

DEFINICIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS CON  
CARACTERÍSTICAS HOMOGÉNEAS PARA LA UTILIZACIÓN EN LA MÁQUINA DE  
AHUELLAMIENTO.

JHOAN ANDRÉS VERGEL SOLANO  
JAIRO DARÍO TAVERA GARCÍA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2015

DEFINICIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS CON  
CARACTERÍSTICAS HOMOGÉNEAS PARA LA UTILIZACIÓN EN LA MÁQUINA DE  
AHUELLAMIENTO.

JHOAN ANDRES VERGEL SOLANO

Código: 2101862

JAIRO DARÍO TAVERA GARCÍA

Código: 2101864

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil

Director

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

Ph.D. Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA

2015

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	12
1. MARCO TEÓRICO.....	13
1.1. COMPACTADORA DE RODILLO CON NEUMÁTICOS GRANDE.....	13
1.2. COMPACTADORA GIRATORIA.....	14
1.3. COMPACTADOR DE RODILLO.....	14
1.4. COMPACTACIÓN PROBETAS MARSHALL.....	15
2. DISEÑO DE UN NUEVO PROCESO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO DE PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO.....	16
2.1. SELECCIÓN DE TIPO DE COMPACTACIÓN.....	16
2.2. DISEÑO DE LA SECUENCIA DE COMPACTACIÓN.....	18
2.3. APROXIMACIONES INICIALES DEL PROCESO.....	18
2.3.1. Sustitutivo de Cementante Asfáltico.....	19
2.3.2. Estructura Granular del Material de Prueba.....	19
2.3.3. Diseño Preliminar del Procedimiento de Compactación.....	21
2.4. DISEÑO DEFINITIVO DEL MÉTODO DE COMPACTACIÓN DE PROBETAS..	22
2.4.1. Temperatura de Confección de Probetas Asfálticas.....	22
2.4.2. Contenido de Ligante.....	22
2.4.3. Definición de la Densidad Objetivo.....	23
2.4.4. Fabricación de Probetas Paralelepípedas.....	23
3. VERIFICACIÓN DE HOMOGENEIDAD DE LAS PROBETAS.....	25
3.1. TOMA DE DATOS.....	25
3.2. EVALUACIÓN POR PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	27
3.3. EVALUACIÓN POR MÉTODO NO PARAMÉTRICO.....	30
4. CONCLUSIONES.....	32
5. RECOMENDACIONES.....	33
BIBLIOGRAFIA.....	34
ANEXOS.....	36

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Compactadora de Rodillo.....	13
Figura 2. Compactador Giratorio.....	14
Figura 3. Compactador Cooper.....	15
Figura 4. Dispositivo para moldear probetas Marshall.....	15
Figura 5. Rodillo Compactador vibratorio de doble tambor .....	17
Figura 6. Molde de probetas para la máquina de ahuellamiento.....	18
Figura 7. Granulometría probetas con asfalto.....	20
Figura 8. Corte y enumeración de las muestras de la probeta .....	26
Figura 9. Densidad vs # Muestra para las mezclas.....	27
Figura 10. Región de Aceptación y Rechazo .....	29
Figura 11. Molde para la compactación de probetas Paralelepípedas .....	38
Figura 12. Accesorio de perfilado final de probetas Paralelepípedas.....	38
Figura 13. Collar de apoyo.....	39
Figura 14. Lámina de neopreno .....	39
Figura 15. Ensamblado final .....	39
Figura 16. Vista plano A de ensamblado final.....	40

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de caracterización aceite y asfalto con porcentaje de error. ....	19
Tabla 2. Granulometría probetas con asfalto. ....	20
Tabla 3. Densidad Probetas Paralelepípedos con sustitutivo. ....	21
Tabla 4. Porcentaje de contenido de Asfalto. ....	22
Tabla 5. Densidad Probetas Marshall con asfalto. ....	23
Tabla 6. Densidad Probetas Paralelepípedas con Asfalto. ....	24
Tabla 7. Hipótesis nula para cada serie. ....	28
Tabla 8. Hipótesis alternativa para cada serie. ....	28
Tabla 9. Estadística de Prueba. ....	29
Tabla 10. Aceptación o Rechazo de $H_0$ . ....	30
Tabla 11. Número de Corridas de la serie de datos. ....	31
Tabla 12. Límites de Numero de corrida en función de $N_a$ . ....	31
Tabla 13. Densidad en los cortes de la mezcla densa. ....	42
Tabla 14. Densidad en los cortes de la mezcla semidensa. ....	43
Tabla 15. Densidad en los cortes de la mezcla drenante. ....	44

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Propuesta de Norma de Fabricación de Probetas para Ensayo de Ahuellamiento.....	36
Anexo B. Variación de Densidad en Probetas Paralelepípedas .....	42

## RESUMEN

**TÍTULO:** DEFINICIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS CON CARACTERÍSTICAS HOMOGÉNEAS PARA LA UTILIZACIÓN EN LA MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO\*.

**AUTORES:** JHOAN ANDRES VERGEL SOLANO, JAIRO DARÍO TAVERA GARCÍA\*\*.

**PALABRAS CLAVE:** Máquina de Ahuellamiento, compactación para tráfico pesado, mezcla asfáltica.

### DESCRIPCIÓN:

Este proyecto se destinó a estudiar el correcto 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 aplicaron metodologías que simulan los efectos de amasado por vibración y paso de llanta neumática. El presente trabajo se basó en los planteamientos realizados en el documento normativo del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-748-07 que trata sobre la obtención de probetas de mezcla asfáltica con forma de cilindro normalmente utilizadas en el aparato Marshall, se tomaron tres granulometrías diferentes cumpliendo con los requerimientos expresados en el ARTICULO 450 – 07 y el ARTICULO 453 – 07 del Instituto Nacional de Vías INVIAS, cumpliendo con las exigencias de compactación para tráfico pesado, la necesidad de realizar múltiples pruebas requirió el uso de un sustituyente del asfalto que se comportase de manera similar al mismo a temperatura ambiente, para ello se optó por un aceite que cumple con valores de densidad y viscosidad similares a los del asfalto cuando se encuentra a temperatura de compactación, la energía de compactación fue suministrada por una máquina rompe-pavimentos también conocida como demoledor, a ésta se le colocó una punta con adaptación en su extremo para que compactase y no rompiera el material. Se verificó la homogeneidad de las probetas, realizando análisis estadístico a la densidad relativa de las muestras tomadas para cada una de las probetas, utilizando prueba de hipótesis y un método no paramétrico.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón Ingeniero Civil, PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEFINITION OF SPECIMENS MANUFACTURING PROCESS WITH HOMOGENEOUS CHARACTERISTICS FOR USE IN WHEEL TRACKER MACHINE\*.

