando ensayos a agregados secos. Sin embargo se debe tener precaución que contenga la mezcla el mínimo contenido de vacíos teórico en el agregado mineral. Pudiera ser no deseable que no hubiera suficientes vacíos en el agregado mineral, con esto se asegura que la cantidad de ligante asfáltico sea satisfactoria.

Kandhal y Mallick (2001) observaron en su estudio el efecto de los vacíos en el agregado mineral (VAM) sobre el potencial de generación de ahuellamiento en las mezclas asfálticas, Utilizando el analizador de pavimentos asfálticos APA sobre mezclas que contienen distintos tipos de agregados (calizas, granitos, entre otras), y concluyeron que el efecto de este factor está asociado con el espesor de la capa asfáltica. Un incremento en los vacíos y en el espesor de la capa de mezcla asfáltica causan un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas de granito y caliza, mientras que causa un decremento en las deformaciones de mezclas que contienen agregados de gran tamaño [16].

2.4.7. Contenido de Vacíos en la Mezcla Asfáltica. Se ha mencionado que reduciendo en un cierto valor limitado el contenido de vacíos en la mezcla asfáltica, se incrementa la resistencia ante las ahuellamiento. En el campo, el porcentaje de vacíos aceptable en una mezcla (4.5%), es generalmente alcanzado con energía de compactación.

Uge y Van de Loo (1974) encontraron que los desplazamientos relativos de las partículas minerales ocurren cuando la mezcla asfáltica es manejada a altas temperaturas (durante la extensión y compactación de la mezcla) o en moderada temperatura, pero también bajo cargas prolongadas sucede de la misma

naturaleza. Por consiguiente para minimizar la propensión ante las ahuellamiento, ellos recomendaron el uso de mezclas ásperas (que afecta en cierto modo a la trabajabilidad) y rodillos pesados para su compactación. Dicha combinación da como resultado un esqueleto mineral muy estable y un incremento en la fricción interna. Concluyeron que las mezclas ásperas son enormemente resistentes a las deformaciones plásticas después de compactarlas cuando se ha colocado la capa.

Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en el contenido de vacíos en la mezcla, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la deformación plástica. Se realizaron diversas pruebas de compresión axial con fluencia, y aunque las mezclas se comportaban de manera distinta significativamente, su módulo instantáneo era muy similar. Por último, las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportaron mejor que las mezclas con altos contenidos de vacíos.

Linden y Van Der Heide (1987), enfatizaron la importancia de la compactación y concluyeron que el grado de compactación es uno de los principales parámetros de calidad de las mezclas en el lugar, especialmente para diseños críticos (como por ejemplo un bajo contenido de asfalto pensado para aumentar la resistencia a las ahuellamiento). El buen diseño y producción de la mezcla aumenta la durabilidad y las propiedades mecánicas de las mezclas, sin dejar de lado su correcta compactación.

Se tiene que mencionar que la compactación es un factor crítico en la preparación de especímenes para evaluación en el laboratorio. Se debe tratar de simular y reproducir en la medida de lo posible, la compactación que se lleva a cabo en campo en condiciones reales [17].

2.4.8. Cargas por Eje Equivalente de los vehículos y Presión de contacto de los neumáticos con el pavimento. Las cargas de los vehículos se transmiten al pavimento por medio de los neumáticos, el área de contacto es muy importante, la presión de contacto, depende de la presión de inflado de los neumáticos, como se ha dicho, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta, para presiones bajas de la llanta y la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta, para presiones altas de las llantas. Las presiones altas de contacto sobre los pavimentos están directamente relacionadas con los valores de las cargas por eje de los vehículos, lo que conlleva a la formación de ahuellamiento son presiones altas de contacto sobre los pavimentos.

Monosmith et al (1994) realizaron un proyecto con el Strategic Highway Research Program (SHRP) en donde analizaron el efecto del estado de esfuerzos sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones plásticas. Durante una serie de ensayos que tenía como fin observar el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo distintas condiciones, esto es, utilizando dos niveles de esfuerzo, uno alto y otro bajo, al final se determinó que un incremento en la presión de contacto de los neumáticos con el pavimento produce un decremento en la resistencia de las mezclas asfálticas ante las deformaciones plásticas [18].

2.4.9. Número de Repeticiones de carga. Monosmith et al (1994) observaron que un aumento en el número de repeticiones de carga establece una disminución en la resistencia de los pavimentos a la generación de deformaciones plásticas, es decir, cuando se incrementa el número de repeticiones de carga, el pavimento es más susceptible a sufrir este tipo de deterioro.

Cada paso de los neumáticos por un punto sobre el pavimento, se puede considerar como un pulso de carga, si la mezcla asfáltica está a una temperatura relativamente alta, esta condición le permite comportarse de una manera

viscoelastoplástica ante las solicitaciones del tráfico, cada pulso de carga, se irá acumulando permanentemente lo que generará el ahuecamiento [19].

2.4.10. Empleo de modificadores asfálticos. El empleo de modificadores asfálticos, en especial de los polímeros EVA, favorece de manera muy considerable el comportamiento de las mezclas, aumentan la resistencia a las altas temperaturas, lo que conduce a que las mezclas se comporten elásticamente, recuperando todas las deformaciones inducidas por las cargas del tráfico, evitando la formación de ahuecamiento.

Stephens (1982) indicó que las mezclas asfálticas con contenido de caucho tienen una baja resistencia estática a la fluencia comparadas con las mezclas convencionales, y esta diferencia es más pronunciada para altas temperaturas de prueba. Stephens también encontró que las mezclas con caucho fino reciclado tienen mejor resistencia que las mezclas con cauchos granulares. Sin embargo, los resultados de las pruebas de fluencia dinámica indican que las mezclas modificadas tienen una mayor resistencia a la deformación plástica permanente que las mezclas convencionales. Estos estudios mostraron que bajo carga constante las mezclas modificadas se deforman más rápidamente que las mezclas convencionales, mientras que bajo carga repetida las mezclas modificadas se deforman menos que las convencionales.

Hanson et al. (1991) realizaron una evaluación y caracterización de pavimentos flexibles, elaborados con mezclas modificadas con caucho. Utilizando secciones de prueba, hicieron mediciones a lo largo de dos años para ver el comportamiento de las mezclas bajo deformación plástica permanente. En las pruebas de deformación plástica permanente realizadas sobre corazones extraídos en campo, se observó que las mezclas convencionales se deforman más rápido que las mezclas modificadas con el uso de caucho. Sin embargo, las probetas preparadas

en el laboratorio indicaron que no existe una diferencia entre las mezclas convencionales y las modificadas, estadísticamente hablando.

Kroutz y M. Stroup - Gardiner (1992) realizaron estudios con el fin de observar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado. Utilizando pruebas de carga estática y de carga repetida, analizaron la respuesta a la deformación permanente de dichas mezclas. Las conclusiones indicaron que la adición del caucho reciclado genera mezclas que exhiben menos deformación permanente a altas temperaturas, comparadas con mezclas que no recibieron algún tipo de tratamiento.

Stuart (1993) analizó el efecto que presenta la utilización de modificadores sobre las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas. Realizó una comparación entre las propiedades de una mezcla que contenía asfalto AC-20 y otros asfaltos que contenían diferentes tipos de modificadores. La información obtenida sobre viscosidad y penetración de los ligantes indican que los tres modificadores químicos pueden ser más rígidos para temperaturas altas en el pavimento y más suaves para temperaturas más bajas que para el caso de los pavimentos que no incluyen modificadores asfálticos. Las deformaciones permanentes fueron medidas mediante pruebas de fluencia utilizadas para evaluar la susceptibilidad de las mezclas a las ahuellamiento. Los tres modificadores químicos presentaron resultados mostrando un decremento en las deformaciones con un promedio de 25%.

Kamel y Miller (1994) realizaron un estudio para observar el efecto de los modificadores sobre las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Emplearon tres tipos de asfaltos: uno convencional, uno modificado con polímeros, y un asfalto modificado sin el uso de polímeros llamado Premium. En términos de comportamiento, los asfaltos modificados mostraron una mayor resistencia a las ahuellamiento comparado con los valores obtenidos para un asfalto convencional.

Al inicio de las pruebas, el comportamiento de los tres pavimentos fue excelente, empezando a observarse diferencias en el comportamiento con el cambio de ciclos de carga de 10,000 a 20,000 cuando el pavimento convencional empezó a mostrar deterioros en una forma acelerada. A medida que se aplicaron más cargas, el comportamiento de de las mezclas modificadas con asfaltos fue notoriamente superior, y ambas mezclas modificadas tuvieron un comportamiento muy similar durante toda la prueba. Debido a las deformaciones excesivas presentadas en el pavimento convencional, la prueba se terminó después de los 300,000 ciclos de carga. Las pruebas para los otros dos

Tipos de pavimentos (modificados) duraron hasta los 900,000 ciclos de carga. Se comparó el número de ciclos necesarios para causar una deformación permanente de 26 mm., en cada uno de los tres pavimentos y resultó muy evidente que los pavimentos modificados incrementaron significativamente la capacidad de carga de las secciones analizadas.

