

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**“DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE  
CON CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO  
DE LA RESISTENCIA A LA HUMEDAD”**

PRESENTADO POR:

**SARA BEATRIZ AGUILAR BONILLA**

**ENMANUEL ALEXANDER HERNÁNDEZ MALDONADO**

**YENCI RAQUEL SIBRIÁN HERNÁNDEZ**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO(A) CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2016

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR INTERINO :

**LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN**

SECRETARIA GENERAL :

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR :

**ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO(A) CIVIL**

Título :

**“DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE  
CON CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO  
DE LA RESISTENCIA A LA HUMEDAD”**

Presentado por :

**SARA BEATRIZ AGUILAR BONILLA**

**ENMANUEL ALEXANDER HERNÁNDEZ MALDONADO**

**YENCI RAQUEL SIBRIÁN HERNÁNDEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docentes Directores :

**ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES**

**ING. LUIS ANTONIO LÓPEZ LEMUS**

San Salvador, Junio de 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES**

**ING. LUIS ANTONIO LÓPEZ LEMUS**

## **AGRADECIMIENTOS**

A los maestros de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, quienes desde el primer año nos han compartido sus conocimientos, con la única finalidad de dar a la sociedad profesionales capaces y comprometidos con el mejoramiento y desarrollo del entorno.

Agradecemos de manera especial al Ing. Luis Antonio López Lemus e Ing. Dilber Antonio Sánchez Vides, por quienes sentimos un profundo cariño y respeto; por su tiempo y paciencia, y por habernos compartido todos sus conocimientos para lograr que este trabajo de graduación sea de calidad, sin obtener nada a cambio.

Agradecemos al Ing. Evelio López y al Técnico Carlos Morataya, por todo el apoyo recibido durante el tiempo que utilizamos el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil, ayudándonos a cumplir la calendarización planteada.

Agradecemos a los Técnicos de la empresa constructora DISA S.A de C.V. Juana del Carmen Ramos Gámez, Ricardo José Méndez Martínez, Henry Adalid Pérez, José Nelson Mejía Flores, por todos los conocimientos compartidos y por su valiosa ayuda en la ejecución de los ensayos requeridos en este trabajo de graduación.

***Los autores  
(13/06/2016)***

## DEDICATORIA

A mi GRANDE Y PODEROSO **DIOS**, porque sin ÉL nada soy.

A María Auxiliadora y su hijo Jesús a quienes respeto y amo.

A mi buena madre Victoria Bonilla, a quien le debo mi vida, tu bondad no conoce límites madre.

A mi hermano Mario Antonio Aguilar Bonilla y su esposa Jennifer Ann Aguilar, por su apoyo incondicional, por quererme mucho y creer siempre en mí, hermano sos el hombre que más amo en esta tierra, sos mi orgullo y mi más grande admiración.

A esa niña hermosa que Dios en su bondad hizo mi hija, a quien amo con todo mi ser, por quien seguí adelante cuando ya no podía, mi Ariadne Ailin de nadie seré, sólo de vos, hasta que mi corazón deje de latir y mis huesos se vuelvan cenizas, sos grande y perfecta para mí, para siempre mi inefable Ariadne Ailin.

A mi sobrinita Kimberly Judith Aguilar por cuidar a mi hija cuando tenía que irme a estudiar, no hubiera podido sin vos mi amor, vos mi niña siempre serás mi niña, mi princesa grandota, la primera niña a la que ame, te amaré por siempre.

Al papá de mi hija por su ayuda incondicional para mi hija, por darle todo lo que ella ha necesitado, gracias a eso pude dedicarme a estudiar y terminar mi carrera.

A mis sobrinitos Mario Adalberto Aguilar y Enmanuel Enrique Aguilar, mis niños grandotes a quienes amo mucho y de quienes espero estén orgullosos de mí.

A mis compañeros de tesis por todo lo que recibí y aprendí de ellos, los quiero muchote Yenci y Enmanuel.

*“El primer paso de la ignorancia es presumir de saber”  
(Baltasar Gracián)*

**Sara Aguilar Bonilla**

## **DEDICATORIA**

**A DIOS:** Porque todo sucede por su gracia y misericordia.

**A MIS PADRES:** Gerver Andrés Hernández Flores y Laura Alicia Maldonado Muñoz, por el apoyo incondicional que me han brindado en todo y en especial en este trabajo de graduación, por todos los sacrificios que realizaron para que concluyera mis estudios universitarios, es un logro que no hubiese sido posible sin ellos, GRACIAS.

**A NUESTROS ASESORES:** Al Ing. Dilber Antonio Sánchez y al Ing. Luis Antonio López Lemus, por su ayuda y colaboración en el desarrollo del tema, por forjarnos con sus conocimientos en nuestra formación académica sin esperar nada a cambio, con la única satisfacción de formar mejores profesionales.