**AUTHORS:** JHOAN ANDRES VERGEL SOLANO, JAIRO DARÍO TAVERA GARCÍA\*\*.

**KEYWORDS:** Wheel Tracker Machine, Heavy Traffic Compaction, Asphalt Concrete.

### DESCRIPTION:

This project was destined to study the right procedure of compacting asphalt mixture into a form of a parallelepiped keeping the required dimensions in order to be used in the Wheel tracker EN12697-22 Large device. There were two methodologies applied that simulate the mixing by vibration and the mixing by wheel tracking. This work is based on the approaching made on the normative document of the Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-748-07 that specifies the procedure to obtain a test tube of asphalt mixtures shaped like a cylinder, usually used in the Marshal test, three different gradations were used according to the requirements expressed in the ARTICULO 450 – 07 and the ARTICULO 453 – 07 of the Instituto Nacional de Vías INVIAS, fulfilling the exigencies of asphalt mixture compaction for heavy duty, the need to realize multiple test required the use of a substitute of the asphalt with its performance, in order to achieve that an oil with similar density and viscosity values to the asphalt ones at compaction temperature, the compaction energy was supplied by a pavement breaker machine also known as demolition hammer, a steel bit was modified so it would compact instead of break the material. The homogeneity of the test tube was verified, performing statistic analysis of the relative density of the samples for each test tube, using hypothesis testing and nonparametric method.

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Faculty of Physicist – Mechanics, School of Civil Engineering, Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón Ingeniero Civil, PhD.

## INTRODUCCION

La máquina de ahuellamiento ahuellamiento (Wheel tracker EN12697-22 Large device) requiere probetas de ensayo con forma de paralelepípedo.

El objetivo de este trabajo es diseñar un proceso de laboratorio para producir probetas con densidad homogénea y estructura similar a los materiales compactados en campo. Las probetas deben tener dimensiones de 50 cm de largo, 18 cm de ancho y una altura de 10 cm.

## 1. MARCO TEÓRICO.

En la concepción de metodologías para la fabricación de los cuerpos de prueba en laboratorio, se han diseñado máquinas de compactación con elementos vibratorios y rodillos neumáticos. Figuras 1 y 2.

### 1.1. COMPACTADORA DE RODILLO CON NEUMÁTICOS GRANDE.

El instrumento mostrado en la Figura 1 es el que más se asemeja a la compactación real, tanto por resultados como por el desarrollo del mismo. Se usan una o dos ruedas que aplican presión siguiendo trayectorias sobre la probeta como se especifica la norma EN 12697-33 así como también puede seguir secuencias personalizadas. La base del molde que contiene el material se eleva a medida que se compacta para mantenerlo nivelado con la parte superior del molde. Pueden fabricarse placas compactadas con alturas entre 50 mm y 150 mm de espesor. Puede preparar dos tipos de probeta, una primera de 50 cm por 18 cm utilizada en el equipo de ensayo en pista grande objetivo de éste trabajo y otras de 60 cm por 40 cm que se suelen cortar y utilizar en la caracterización de fatiga y rigidez.

Figura 1. Compactadora de Rodillo.



MASTRAD.

## 1.2. COMPACTADORA GIRATORIA.

Figura 2. Compactador Giratorio.



### COOPER.

En el compactador Giratorio (Figura 2) la muestra es sometida a una presión especificada dentro de un molde que puede tener 10 cm o 15 cm de diámetro interno, su eje longitudinal gira en un ángulo fijo con respecto a la vertical, mientras la muestra es compactada. El equipo puede medir la altura de la probeta, obteniendo así la densidad de la mezcla y el volumen total de huecos en cada giro. La fabricación de la probeta se ha estandarizado bajo la norma AASHTO T312 (TP4).

## 1.3. COMPACTADOR DE RODILLO.

También conocido como CRT-RC (Figura 3), se emplea para obtener placas de mezcla asfáltica homogénea y con dimensiones lo suficientemente grandes como para ser utilizadas en la máquina de ahuellamiento, bien puede ser utilizada para llegar hasta la densidad requerida o hasta haber proporcionado un esfuerzo compresivo o energía de compactación a la probeta. La energía de compactación se transmite al material por medio

de una placa metálica de geometría similar a una sección de rodillo de compactación y pueden fabricarse placas con espesor de 5 cm o 10 cm, dimensiones de 50 cm por 18 cm o 30.5 cm por 30.5 cm según sea el requerimiento.

Figura 3. Compactador Cooper.



COOPER.

#### 1.4. COMPACTACIÓN PROBETAS MARSHALL.

El procedimiento de compactación se encuentra contenido en el numeral 4 de la norma del Instituto Nacional de Vías INVIAS INV E-748-07, el volumen de la probeta es de 316,7 cm<sup>3</sup> (Figura 4) y se compacta por impactos en la cara superior e inferior.

Figura 4. Dispositivo para moldear probetas Marshall.



TESTMARK

## 2. DISEÑO DE UN NUEVO PROCESO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO DE PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO.

### 2.1. SELECCIÓN DE TIPO DE COMPACTACIÓN.

En las obras de construcción se presentan diversas alternativas para compactar mezclas asfálticas, entre ellas se encuentra la compactación por impactos, por vibración, aplicación de presión estática y amasado durante la compactación en campo se pueden ver involucrados uno o más de los anteriores elementos.

Un claro y frecuente ejemplo es el rodillo compactador vibratorio de doble tambor (Figura 5), que goza de vibración, una alta presión estática al considerar que se desplaza lentamente sobre el material y amasado puesto que se aplican y retiran cargas sobre el mismo.

En laboratorio los procesos de amasado sobre placas son complicados puesto que requieren una aplicación de una fuerza con un mismo vector ortogonal al plano de la placa de mezcla asfáltica y que no descuide un tramo del trayecto a recorrer sino que considere todos y cada uno de los puntos en el mismo.

Entre tanto una secuencia de impactos tiene el problema de tender a fracturar las partículas de agregado cambiando de esta manera la granulometría de la mezcla asfáltica además que al momento de dividir una partícula se crearán superficies que no fueron recubiertas por el cemento asfáltico afectando luego su comportamiento estructural.