Monismith et al. (1994) comentaron que los modificadores pueden ser utilizados para incrementar la rigidez de las mezclas asfálticas a temperaturas crítica, reduciendo la susceptibilidad ante la formación de ahuellamiento. Asimismo, investigaron la influencia de los modificadores sobre las características de deformación plástica de mezclas definidas por la prueba de cortante simple con carga repetida.

Rebala y Estakhri (1995) observaron que mediante la incorporación de caucho al asfalto a temperaturas altas (vía húmeda) se producen mezclas asfálticas que inhiben el agrietamiento y pueden inhibir las ahuellamiento. Cuando se agrega el caucho como parte de la granulometría (vía seca) también se producen mezclas resistentes a la formación de ahuellamiento pero pueden tener efectos adversos en el agrietamiento. En el proceso de vía seca, el caucho existe como partículas separadas, dichas partículas en el asfalto normalmente intensificarán la

propensión al agrietamiento pero podrán aumentar la resistencia a las ahuellamiento [20].

2.4.11. Temperatura medioambiental. 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.

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

Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en la temperatura de prueba de las mezclas asfálticas, genera un decremento en la resistencia a la generación de ahuellamiento [21].

2.4.12. 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. Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

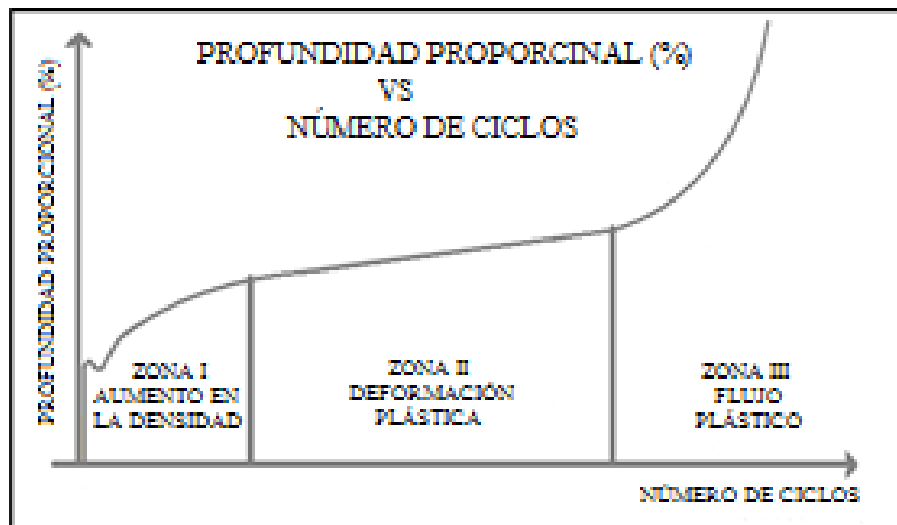
Terrel et al. (1993) realizaron un estudio en la Universidad del Estado de Oregon en E.U.A., donde se demuestra que la propensión a las ahuellamiento de las mezclas asfálticas se incrementa significativamente si está sujeta a saturación sostenida de agua. Los resultados fueron obtenidos a partir de ensayos de cortante simple en mezclas antes y después de someterlas a la acción del agua.

El incremento en las ahuellamiento que podrían ocurrir in situ pueden ser estimadas utilizando el procedimiento presentado por el programa SHRP [22].

2.5. CURVA TÍPICA DE AHUELLAMIENTO

La figura 1 muestra la evolución de la deformación permanente con el número de ciclos o cargas aplicadas, se identifican tres zonas en la figura.

Figura 5. Etapas en un ensayo de ahuellamiento.



En la primera zona, se producen altas deformaciones, resultado de la reducción del volumen, lo que produce un aumento en la densidad del material.

En la segunda zona el material presenta menos deformaciones plásticas con cada ciclo y la tasa de deformación es casi constante.

En la tercera zona se presenta un incremento exagerado en la deformación con cada ciclo de carga.

3. METODOLOGIA Y RECOPIACION DE LA INFORMACIÓN

A continuación se describen los procesos por los cuales se obtuvieron los datos necesarios para la realización de esta investigación.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para la realización de este estudio los agregados gruesos y finos que se emplearon fueron obtenidos de la planta de producción, suministro, aplicación de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y productos asfálticos, ASFALTART S.A.S; que se encuentra ubicada en el Caucho, Girón, Santander.

3.1.1. Agregado pétreo Para determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, se realiza por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. Principalmente se determina la granulometría de los materiales propuestos que serán utilizados como agregados. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones que son aplicables y para suministrar los datos necesarios para la producción de diferentes agregados y mezclas que contengan agregados [23].

Para realizar el análisis granulométrico se consultó el documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS, INV E-213-07 [1], el cual nos permitió determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos del material.

Figura 6. Tamices empleados para la granulometría.



Figura 7. Agregados retenidos en cada tamiz en el análisis granulométrico.



El procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas bulk, bulk saturada y superficialmente seca y aparente, así como la absorción, después que los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm (tamiz No.4) han estado sumergidos en agua durante 15 horas [24], se realizó mediante el documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-223-07.

Figura 8. Agregado grueso.



El documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-222-07 describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas Bulk y aparente así como la absorción de agregados finos.

Figura 9. Agregado fino en el proceso para el cálculo de la gravedad específica.



Por medio del documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-128-07, se determina la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral (filler) por medio de un picnómetro.

Figura 10. Llenante mineral en el proceso para el cálculo de la gravedad específica.



3.1.2. El ligante asfáltico Para la realización de este estudio el ligante asfáltico (60-70) que se empleo fue obtenido de la planta de producción, suministro, aplicación de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y productos asfálticos, ASFALTART S.A.S; que se encuentra ubicada en el Caucho, Girón, Santander.

Los valores de densidad son usados para realizar conversiones de unidades de volumen a masa y para realizar correcciones en las medidas de volumen cuando la temperatura de medida de ensayo difiere de la temperatura de ejecución del mismo [25].

A través del documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-707-07 , se determinó de la Densidad y Gravedad Especifica del material asfáltico (60-70), mediante el empleo de un picnómetro.

Figura 11. Asfalto 60-70 sometido al proceso para el cálculo de su gravedad específica.



3.1.3. Caracterización de la mezcla La mezcla asfáltica utilizada para este ensayo fue obtenida de la realización de los procesos descritos anteriormente con los materiales suministrados por ASFALTART S.A.S; que se encuentra ubicada en el Caucho, Girón, Santander.

3.1.3.1. Gravedad específica máxima teórica (Gmm). La gravedad específica teórica máxima y la densidad de mezclas asfálticas para pavimentos son propiedades fundamentales, cuyos valores están afectados por la composición de la mezcla en términos del tipo y cantidad de agregados y de los materiales asfálticos. Estos valores son usados para calcular el porcentaje de vacíos con aire en una mezcla de pavimento asfáltico en caliente compactada.

Ellos son esenciales para calcular la cantidad de asfalto absorbido por los poros internos del agregado en una mezcla asfáltica en caliente y dan valores importantes para el proceso de compactación de mezclas asfálticas para pavimentos [26].

De acuerdo con el documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-735-07 , se determinó de la gravedad específica máxima teórica y densidad de la mezcla asfáltica.

Figura 12. Mezcla asfáltica sin compactar para el cálculo de Gmm.



Figura 13. Mezcla asfáltica sin compactar en el proceso para el cálculo de Gmm.



Teniendo en cuenta la siguiente ecuación y los valores obtenidos se realiza el respectivo cálculo de la gravedad específica máxima teórica (Gmm).

$$Gmm = \frac{A}{A + D - E} \quad (1)$$

Tabla 1. Valores obtenidos mediante el proceso descrito en la norma INVIAS INV E-735-07.

| VARIABLES PARA EL CALCULO DE Gmm | | |
|--|---|--------|
| | | (gr) |
| Masa en el aire del material | A | 2338,1 |
| Masa del recipiente lleno con agua | D | 8213,5 |
| Masa del recipiente lleno con agua y muestra | E | 9595,8 |

3.1.3.2. Gravedad específica Bulk y densidad de mezcla asfáltica compactada

Para la fabricación de las probetas se tomó el procedimiento descrito en el documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-748-07.

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, preparadas como se describe en esta norma, Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente las gravedades específicas de los materiales empleados y de las probetas compactadas. Los materiales propuestos deben cumplir con las especificaciones de granulometría y demás, fijadas para el proyecto [27].

Figura 14. Herramientas utilizadas para la compactación de las probetas.



Este método es útil para calcular el porcentaje de vacíos de aire como se indica en el documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E – 736 o INV E – 799 y la masa unitaria de mezclas asfálticas compactadas, de tal manera que cumpliendo con el ARTÍCULO 450 – 13, Tabla 450-10 . Se compararon los valores de porcentajes de vacíos de las mezclas fabricadas cumpliendo con los porcentajes requeridos en dicha norma.

Figura 15. Mezcla asfáltica compactada.



Por medio del documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-733-07, se determinó la gravedad específica Bulk del espécimen con mezcla asfáltica compactada teniendo en cuenta la siguiente ecuación y los datos obtenidos.

$$Grvedad\ específica\ Bulk\ (Gmb) = \frac{A}{B - C} \quad (2)$$

Tabla 2. Valores obtenidos para el cálculo de la gravedad específica Bulk de la mezcla compactada.

| DATOS | | (gr) |
|---------------------------------|---|--------|
| Masa del espécimen seco al aire | A | 1297,7 |
| Masa del espécimen con (SSS) | B | 1302,5 |
| Masa del espécimen en el agua | C | 749,9 |

3.1.3.3. Calculo de los porcentajes de vacíos. Por medio del documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-799-07 [1], determinamos en especímenes de MAC las siguientes características volumétricas:

El porcentaje de volumen de vacíos de aire (Va). (También se utiliza el término “contenido de vacíos de aire”), el porcentaje de volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

Los valores de estas propiedades son calculadas a partir de medidas de las gravedades específicas del ligante asfáltico, de los agregados gruesos y finos, de la MAC compactada y sin compactar y de las proporciones de la fórmula de trabajo de MAC [28].

Calculo del porcentaje de vacíos de aire, V_a , en la MAC compactada.

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100 \quad (3)$$

Calculo del porcentaje de volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM)

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \quad (4)$$

Calculo de porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA).

$$VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM} * 100 \quad (5)$$

Tabla 3. Valores obtenidos para el cálculo de porcentajes de vacíos.

| DATOS PARA EL CALCULO DE V_a , VAM, VFA | | | |
|---|-----|--------|---|
| Porcentaje de agregado grueso | P1 | 57,000 | % |
| Porcentaje de agregado fino | P2 | 38,000 | % |
| Porcentaje de agregado llenante mineral | P3 | 5,000 | % |
| Gravedad específica Bulk Agregado grueso | G1 | 2,656 | |
| Gravedad específica Bulk Agregado fino | G2 | 2,557 | |
| Gravedad específica Bulk llenante mineral | G3 | 2,841 | |
| Gravedad específica Asfalto | Gb | 1,005 | |
| Porcentaje de ligante asfáltico | Pb | 4,800 | % |
| Porcentaje de agregado respecto al peso total muestra | Ps | 95,200 | % |
| Gravedad específica Bulk de MAC | Gmb | 2,348 | |

3.2. FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA LA UTILIZACIÓN EN LA MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO

Teniendo en cuenta el procedimiento para compactar mezcla asfáltica en la forma de un paralelepípedo cumpliendo con las dimensiones requeridas para ser utilizado en la máquina de ahuellamiento (Wheel tracker EN12697-22 Large device) se realizaron siguiendo lo descrito en el proyecto de grado “DEFINICIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS CON CARACTERÍSTICAS HOMOGÉNEAS PARA LA UTILIZACIÓN EN LA MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO”.

Figura 16. Molde para la compactación de la mezcla.



Figura 17. Equipo compactador, consta de un taladro demoledor de 31 Kg y una punta arreglada para este procedimiento.



Seguidamente se preparó la máquina de ahuellamiento para realizar la prueba, que nos permite llegar a obtener una serie de resultados para la culminación de la investigación.

Figura 18. Máquina de ahuellamiento.



4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se encuentran los resultados del procesamiento de la información de laboratorio. Para el procesamiento de la información recolectada durante la investigación se realizó usando herramientas de Microsoft Excel.

4.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

La granulometría del agregado obtenido está comprendida dentro de las franjas fijadas en la Tabla 450 – 6 del documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS ARTICULO 450–13, para una mezcla semidensa (MSC-19).

Tabla 4. Franjas establecidas para deferentes mezclas, para este proyecto se utilizó la mezcla semidensa MSC-19.

| TIPO DE MEZCLA | | TAMIZ (mm / U.S. Standard) | | | | | | | | | |
|--|----------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|---------|
| | | 37.5 | 25.0 | 19.0 | 12.5 | 9.5 | 4.75 | 2.00 | 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 | | | | | | | | | |
| DENSE | 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 |
| SEMIDENSA | 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 | 2-6 |
| | MGC - 25 | | 100 | 75-95 | 55-60 | 40-60 | 28-46 | 17-32 | 7 - 17 | 4-11 | 2-6 |
| ALTO MÓDULO | MAM - 25 | | 100 | 80-95 | 65-80 | 55-70 | 40-55 | 24-38 | 10 - 20 | 8 - 14 | 6-9 |
| TOLERANCIA EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±) | | | 4% | | | | | 3% | | | 2% |

Fuente: INVIAS Norma INVIAS 2012, artículo 450-13, tabla 450-6. [en línea] disponible en:

<http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/1/139-documento-tecnicos/1988->

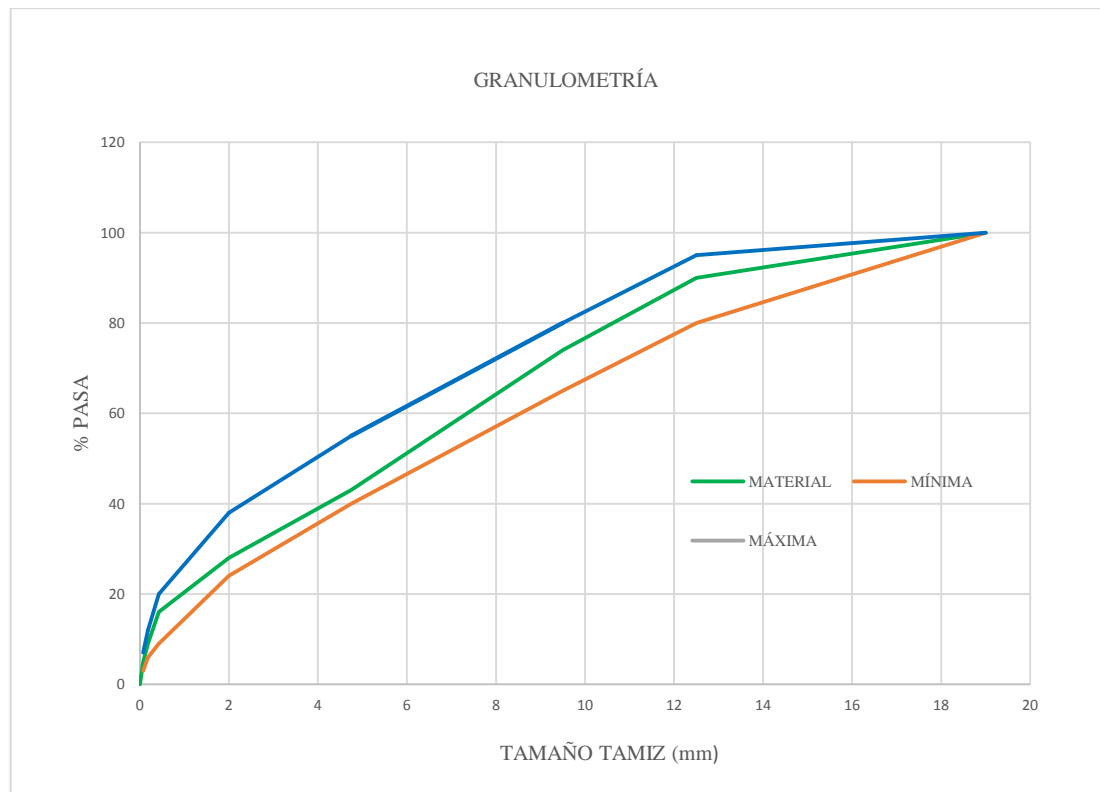
[especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras](http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/1/139-documento-tecnicos/1988-)

Los valores obtenidos para la granulometría del material utilizado se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Granulometría adoptada para el desarrollo del proyecto.

| TAMIZ | % RETENIDO | %PASA |
|-----------|------------|--------|
| 3/4" | 0,00 | 100,00 |
| 1/2" | 10,00 | 90,00 |
| 3/8" | 16,00 | 74,00 |
| #4 | 31,00 | 43,00 |
| #10 | 15,00 | 28,00 |
| #40 | 12,00 | 16,00 |
| #80 | 7,00 | 9,00 |
| #200 | 4,00 | 5,00 |
| PASA #200 | 5,00 | 0,00 |

Figura 19. Granulometría ideal.