Figura 5. Rodillo Compactador vibratorio de doble tambor



## SINOMACHI

La presión estática requiere gran cantidad de carga para alcanzar densidades similares a las de campo y estas producen también la rotura de partículas incurriendo en los mismos inconvenientes mencionados anteriormente, las dimensiones de la placa y las de los equipos actuales a servicio de la escuela dificultan una compactación con niveles de seguridad ideales.

Es posible conseguir vibración con equipos eléctricos o accionados por presión neumática que además son relativamente fáciles de operar por una o dos personas, además de que estos no se limitan solamente a una tarea, abriendo una multitud de posibles usos alternos al planteado originalmente.

Se seleccionó un proceso de impactos y vibración en el que para impedir la fractura de los granos, se atenúa la presión sobre los mismos con una lámina de neopreno, de este modo se logra entregar una energía de compactación controlada y suficiente para lograr resultados similares a los que se pueden encontrar en campo.

## 2.2. DISEÑO DE LA SECUENCIA DE COMPACTACIÓN.

Con la información recopilada en la norma del Instituto Nacional de Vías INVIAS se puede hacer una aproximación teórica de cuál sería el correcto procedimiento para compactar las probetas para usar en la máquina de ahuellamiento, teniendo en cuenta que las probetas deben tener unas dimensiones de 50cm x 18 cm x 10 cm para un volumen total de 9000 cm<sup>3</sup> y que la energía entregada por golpe del martillo demoledor es de 68J, se necesitarán entonces 685 golpes por probeta, el tratamiento que reciben los agregados, el cemento asfáltico y el molde (Figura 6) será entonces el mismo al descrito en la preparación de probetas Marshall.

Figura 6. Molde de probetas para la máquina de ahuellamiento.



## 2.3. APROXIMACIONES INICIALES DEL PROCESO.

Las mezclas asfálticas durante el proceso de compactación son un material compuesto por diferentes fracciones de agregado mineral recubierto por un aceite que es el asfalto a alta temperatura. Con el propósito de revisar y hacer ajustes al proceso de fabricación de las probetas se seleccionó para las pruebas iniciales un material compuesto de agregados y aceite que no se rigidizará al enfriarse y permitiera la repetida confección de elementos paralelepípedos.

### 2.3.1. Sustitutivo de Cementante Asfáltico.

Como material sustitutivo del ligante asfáltico, en la fase preliminar, se seleccionó un aceite con propiedades de viscosidad y densidad similares a las del asfalto a temperatura de 145°C. La caracterización se realizó en el laboratorio de mecánica de fluidos, ubicado en la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Los resultados obtenidos de la caracterización, tanto como el porcentaje de variación de la densidad y la viscosidad entre el asfalto y el aceite caracterizado se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de caracterización aceite y asfalto con porcentaje de error.

Aceite		
Densidad	0,86980328	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Viscosidad Cinemática	310,182272	[cSt]

Asfalto 60/70 a 145°		
Densidad	0,96	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Viscosidad Cinemática	280	[cSt]

Diferencia Porcentual		
Densidad	9,3954918	[%]
Viscosidad Cinemática	10,7793829	[%]

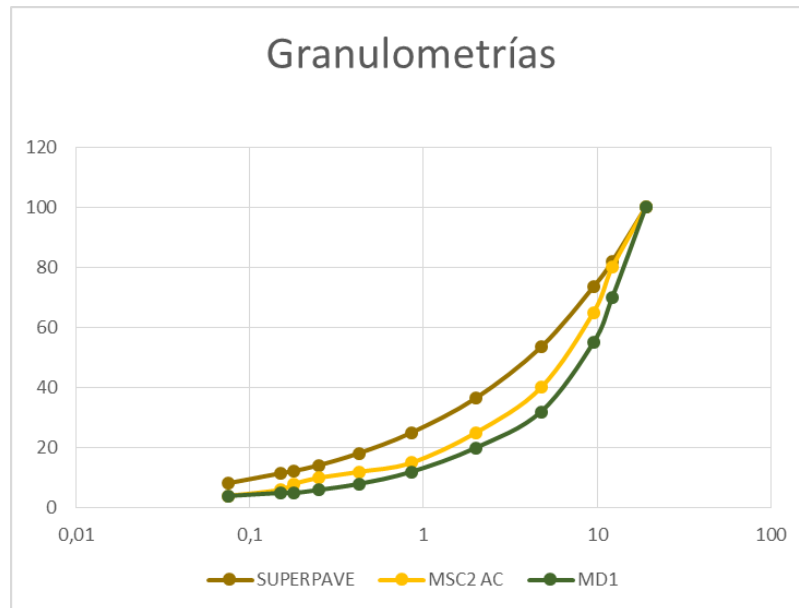
### 2.3.2. Estructura Granular del Material de Prueba.

Se seleccionaron tres diferentes tipos de granulometría. La primera con distribución continua de tamaño de granos que permite una estructura densa del material, la segunda con una granulometría discontinua o estructura semidensa y la tercera con una granulometría uniforme que produce materiales con elevado contenido de poros y que se identifica como mezcla drenante. (Ver Tabla 2 y Figura 7).

Tabla 2. Granulometría probetas con asfalto.

Tamiz	% Pasa		
	Densa	Semidensa	Drenante
3/4"	100	100	100
1/2"	82	80	70
3/8"	73,5	65	55
No. 4	53,5	40	32
No. 10	36,5	25	20
No. 20	25	15	12
No. 40	18,2	12	8
No. 60	14,2	10	6
No. 80	12,3	8	5
No. 100	11,5	6	5
No. 200	8,2	4	4

Figura 7. Granulometría probetas con asfalto.



### 2.3.3. Diseño Preliminar del Procedimiento de Compactación.

Para seleccionar la densidad que deberían alcanzar las probetas paralelepípedas, se realizaron pruebas de compactación tipo Marshall siguiendo las especificaciones de la norma INV E-748-07, reemplazando el asfalto líquido por el aceite caracterizado.

Se realizaron múltiples pruebas variando tiempo y recorridos del martillo compactador. Como resultado de esta etapa, se estableció un procedimiento preliminar que permite obtener resultados de densidad en las probetas paralelepípedas similares a los obtenidos en el procedimiento Marshall. Tabla 3.

Tabla 3. Densidad Probetas Paralelepípedos con sustitutivo.