4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los resultados obtenidos de dichos procesos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Valores obtenidos mediante la caracterización de los materiales.

| CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES | | | | |
|--|-----------------|---------------|------------------|-----------------|
| | Agregado grueso | Agregado fino | Llenante mineral | Asfalto (60-70) |
| Gs Bulk | 2,656 | 2,557 | 2,841 | 1,005 |
| Gs Bulk SSS | 2,670 | 2,614 | - | - |
| Gs Aparente | 2,693 | 2,711 | - | - |
| Absorción (%) | 0,510 | 2,229 | - | - |
| Densidad | - | - | - | 1,002 |

4.3. RELACION DE VACIOS (VAM, VA, VFA).

Conociendo la gravedad específica Bulk de la mezcla compactada, la gravedad específica máxima teórica de la mezcla sin compactar y las características de los materiales que la conforman procedemos a realizar el cálculo de porcentajes de vacíos necesarios para cumplir con los rangos fijados en dicha norma.

Tabla 7. Valores obtenidos para el cálculo de los vacíos.

| Resultados | |
|--|-------|
| Gravedad específica máxima teórica (Gmm) | 2,446 |
| Gravedad específica Bulk (Gs Bulk) | 2,348 |

Tabla 8. Relación de vacíos obtenidas.

| Relación de vacíos | |
|---|--------|
| Vacíos en los agregados minerales (VAM) | 14,86% |
| Vacíos con aire (Va) | 4,001% |
| Vacíos llenos de asfalto (VFA) | 73,08% |

Podemos verificar el cumplimiento de la especificación en los porcentajes de vacíos obtenidos en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentajes de vacíos permitidos en la norma INVIAS 2012.

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

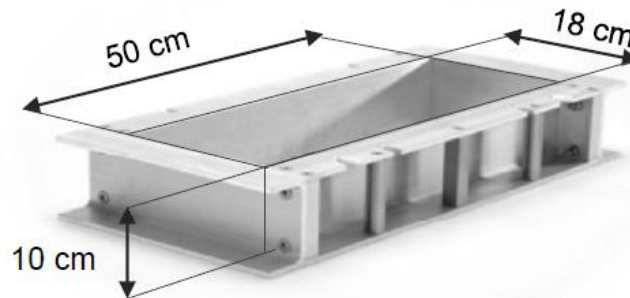
Fuente: INVIAS norma INVIAS 2012, artículo 450-13, tabla 450-10. [en línea] disponible en: <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

Teniendo en cuenta la norma INVIAS podemos observar que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral es menor que el 15 % establecido, pero teniendo en cuenta especificaciones internacionales el porcentaje de vacíos en el agregado mineral aceptado es mayor o igual al 13 %, por lo tanto el valor que obtuvimos es considerado aceptable.

4.4. ENSAYO DE PROBETAS EN LA MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO.

A partir de los resultados obtenidos y cumpliendo con las especificaciones, se procede a la elaboración de las probetas para a utilización de la máquina de ahuellamiento y así conocer la susceptibilidad de la mezcla asfáltica semidensa (MSC-19).

Figura 20. Molde de la probeta para la máquina de ahuellamiento.



Fuente: proyecto de grado “Definición del proceso de fabricación de probetas con características homogéneas para la utilización en la máquina de ahuellamiento” [en línea] disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/157598.pdf>

Tabla 10. Características de la probeta para ser ensayada en la máquina de ahuellamiento.

| Características de la probeta | |
|--|-------|
| Gs Bulk de MAC (g/cm ³) | 2,348 |
| Volumen de la probeta (cm ³) | 9000 |
| Masa de la probeta (g) | 21132 |

Conociendo las características de la probeta, se procedió a la realización de la misma teniendo en cuenta el procedimiento adecuado y haciendo unos ajustes en el método de compactación y mejoras que facilitarían el diseño, se prepararon cuatro probetas las cuales utilizamos en la máquina de ahuellamiento para el respectivo ensayo.

Figura 21. Máquina de ahuellamiento en funcionamiento (wheel tracker en 12697-22 large device).



Luego del ensayo de cada probeta en la máquina de ahuellamiento se obtuvieron resultados que permiten concluir acerca de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica semidensa (MSC-19) al ahuellamiento.

Figura 22. Probeta antes y después de ser ensayada en la máquina de ahuellamiento.

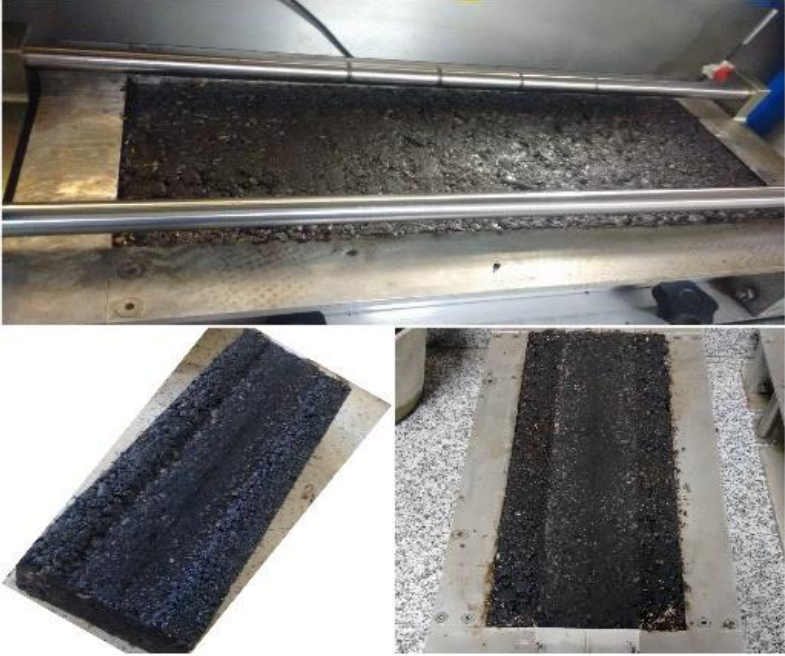
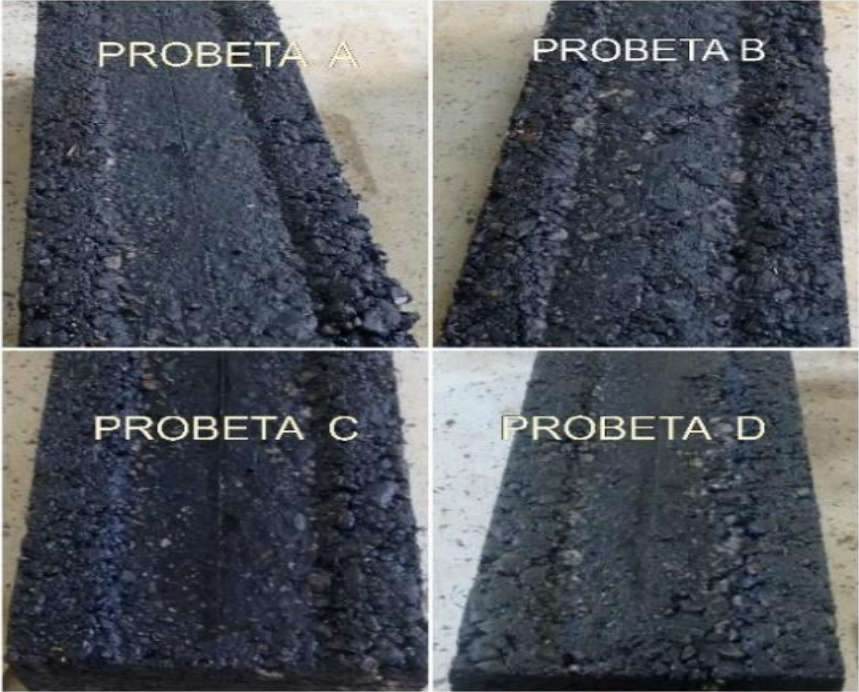


Figura 23. Probetas luego del paso por la máquina de ahuellamiento.



Se realizaron ensayos en la máquina de ahuellamiento sobre 4 probetas, para los cuales se muestran las siguientes características principales.