	Propiedades		Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]
SP	Altura [cm]	10	2,36
	Vol. [cm <sup>3</sup> ]	9000	
	Masa [gr]	21209,27	
MSC2	Altura [cm]	10,9	2,23
	Vol. [cm <sup>3</sup> ]	9810	
	Masa [gr]	21881,8	
MD1	Altura [cm]	11,5	2,09
	Vol. [cm <sup>3</sup> ]	10350	
	Masa [gr]	21668,9	

Se diseñó un proceso en tres etapas de compactación:

- 1) Reacomodación: Con una varilla metálica delgada se reacomodan los agregados para facilitar su posterior compactación
- 2) Compactación local: Se realiza colocando una lámina de caucho entre el martillo demolidor y el material, teniendo cuidado de no deformar la mezcla adyacente.

- 3) Perfilado final: Después de haber reducido el volumen con el anterior paso se coloca una lámina de madera gruesa y de alto modulo que facilite una repartición de esfuerzos uniformes en la compactación final y una superficie de acabado uniforme.

## 2.4. DISEÑO DEFINITIVO DEL MÉTODO DE COMPACTACIÓN DE PROBETAS.

El diseño definitivo del método de compactación se realizó en base a los estudios y pruebas realizadas en el diseño preliminar, teniendo como guía la norma INV E-748-07 para su composición, de esta forma se logró redactar una propuesta de norma de fabricación de probetas para ensayos de deformación bajo carga rodante el cual se puede observar en el ANEXO A.

### 2.4.1. Temperatura de Confección de Probetas Asfálticas.

Las temperaturas de mezclado y compactación corresponden a las establecidas en normas de fabricación de probetas de mezclas asfálticas en laboratorio (INV E-748-07). Para mezclado, la temperatura será la necesaria para producir una viscosidad de  $170 \pm 20$  centiStokes ( $1 \text{ centiStoke} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ ), mientras que la temperatura de compactación será la necesaria para lograr una viscosidad de  $280 \pm 30$  centiStokes.

En la confección de las probetas se utilizó asfalto de penetración 60/70 y se seleccionó una temperatura de mezclado de  $150^\circ\text{C}$  y de  $135^\circ\text{C}$  para compactar la probeta.

### 2.4.2. Contenido de Ligante.

La cantidad de asfalto empleadas en cada tipo de mezcla se especifica en la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje de contenido de Asfalto

% Asfalto		
Densa	Semidensa	Drenante
6%	4%	4%

#### 2.4.3. Definición de la Densidad Objetivo.

Para definir la densidad que se quiso alcanzar en las probetas Marshall con cemento asfáltico, se realizaron tres pruebas con las probetas tipo Marshall siguiendo las especificaciones de la norma INV E-748-07. La densidad de las probetas Marshall con mezcla asfáltica se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Densidad Probetas Marshall con asfalto.

	Propiedades		Densidad
Densa	Altura [cm]	6,6	2,32
	Vol. [cm3]	541,421638	
	Masa [gr]	1255,6	
Semidensa	Altura [cm]	6,8	2,20
	Vol. [cm3]	557,828354	
	Masa [gr]	1230	
Drenante	Altura [cm]	7	2,12
	Vol. [cm3]	574,235071	
	Masa [gr]	1215,4	

#### 2.4.4. Fabricación de Probetas Paralelepípedas.

Con el procedimiento definido en la compactación de probetas paralelepípedas con el lubricante sustitutivo, se compactaron probetas. Las densidades de las probetas obtenidas se muestran a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Densidad Probetas Paralelepípedas con Asfalto.

	Propiedades		Densidad
Densa	Altura [cm]	10,5	2,36
	Vol. [cm <sup>3</sup> ]	9450	
	Masa [gr]	22260	
Semidensa	Altura [cm]	10,2	2,12
	Vol. [cm <sup>3</sup> ]	9180	
	Masa [gr]	19430,78	
Drenante	Altura [cm]	11,6	2,09
	Vol. [cm <sup>3</sup> ]	10440	
	Masa [gr]	21840	

Los resultados muestran un procedimiento que permite obtener muestras con densidades similares a la proyectada en las mezclas densas y drenantes. La densidad de la mezcla semidensa no alcanzó el valor especificado.

Las razones por las cuales en la mezcla semidensa se observa diferencia significativa de la densidad entre probeta Marshall (Tabla 5) y probeta paralelepipedada (Tabla 6), se debe a que inicialmente no se contaba con el accesorio para densificación final (ANEXO A), el cual se propuso según los estudios y requerimientos, para así obtener una probeta con su superficie totalmente plana a una altura de 10 cm o 5 cm.

### 3. VERIFICACIÓN DE HOMOGENEIDAD DE LAS PROBETAS.

La homogeneidad se refiere a un sistema que está formado por una sola fase, compuesta por uno o más componentes, que tiene igual valor de las propiedades intensivas, es decir, que al subdividir el sistema en pequeñas muestras dichas propiedades no presentan variaciones. La homogeneidad en las placas de concreto asfáltico es de suma importancia ya que esta determina la correcta mezcla y distribución de sus componentes, asegurando que las propiedades internas sean las mismas en cualquier punto de la placa de concreto asfáltico.

Para evaluar estadísticamente la homogeneidad de las probetas se estableció como parámetro a revisar la Densidad relativa, calculado de la siguiente manera:

$$\rho_r = \frac{\rho_{\max} - \rho_i}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} * 100$$

Se emplearon los métodos de Prueba de hipótesis y método no paramétrico.

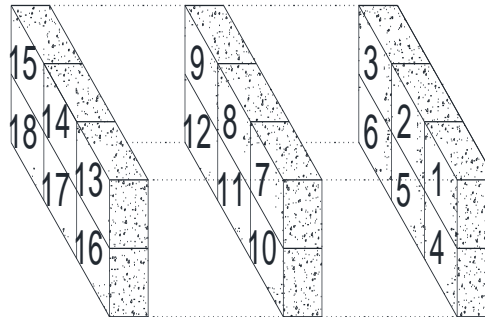
#### 3.1. TOMA DE DATOS.

Se optó por realizar unos cortes y dividir la probeta en pequeños sectores, como se muestra en la Figura 8, a los cuales se les medirá la respectiva densidad. Los sectores a cortar fueron ambos extremos y un sector intermedio, a cada sector se realizó un corte a la mitad de su altura y 3 cortes a lo largo (teniendo en cuenta como largo la distancia 50 cm). Se dejaron secar las muestras obtenidas (un total de 18) por cada probeta, por un par de días, tomando varias mediciones del peso de cada muestra hasta que el peso no varié (completamente secas).

La densidad corresponde a una propiedad intensiva, es decir, que en cualquier punto, corte o subdivisión de una placa de concreto asfáltico debería tener el mismo valor, por medio de la medición de dicha propiedad en distintos sectores de una misma placa se verifica la

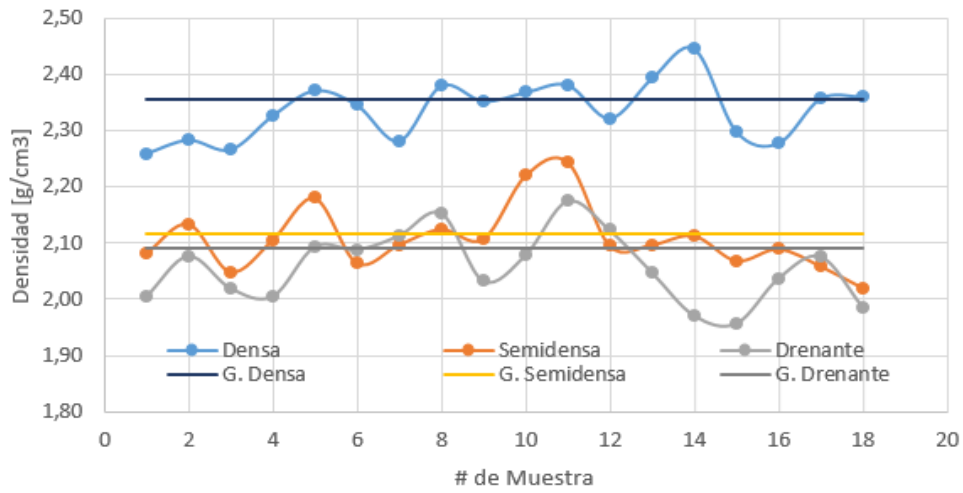
homogeneidad o heterogeneidad que se presenta. El proceso realizado para la compactación de las probetas será el ideal entre más homogénea sea la probeta, es decir, que los valores de densidad en distintos puntos sea similar.

Figura 8. Corte y enumeración de las muestras de la probeta



Debido a la irregularidad presentada en las caras de las muestras, el volumen se determinó utilizando el Principio de Arquímedes, donde se recubrió las muestras con una película de plástico evitando que el fluido se incorpore en sus vacíos y poder tomar una medición más exacta del volumen ocupado, éste plástico no afectará el volumen de la muestra ya que el espacio que ocupa es despreciable. Los datos obtenidos se representaran de la siguiente manera, una gráfica para cada mezcla en la cual la abscisa y ordenada será el número de corte (Figura 8) y su densidad [g/cm<sup>3</sup>] respectivamente, la línea horizontal en cada gráfica corresponde a la densidad global de cada probeta (sin realizar cortes) (Tabla 6). En la Figura 9 se presenta la densidad versus el número de corte para los tres tipos de mezclas. Los valores de densidad que dieron origen a esta gráfica se encuentran en el ANEXO B. VARIACIÓN DE DENSIDAD EN PROBETAS PARALELEPÍPEDAS.

Figura 9. Densidad vs # Muestra para las mezclas.



Como se observa en la Figura 9 donde los valores son más similares entre sus muestras son las pertenecientes a la mezcla densa, seguida de la semidensa y por último la drenante. Visualmente se puede observar que la probeta de la mezcla densa podría ser una probeta homogénea, pero para afirmar esta hipótesis se opta por realizar análisis estadísticos con los cuales se ratificaría que la probeta es homogénea. Se realizó una Prueba de Hipótesis, y un Método no Paramétrico para cada serie de datos (18 muestras de los cortes), por probeta.

### 3.2. EVALUACIÓN POR PRUEBA DE HIPÓTESIS.

Los componentes principales para realizar la prueba de hipótesis son los siguientes:

- Hipótesis Nula
- Hipótesis Alternativa
- Estadística de Prueba
- Región de aceptación y de Rechazo

A continuación se presentaran los datos y resultados obtenidos al momento de realizar la prueba de hipótesis para cada serie de datos.

Para verificar la homogeneidad de las probetas partiremos de la siguiente hipótesis, “El promedio de densidad relativas de las muestras es igual al valor de la densidad relativa global (Probeta con características homogéneas)”. Entonces la Hipótesis nula (Tabla 7) es: “La densidad relativa media de las muestras es igual a la densidad relativa global” y la Hipótesis alternativa (Tabla 8) es: “La densidad relativa media de las muestras es diferente de la densidad relativa global”. El estadístico de prueba utilizado es t de student. El nivel de significancia será de “0.01”, la densidad relativa está representada en %. La región de aceptación o rechazo (mismo para los tres series de datos) se determina hallando los límites de “t”, con ayuda computacional del programa Excel utilizamos la función “=INV.T.2C(nivel de significancia ; n - 1)”, donde N-1 será diecisiete para las tres probetas, y el nivel de significancia será "0.005" por cola. Se supone que los datos se adecuan a una distribución normal.

- Hipótesis Nula

Tabla 7. Hipótesis nula para cada serie

Densa	Ho	$\mu = 47,845$
Semidensa	Ho	$\mu = 56,532$
Drenante	Ho	$\mu = 37,873$

- Hipótesis alternativa

Tabla 8. Hipótesis alternativa para cada serie

Densa	H1	$\mu \neq 47,845$
Semidensa	H1	$\mu \neq 56,532$
Drenante	H1	$\mu \neq 37,873$

- Estadística de Prueba

En este punto se determina los valores para conocer si se acepta o se rechaza la hipótesis nula y si la hipótesis “El promedio de densidad relativa de las muestras es igual al valor de la densidad relativa global (Probeta con características homogéneas)” es correcta o no. La hipótesis nula se acepta cuando el valor de “ $t_0$ ” (Tabla 10) de la serie de datos cae dentro de la región de aceptación (Figura 10), en el caso contrario la hipótesis nula se rechaza.