Tabla 11. Características de los ensayos que se realizaron para cada una de las probetas.

| Características del ensayo | |
|-----------------------------------|-------|
| Número de probetas ensayadas | 4 |
| Número de ciclos primera ensayo | 10000 |
| Número de ciclos segunda ensayo | 30000 |
| Acondicionamiento de temperatura | 4 h |
| Temperatura de los ensayos | 60 °C |
| Carga ejercida sobre las probetas | 5 KN |

Se realizaron ensayos de 10000 ciclos para 2 probetas, y de 30000 ciclos para otras 2. Luego de terminado los ensayos podemos observar en la siguiente grafica la profundidad total que obtuvieron cada una de las probetas teniendo en cuenta que ninguna de ellas alcanzó la profundidad máxima de deformación y que ninguna llegó a la zona tres de la curva profundidad proporcional (%) vs número de ciclos (Figura 1 del presente documento), zona correspondiente al flujo plástico.

4.5. DEFORMACIONES MÁXIMAS EN CADA UNA DE LAS PROBETAS

Figura 24. Resultados obtenidos en la máquina de ahuellamiento para las probetas A, B, C y D, sometidas a 10000 ciclos.

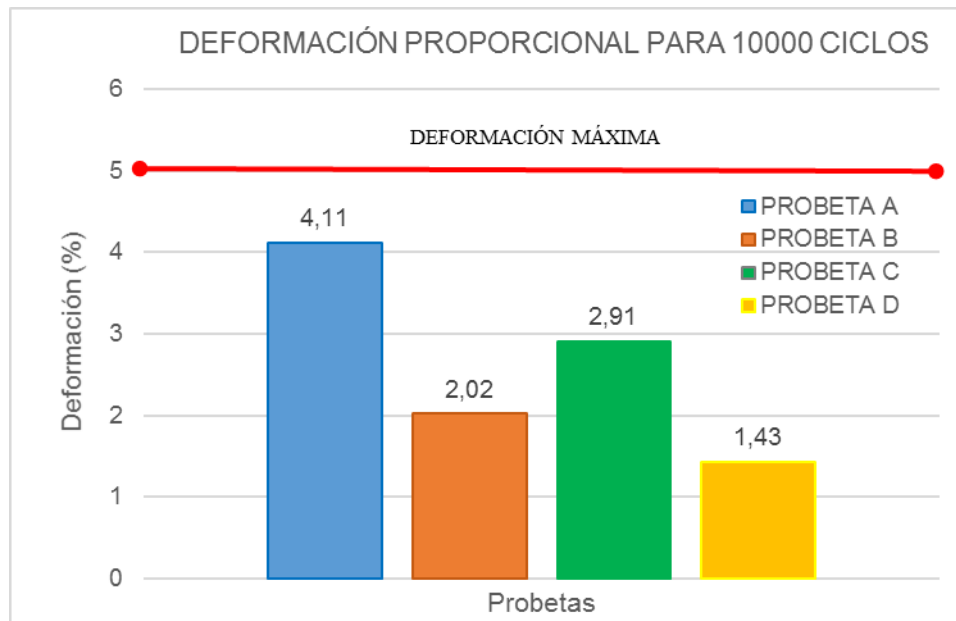
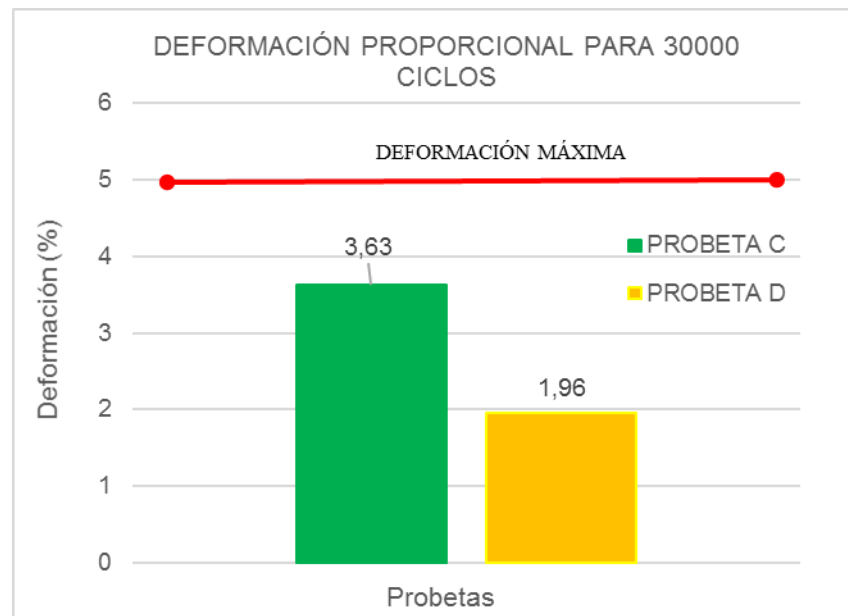


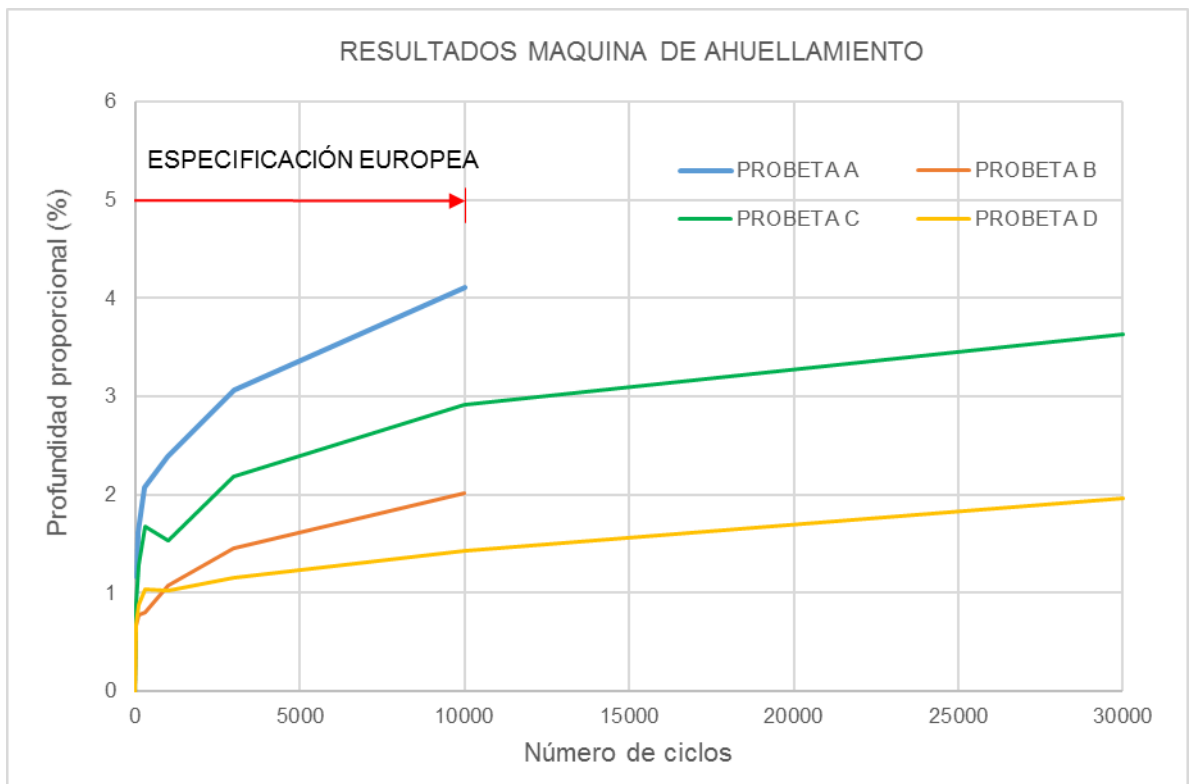
Figura 25. Resultados obtenidos en la máquina de ahuellamiento para las probetas C y D, sometidas a 30000 ciclos.



La deformación en cada una de las probetas se puede observar progresivamente a medida que aumentan el número de ciclos en cada uno de los ensayos, variando desde 0% hasta obtener una deformación única, sin alcanzar la deformación máxima permitida de 5%.

4.6. CURVAS DE AHUELLAMIENTO PARA CADA UNA DE LAS PROBETAS

Figura 26. Resultados obtenidos en la máquina de ahuellamiento para las probetas en estudio.



4.7. PENDIENTES EN LAS CURVAS DE AHUELLAMIENTO

Tabla 12. Pendientes porcentuales de la curva Profundidad proporcional (%) vs Número de ciclos.

| Intervalo de ciclos | Pendientes porcentuales de la curva Profundidad proporcional (%) vs Número de ciclos | | | |
|---------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | Probeta A | Probeta B | Probeta C | Probeta D |
| 1-30 | 4,000 | 2,345 | 3,069 | 2,379 |
| 30-100 | 0,657 | 0,143 | 0,571 | 0,271 |
| 100-300 | 0,230 | 0,010 | 0,195 | 0,080 |
| 300-1000 | 0,044 | 0,040 | -0,020 | -0,003 |
| 1000-3000 | 0,034 | 0,019 | 0,033 | 0,007 |
| 3000-10000 | 0,015 | 0,008 | 0,010 | 0,004 |
| 10000-30000 | ----- | ----- | 0,004 | 0,003 |

4.8. SECCIÓN TRANSVERSAL EN CADA UNA DE LAS PROBETAS DESPUES DEL ENSAYO

También se observó la sección transversal de cada una de las probetas después de ser ensayadas y su composición interna debido a la compactación a la que fueron sometidas; por otra parte, se puede observar la distribución de los agregados.