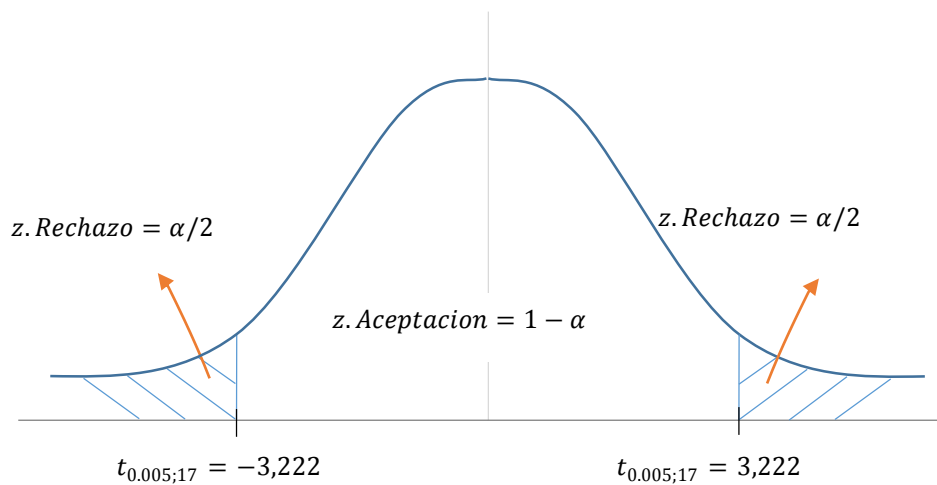
$$t_0 = \frac{\bar{X} - \mu}{\delta/\sqrt{n}}$$

Tabla 9. Estadística de Prueba

	Media	Des. Estándar
Densa	58,160	27,441
Semidensa	60,635	25,564
Drenante	53,771	28,265

- Región de Aceptación y Rechazo

Figura 10. Región de Aceptación y Rechazo



$$\text{INV. T. } 2C(\alpha; n - 1) = t_{0,005;17} = 3,222$$

Con los valores de “to” encontrados en la Tabla 10, se puede confirmar la región donde se encuentra este valor, viendo la Figura 10, y se especifica si se Acepta o Rechaza Ho (Tabla 10).

Tabla 10. Aceptación o Rechazo de Ho

	to	Zona
Densa	1,595	Se Acepta Ho
Semidensa	0,681	Se Acepta Ho
Drenante	2,386	Se Acepta Ho

Se Acepta Ho para todos los casos, es decir, para la serie de datos de las tres probetas. El promedio de densidad relativa de las muestras es igual al valor de la densidad global relativa (Probeta con características homogéneas), con una significancia de “0.01”. Según esto así se presente variaciones en las densidades de las 18 muestras de una probeta, estas pueden asemejarse a la densidad relativa global de la probeta, se sabe que la densidad es una propiedad intensiva, en cualquier punto o corte su densidad debe ser igual, por medio de esta prueba de hipótesis determinamos que las densidades en los cortes son similares a la densidad global, con esto se verifica la homogeneidad de las probetas.

### 3.3. EVALUACIÓN POR MÉTODO NO PARAMÉTRICO

Una serie de datos es homogénea, si es una muestra proveniente de una única población. Por lo tanto, una serie de cortes en una probeta asfáltica es homogénea por definición, se puede aplicar análisis probabilísticos elementales a esta serie de datos para verificar la homogeneidad de estos, en este caso se utiliza los test no paramétricos, y se describe el procedimiento de dicho método.

En este método se cuenta el número de corridas arriba y abajo de la mediana de la serie de datos (Tabla 11), el número de corridas se halla como se especifica en el siguiente ejemplo: “AA BBB AAA B A B”, el valor de A representaría los datos de la lista que están sobre la mediana, y el valor B los valores debajo de la mediana, el número de corridas es la cantidad de grupos A, y B que se generan en secuencia en este caso 6.

Utilizando la tabla “Distribución de Número de Corridas  $N_a=N_b$ ” donde  $N_a=9$  debido a que se supone que la mitad de los datos se encuentran por encima de la media (A), y la otra mitad por debajo de la media (B), se encuentran el límite de los números de corridas que encuentra en la Tabla 12.

Tabla 11. Número de Corridas de la serie de datos.

	Mediana	No corridas
Densa	51,80	8
Semidensa	65,63	9
Drenante	51,86	9

Tabla 12. Límites de Numero de corrida en función de  $N_a$

$N_a$	p 0.10	p 0.90
9	7	12

Siendo los límites del número de corrida 7 y 12, se concluye que las series de densidades presentadas en la mezcla densa, semidensa y drenante son homogéneas dado que los números de corridas de estas, están entre el intervalo [7 , 12] .

#### 4. CONCLUSIONES

Los estudios y pruebas realizadas permitieron diseñar un procedimiento de fabricación de placas de concreto asfáltico para ensayos de deformación bajo carga rodante.

La compactación vibratoria con martillos accionados por un motor eléctrico, permitieron obtener muestras de concretos bituminosos con elevado grado de densificación.

Se redactó un proyecto preliminar de norma para la fabricación de cuerpos de prueba en estudios de ahuellamiento de mezclas bituminosas.

De acuerdo con la comparación de densidad global y la densidad local de las probetas densas, semidensas y drenantes, el procedimiento de compactación seleccionado permite obtener probetas con variaciones de densidad no superiores al 7 % respecto de la densidad proyectada del material. Las probetas presentan variaciones de densidad con valores más elevados en el centro del espécimen y decreciendo hacia los costados y las esquinas.

No se observaron diferencias significativas en las densidades medias de las caras superior e inferior de las probetas.

## 5. RECOMENDACIONES

El manejo de un martillo compactador como el usado en las pruebas se torna complejo debido a su gran peso, se recomienda una segunda fase del estudio empleando un martillo compactador que exija menor capacidad física para su manipulación.

Se recomienda para próximos estudios sobre compactación de probetas paralelepípedas homogéneas, realizar comparaciones entre muestras tomadas en campo y elementos confeccionados en laboratorio en cuanto a la orientación de partículas de agregados y la homogeneidad de éstas.

## BIBLIOGRAFIA

DELFÍN ARIZTÍA, Federico. Efecto de la presencia de humedad en el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a ensayo de rueda de carga (NORMA NLT-173/84). Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2011. 140p.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS., Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio. Santafé de Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 15p. INV E-756-07.

NAVARRO GÓMEZ, Manuel Javier y MIRÓ RECASENS, Rodrigo., Análisis del nuevo procedimiento de compactación de probetas de mezcla bituminosa para los ensayos de pista y de fatiga. Métodos de Compactación y compactación de probetas en forma de paralelepípedo. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori, 2009. 183p.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. MARTIN GARZÓN, Laura Mercedes y CASTAÑEDA PINZÓN, Eduardo Alberto. Desarrollo de ayudas para la formulación de mezclas asfálticas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010 .139p

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.. MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos. Tomo 1. Fundamentos, estudios básicos y diseño. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2006. 612p.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.. MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos. Tomo 1. Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2006. 496p.

UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL., MORENO CHÁVEZ, Marcelo Andrés y

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Sede Palmira [En línea].