Figura 27. Sección transversal de la probeta A luego de ser ensayada.

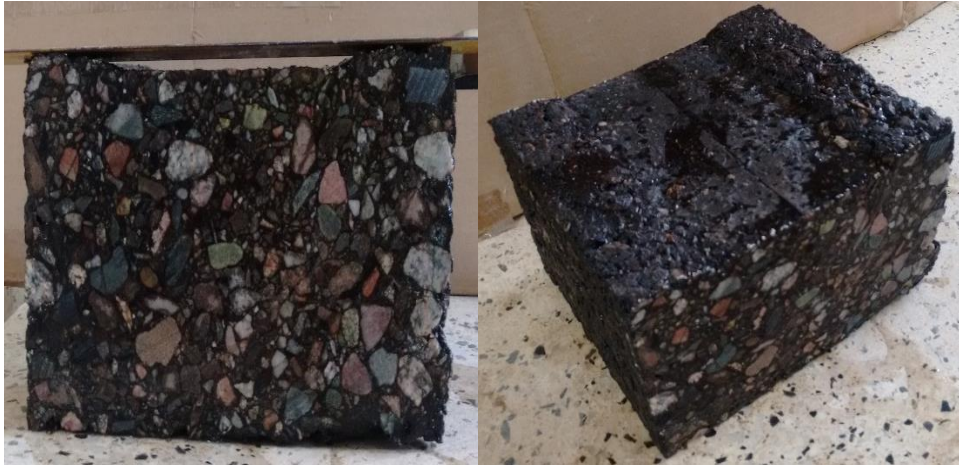


Figura 28. Sección transversal de la probeta B luego de ser ensayada.



Figura 29. Sección transversal de la probeta C luego de ser ensayada.



Figura 30. Sección transversal de la probeta D luego de ser ensayada.



En cada ensayo realizado se tomaron datos de deformación en cinco puntos específicos de las probetas, para cada una de ellas se analiza la deformación que sufrieron en el punto medio teniendo en cuenta el número de ciclos y la deformación causada.

4.9. DEFORMACIÓN EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL MEDIA DE LAS PROBETAS

Figura 31. Deformación causada en la probeta A, referenciados en el punto medio de la toma de deformaciones según los ciclos.

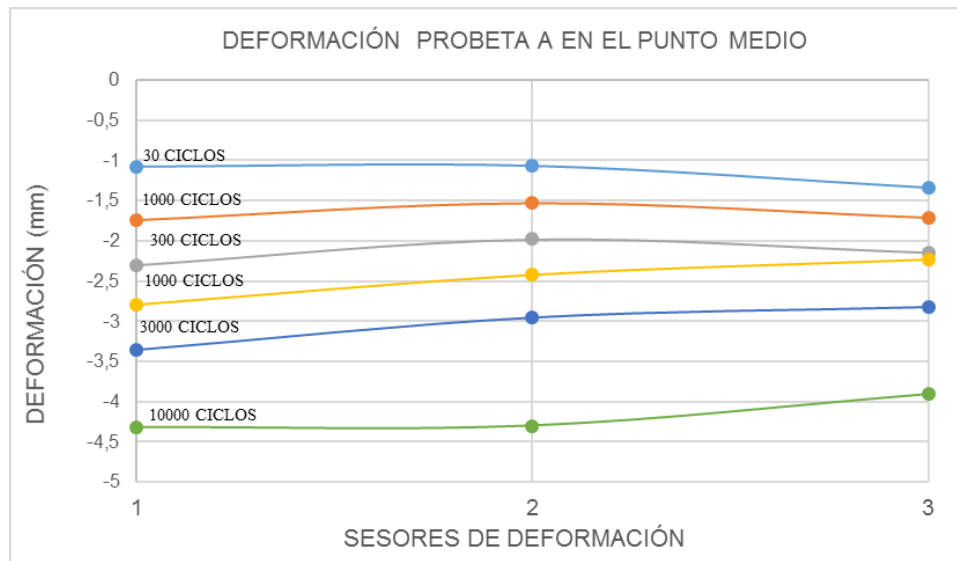


Figura 32. Deformación causada en la probeta B, referenciados en el punto medio de la toma de deformaciones según los ciclos.

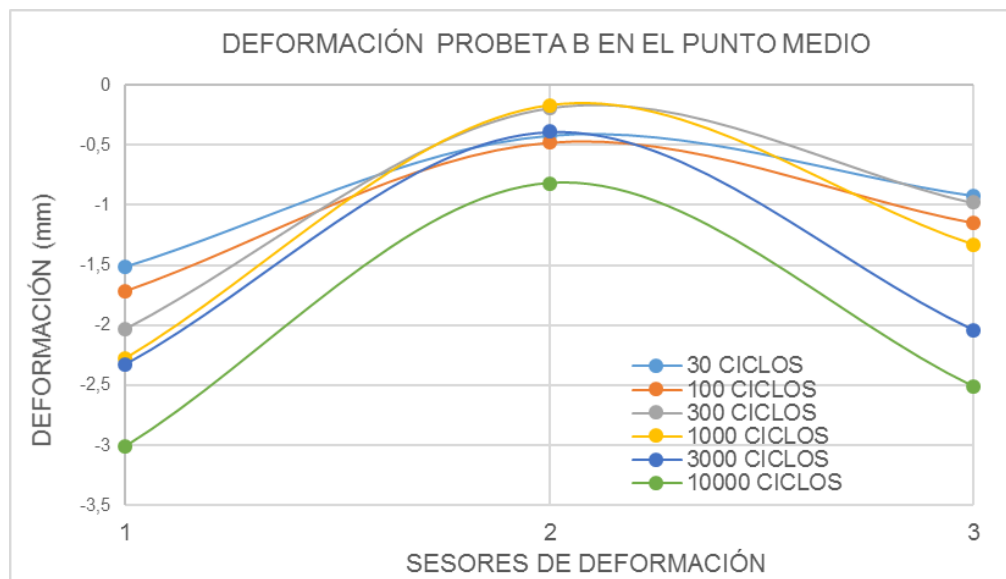


Figura 33. Deformación causada en la probeta C, referenciada en el punto medio de la toma de deformaciones según los ciclos.

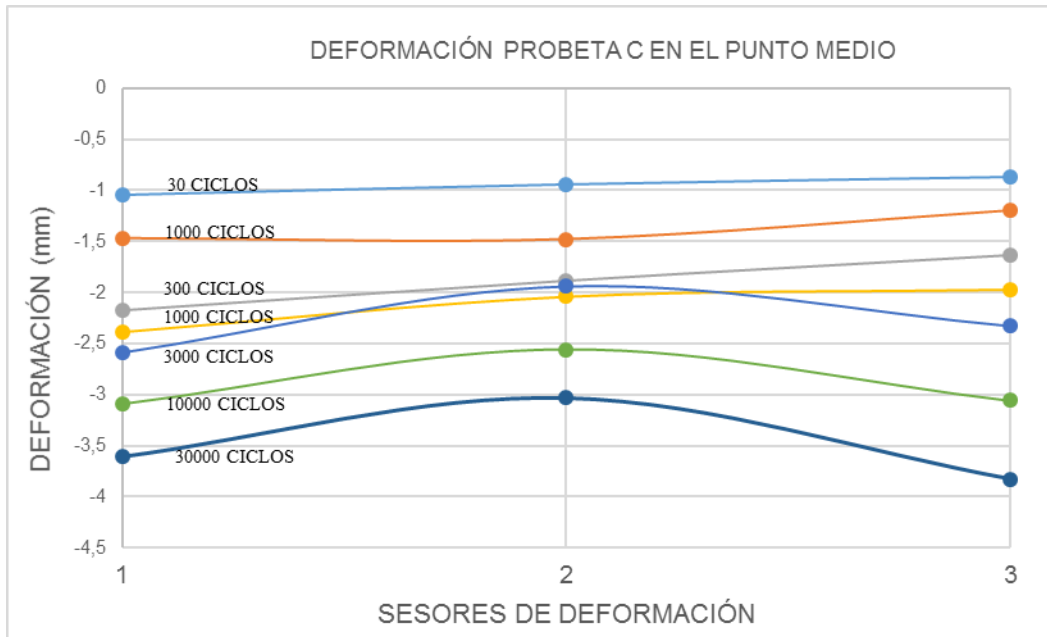
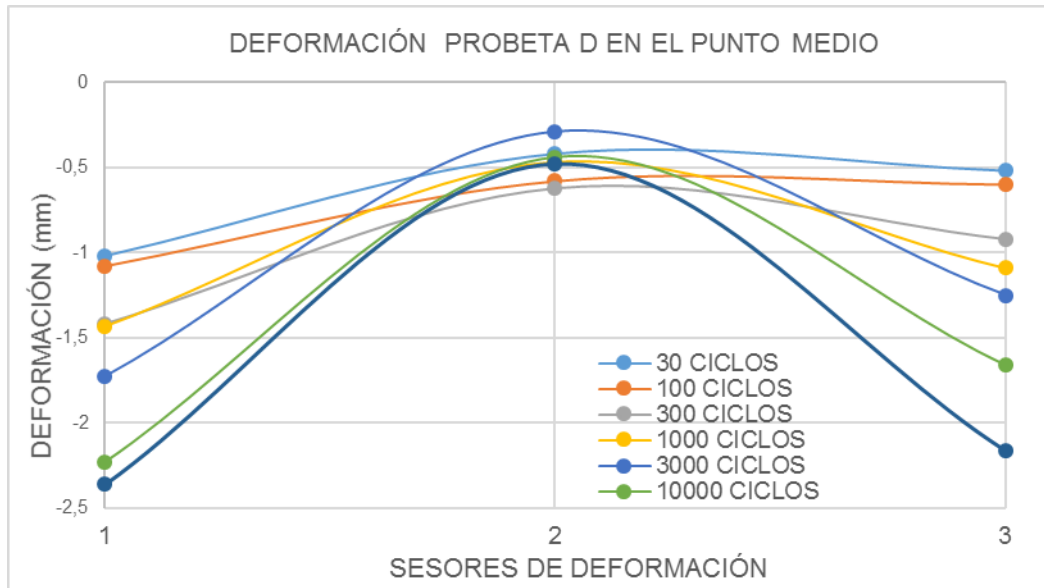


Figura 34. Deformación causada en la probeta D, referenciada en el punto medio de la toma de deformaciones según los ciclos.



4.10. GRÁFICAS EN LA ESCALA LOGARÍTMICA DE LA PROFUNDIDAD PROPORCIONAL (%) CONTRA EL NÚMERO DE CICLOS EN CADA PROBETA

Teniendo en cuenta el comportamiento de las deformaciones según los ciclos a los que fueron sometidos, se observó que la función que mejor describe esta curva es una función logarítmica.

A continuación se observa la gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra el número de ciclos.

Figura 35. Gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra número de ciclos para la probeta A.

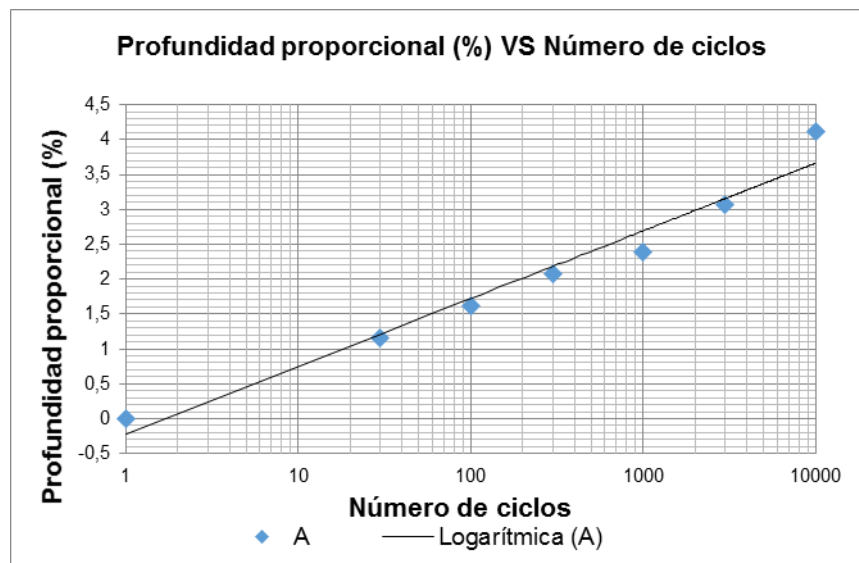


Figura 36. Gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra número de ciclos para la probeta B.

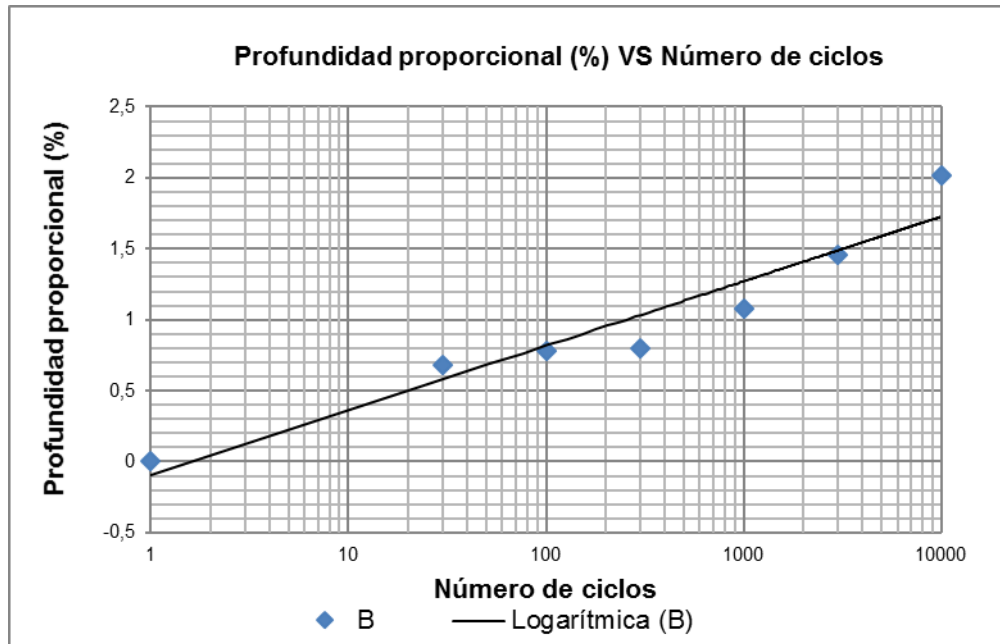


Figura 37. Gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra número de ciclos para la probeta C.

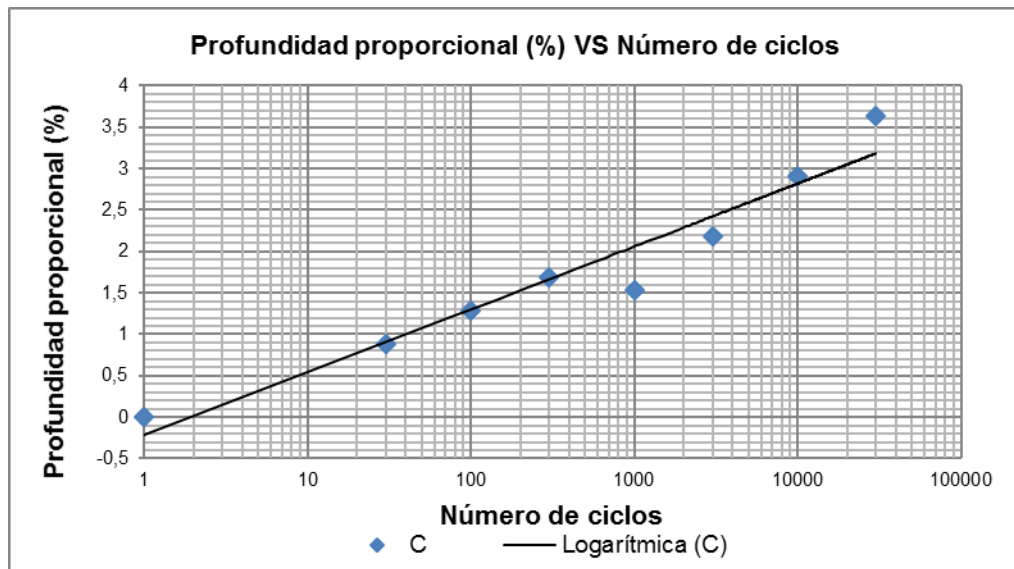
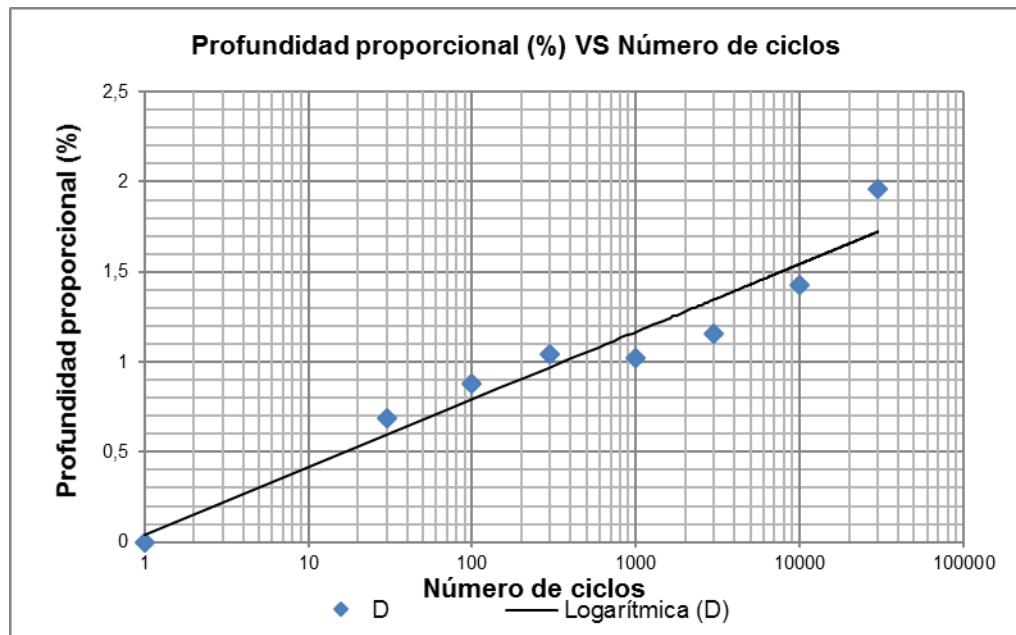