<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000134/contenido/cap10/lec3.htm>

[citado el 7 de mayo del 2015]

## ANEXOS

### Anexo A. Propuesta de Norma de Fabricación de Probetas para Ensayo de Ahuellamiento

#### 1. OBJETO

Esta propuesta de norma describe el procedimiento y pasos a seguir para la confección de probetas en forma de paralelepípedo con características para ser ensayadas en la máquina de ahuellamiento utilizando un método vibratorio con un martillo compactador.

Los valores aquí presentados corresponden a unidades SI

Esta propuesta de norma se limita a dar la descripción del procedimiento y se abstiene de dar lineamientos de seguridad relacionados con el mismo. Es responsabilidad del usuario de las mismas establecerá las medidas de seguridad y salubridad apropiadas y determinación de las limitaciones regulatorias antes de su empleo

#### 2. RESUMEN

La propuesta de procedimiento consiste en la fabricación de pruebas paralelepípedas con una longitud de 50 cm, un ancho de 18 cm y una altura de 5 cm o 10 cm, para su posterior ensayo de resistencia al ahuellamiento. 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 antes de su ensayo siguiendo las normas correspondientes.

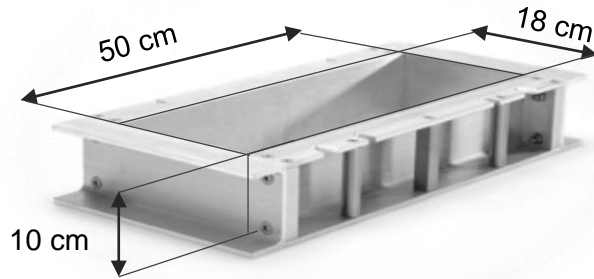
El procedimiento de confección requiere que los materiales propuestos cumplan con las especificaciones de granulometría y otros fijados para el desarrollo para el proyecto.

### 3. MATERIALES NECESARIOS

- 1) Dispositivo para moldear probetas – Está formado por un molde en forma de cajón (Figura 1), con una guía a manera de extensión, junto una base llana, las dimensiones internas del molde serán de 50 cm de largo, 18 cm de ancho y 10 cm de alto; cada uno de los elementos deberá tener una guía por la cual pasará una barra metálica que sujetará firmemente el conjunto, se sugiere que el molde tenga agarraderas para su fácil transporte. Es recomendable que se encuentre hecho de un material capaz de retener altas temperaturas sin deformarse.
- 2) Martillo compactador – Se usa un martillo demoledor Dewalt D25980 de 31 kg capaz de entregar 68 J por impacto, la punta debe tener una adaptación en su extremo consistente en una placa metálica con 10 cm de largo 9 cm de ancho y un alto de 2.9 cm que podrá compactar el material.
- 3) Elementos de calefacción – Para calentar los agregados, el material asfáltico, el conjunto de compactación y la muestra se hace uso de un horno o placa de calefacción, que cuente con control termostático, debe mantener la temperatura requerida y con error menor a 2.8°C
- 4) Mezcladora – Debido al tamaño de las probetas es recomendable tener a disposición una mezcladora mecánica capaz de producir en corto tiempo una mezcla homogénea a la temperatura requerida. Caso contrario se puede realizar un mezclado a mano sobre una plancha de calefacción o estufa para evitar el enfriamiento del material.
- 5) Termómetros blindados – De 9.9°C a 204°C para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 2.8° C.
- 6) Balanzas – Una de cinco (5) kg de capacidad, sensible a 0.1 g para pesar agregados y asfalto; otra de treinta (30) kg de capacidad sensible a un (1) g para las probetas compactadas.
- 7) Guantes – De soldador para manejar equipo caliente.
- 8) Crayolas – Para identificar las probetas, también puede usarse tiza.

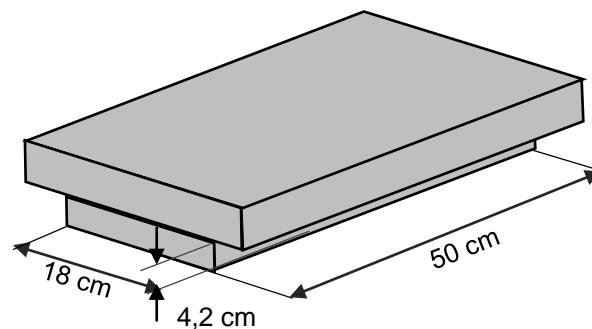
9) Bandejas metálicas – De fondo plano para calentar agregados y mezclar, resistente a calor, elementos de mezclado, espátula, papel filtro y otros elementos que se consideren convenientes utilizar.

Figura 11. Molde para la compactación de probetas Paralelepípedas



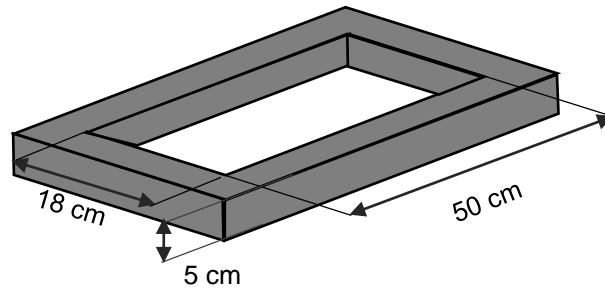
10) Accesorio para perfilado final – Consta de una unión de dos placas, de las cuales la superior tiene las mismas dimensiones que el contorno del molde provisto para la máquina y la placa inferior tiene las dimensiones de la superficie de compactación (50cm x 18 cm), el cual se apoya sobre el collar de extensión.

Figura 12. Accesorio de perfilado final de probetas Paralelepípedas.



11) Collar de apoyo – Consta de un elemento de soporte con las dimensiones internas correspondientes a las de la probeta a compactar y que permitirá llegar al volumen deseado.

Figura 13. Collar de apoyo



11) Lámina de neopreno – Consta de una lámina de neopreno resistente con las dimensiones internas de la probeta que evitará el contacto directo entre el martillo compactador y las partículas del agregado.