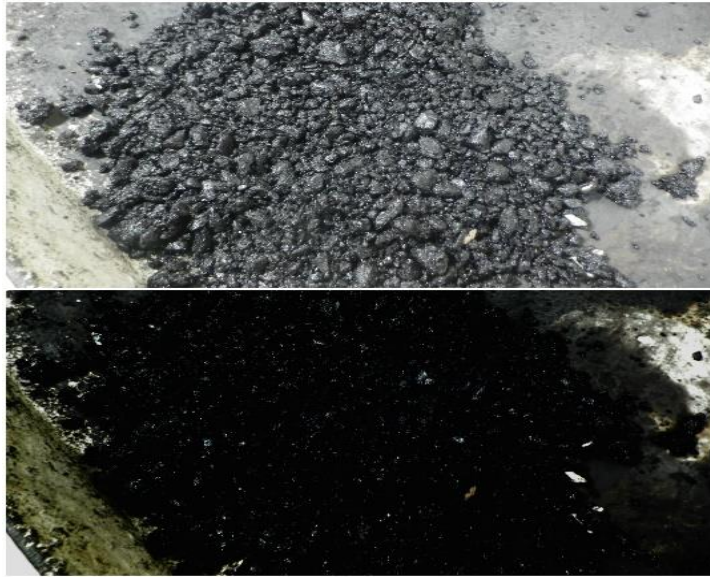
Figura 38. Gráfica logarítmica de la profundidad proporcional (%) contra número de ciclos para la probeta D.



Luego de terminados todos los procesos se requiere hacer un análisis final de daños causados en los agregados debido a la compactación. Se desintegró la mezcla asfáltica para observar más detalladamente los agregados y poder obtener un criterio para saber la calidad del material y los daños causados.

4.11. ANÁLISIS DE DAÑOS CAUSADOS DEBIDO A LA COMPACTACIÓN EN EL AGREGADO

Figura 39. Comparación mezcla asfáltica desintegrada, original y con modificación en el contraste.



Se pudo observar que la mezcla asfáltica no sufrió daño en el agregado como fractura de las partículas debido a la compactación a la que fue sometida. Las partículas blancas que se pueden ver en la imagen son partículas que se sometieron al corte transversal de la probeta.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los ensayos realizados en la máquina de ahuellamiento y los resultados obtenidos se puede definir una serie de conclusiones acerca de la susceptibilidad de las mezclas asfálticas ante el ahuellamiento.

Los resultados presentados en las cuatro probetas realizadas con una Mezcla asfáltica semidensa en caliente (MSC-19) se ajustan a las exigencias internacionales, como la Europea, ya que la deformación es menor que el 5% (0,5 [cm]) de la altura de la probeta (10 [cm]). Cabe resaltar que el pavimento en un contexto climático frío se comporta como un sólido y en un clima cálido, como el medio Colombiano, tiende a comportarse como un líquido y es más susceptible a deformaciones, razón que debe tener mayores deformaciones con respecto a países que presentan estaciones y tienen grandes temporadas de bajas temperaturas.

Las curvas obtenidas en la realización del ensayo de ahuellamiento en la máquina de rodillo grande para la mezcla MSC-19 muestran presencia en la zona I y II de la curva de ahuellamiento, pero las gráficas no muestran la presencia de flujo plástico en la mezcla.

Se obtuvieron resultados de ahuellamiento para mezclas MSC y se pueden utilizar para realizar comparaciones con otro tipo de mezclas asfálticas fabricadas en caliente.

7. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta procedimientos establecidos y la manera en que se realizaron las probetas para esta investigación surgen las siguientes recomendaciones, buscando mejorar los procesos de elaboración y así tener más exactitud en los resultados:

En el mezclado de los materiales preferiblemente hacerlo mediante una mezcladora que agilice el proceso.

Para la compactación de las probetas paralelepípedas se tuvo en cuenta el método establecido en el proyecto de grado “DEFINICIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS CON CARACTERÍSTICAS HOMOGÉNEAS PARA LA UTILIZACIÓN EN LA MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO” [5] el cual nos dice el modo de compactación, en donde se suponía una malla imaginaria de 2 por 5 rectángulos en la superficie de compactación en la cual se colocaría el martillo compactador sobre cada recuadro en tres recorridos durante 10 segundos efectivos. Teniendo en cuenta esto en la realización de las probetas se hizo un cambio en el proceso por facilidad de manejo del equipo compactador e ir compactando la mezcla gradualmente, procurando que el desnivel entre los cuadrantes fuera reducido. El cambio fue para la primera cara de la probeta un recorrido e intervalos de tiempo de 8 segundos y para la segunda cara dos recorridos e intervalos de tiempo de 5 segundos.

Se recomienda usar una lámina metálica de base para evitar que en el proceso de compactación la probeta pierda la forma paralelepípeda.

Realizar el ajuste al sistema para que la colocación y extracción de pernos sea más fácil, permitiendo agilizar el proceso.

Reducir la altura del collar de apoyo inferior para mejorar la compactación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras> [Citado el: 27 de Septiembre de 2016].

[2]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.66.

[3]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.66.

[4]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.67.

[5]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.67.

- [6]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.68.
- [7]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.71.
- [8]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.71.
- [9]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.75.
- [10]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.77.
- [11]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.77.

- [12]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.75.
- [13]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.80.
- [14]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.81.
- [15]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.81.
- [16]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.82.
- [17]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.84.

[18]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.85.

[19]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.85.

[20]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.85.

[21]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.87.

[22]. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15> [Citado el: 25 de Enero de 2017], p.87.

[23] INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Norma INV E-213.p.1. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y->

normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras [Citado el: 27 de Septiembre de 2016].

[24] INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Norma INV E-223.p.1. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras> [Citado el: 27 de Septiembre de 2016].

[25] INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Norma INV E-707.p.2. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras> [Citado el: 27 de Septiembre de 2016].

[26] INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Norma INV E-735.p.2. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras> [Citado el: 27 de Septiembre de 2016].

[27] INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Norma INV E-748.p.1. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras> [Citado el: 27 de Septiembre de 2016].

[28] INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Norma INV E-799.p.1. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras> [Citado el: 27 de Septiembre de 2016].

BIBLIOGRAFÍA

INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. [en línea] [Citado el: 27 de Septiembre de 2016]. disponible en: <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. [en línea] [Citado el: 25 de Enero de 2017]. disponible en: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-15.pdf?sequence=15>

VERGEL SOLANO, Jhoan Andrés y TAVERA GARCÍA, Jairo Darío. Definición del proceso de fabricación de probetas con características homogéneas para la utilización en la máquina de ahuellamiento [Tesis de Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2015. [en línea] disponible en: [Citado el: 29 de Septiembre de 2016]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/157598.pdf>

ANEXOS

(Ver documentos adjuntos)