Figura 14. Lámina de neopreno

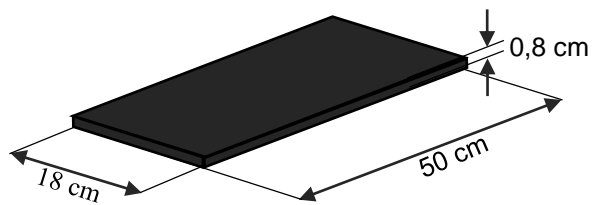


Figura 15. Ensamblado final

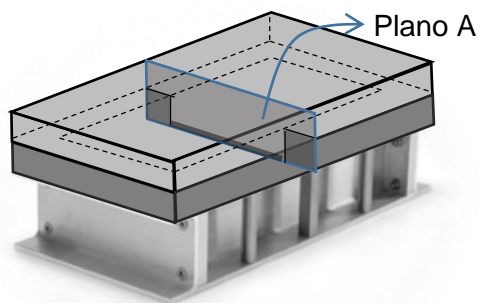
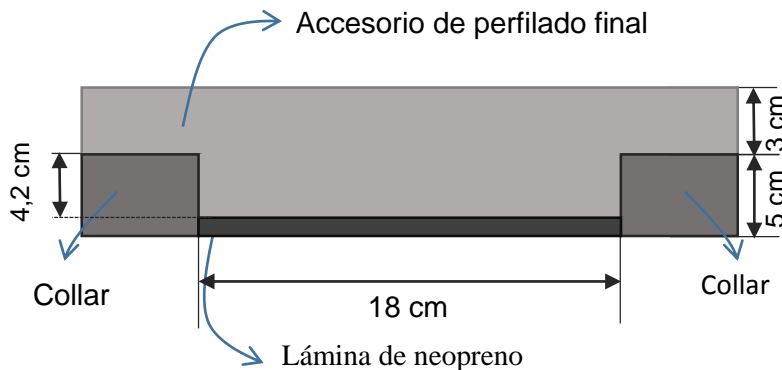


Figura 16. Vista plano A de ensamblado final.



### PREPARACIÓN DE PROBETAS ASFÁLTICAS

- 1) Cantidad de materiales – El material requerido para cada probeta será el necesario para ocupar 9000 cm<sup>3</sup> (probeta de 10 cm de altura), o 4500 cm<sup>3</sup> (probeta de 5 cm de altura), teniendo en cuenta la densidad deseada.
- 2) Preparación de la superficie del molde, cubierta con lamina de aluminio, engrasada y calentada a una temperatura comprendida entre 93.3°C y 148.9°C, dadas las dimensiones del molde se puede utilizar una pistola de calor.
- 3) Calentar los materiales a la temperatura de mezcla requerida según el asfalto a utilizar, en planchas de calentamiento u horno, los agregados deberán someterse a una temperatura 28°C por encima de la temperatura de mezcla. Se mezclan los materiales lo más rápidamente posible hasta resultar homogénea
- 4) Se vierte la mezcla dentro del molde ya acoplado con el collar de apoyo que evitará el desbordamiento de material y que servirá como guía para el accesorio de perfilado final , con una varilla de metal caliente se golpea el material desde afuera hacia adentro para reacomodar los agregados, acto seguido se colocan la lámina de neopreno que cubrirá la superficie de la mezcla, primero en el perímetro y luego en el centro para reducir previamente el volumen y asegurar que la superficie sea lo más uniforme posible.

5) Se supone una malla imaginaria de 2 por 5 rectángulos en la superficie de compactación, con dimensiones de 9 cm de ancho y 10 cm de largo, por los cuales se colocará el martillo compactador encendido sobre cada recuadro en tres recorridos, los cuales durarán diez segundos efectivos, con un total de treinta segundos teniendo en cuenta el tiempo que toma desplazar el martillo, los tres recorridos durarán un minuto y diez segundos proporcionando un total de 200 impactos de 68J, esto permite una segunda reducción del volumen de la probeta, cabe cuidar que la probeta siga siendo llana después de esto y tener en cuenta de no dejar el martillo encendido más de la cuenta en un solo lugar puesto que la compactación en una zona resultará en el levantamiento de las áreas adyacentes.

6) En éste punto se coloca el accesorio de perfilado final, que cubrirá toda la superficie del neopreno, éste se encargará de repartir los esfuerzos de manera uniforme, habrán tres puntos de aplicación de energía, a los lados separados a una distancia de 4,5cm de los bordes y en el centro de la placa, se realizarán ocho recorridos, cada uno tendrá un tiempo de diez segundos efectivos, que serán catorce segundos teniendo en cuenta el recorrido de la máquina, este paso de compactación será completado en un minuto y treinta segundos para un total de 500 impactos de 68J, comenzando por los extremos y terminando en el centro. Se realiza en ocho recorridos.

7) En este punto se retira el accesorio de perfilado final, el collar de apoyo y la lámina de neopreno, se le puede dejar enfriar naturalmente o con ventilador y estará lista para almacenada durante una noche para su enfriamiento final y posterior ensayo.

## Anexo B. Variación de Densidad en Probetas Paralelepípedas

En esta parte se presentan los valores de densidad en las probetas paralelepípedas tabulados correspondientes a la Figura 9 esto con el fin de facilitar la lectura del numeral 3. VERIFICACIÓN DE HOMOGENEIDAD DE LAS PROBETAS

Tabla 13. Densidad en los cortes de la mezcla densa.

	Muestra	$\rho$ . [gr/cm <sup>3</sup> ]
Mezcla Densa	P1	2,26
	P2	2,28
	P3	2,26
	P4	2,33
	P5	2,37
	P6	2,34
	P7	2,28
	P8	2,38
	P9	2,35
	P10	2,37
	P11	2,38
	P12	2,32
	P13	2,39
	P14	2,45
	P15	2,30
	P16	2,28
	P17	2,36
	P18	2,36

Tabla 14. Densidad en los cortes de la mezcla semidensa.

	Muestra	$\rho$ . [gr/cm <sup>3</sup> ]
Mezcla Semidensa	S1	2,08
	S2	2,13
	S3	2,05
	S4	2,10
	S5	2,18
	S6	2,06
	S7	2,10
	S8	2,12
	S9	2,11
	S10	2,22
	S11	2,24
	S12	2,09
	S13	2,10
	S14	2,11
	S15	2,07
	S16	2,09
	S17	2,06
	S18	2,02

Tabla 15. Densidad en los cortes de la mezcla drenante.

	Muestra	$\rho$ . [gr/cm <sup>3</sup> ]
Mezcla Drenante	D1	2,00
	D2	2,08
	D3	2,02
	D4	2,00
	D5	2,09
	D6	2,09
	D7	2,11
	D8	2,15
	D9	2,03
	D10	2,08
	D11	2,17
	D12	2,12
	D13	2,05
	D14	1,97
	D15	1,96
	D16	2,04
	D17	2,08
	D18	1,99