**A MIS COMPAÑERAS DE TESIS:** Sara Beatriz Aguilar Bonilla y Yenci Raquel Sibrian Hernández, por todo el apoyo y comprensión que me brindaron en todo el tiempo que compartimos, fue un trabajo duro del cual ahora vemos los frutos, gracias.

**A MI NOVIA:** Lucia Beatriz Quijano Guardado, por siempre apoyarme, aconsejarme y animarme cuando lo necesitaba, es algo por lo que estoy inmensamente agradecido

**A MIS AMIGAS:** Yanina Segura y Damaris Miranda, que siempre me animaron.

**A MIS AMIGOS:** Douglas Joel, Diego Andrés, José Mauricio, Jorge Valdez, José Rafael, por nunca negarse a prestarme su colaboración.

En general a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron de manera positiva a que termináramos este trabajo de graduación.

*"Y a todos aquellos que un día lanzaron piedras sobre mí. ¡Gracias! porque con ellas he construido los muros de mi casa donde hoy habita mi alma"*

***Enmanuel Alexander Hernández Maldonado***

## DEDICATORIA

Primeramente dándole las gracias a **DIOS**, por permitirme llegar al final de mi carrera, no fue fácil pero con la ayuda de Él lo logre, por darme el entendimiento y la sabiduría para entender las cosas que me parecían tan difíciles de comprender, la paciencia para los momentos agobiantes, la tolerancia para los momentos que la necesite, por haberme puesto en mi camino personas maravillosas.

A mis padres por ser un pilar importante para mi superación personal y poder culminar mi carrera, por todos los momentos que pasamos juntos, por apoyarme siempre, por estar ahí cuando los necesitaba, por el amor, por darme la vida por pensar primero en sus hijas antes que en ellos. Por los celebraciones de mis triunfos. "Gracias por la Confianza y la Fe que Depositaron en Mí".

A mi madre **ROSA MARGARITA HERNÁNDEZ CORTÉZ** gracias por el apoyo, el amor y las correcciones a lo largo de mi vida, por las palabras de aliento para seguir perseverando, por ser una madre ejemplar, por seguir esforzándose por sus hijas, por demostrarme que si se puede salir adelante cuando se quiere. "Gracias por Creer en Mí"

A mi padre **RODOLFO SIBRIÁN (Q.E.P.D)**, por ser un gran padre, por todo el amor que me dio, por sus consejos, por las enseñanzas y por aclarar dudas a lo largo de mi carrera, por ser un ejemplo de perseverancia y constancia, por el

valor demostrado para salir adelante siempre. "Gracias por Todo, Siempre te Recordaré"

A mi tío **MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ** gracias por su apoyo, por estar pendiente a lo largo de mi carrera y de la familia. "Gracias por su Apoyo"

A mi novio **FELIPE ALBERTO GUTIÉRREZ ROMERO** por entrar en mi vida, por compartir juntos momentos llenos de risas y alegrías, por brindarme tu hombro en los momentos que los necesite, por estar a mi lado en los tiempos desagradables, por tus palabras de ánimo para salir adelante, por tu gran apoyo a lo largo de mi carrera, por la confianza y paciencia que me has tenido, le doy gracias a Dios por haberte puesto en mi camino. " Gracias por Estar a Mí Lado"

A mis compañeros de tesis: **ENMANUEL HERNÁNDEZ Y SARA AGUILAR**, con quienes he terminado los últimos pasos de la carrera, les agradezco por todos los momentos buenos y malos; los cuales hemos superado, porque de una u otra manera hemos estrechado más los lazos de amistad, gracias por todo y espero que todos salgamos adelante. "Un Logro Más en Nuestras Vidas"

A mis **AMIGOS** muchas gracias por todo su cariño y apoyo, porque de una u otra manera han aportado su ayuda en la realización de este esfuerzo.

A nuestros asesores: **ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ** e **ING. LUIS ANTONIO LÓPEZ LEMUS**; gracias por guiarnos en la realización de este trabajo de graduación, por darnos parte de su valioso tiempo, por aclarar

nuestras dudas, por los conocimientos impartidos en la realización de esta investigación. "Gracias por Creer en Nosotros"

A **TODOS LOS DOCENTES** que formaron parte de mi formación académica, gracias por la aportación de sus conocimientos, gracias por su amistad y confianza, por todas las pruebas a lo largo de la carrera que fueron difíciles de superar, pero no imposibles. " Gracias por su Conocimiento"

En especial a Ing. Susan Campos por sus consejos y su amistad. "La Aprecio Mucho"

*"Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia".*

**Yenci Raquel Sibrián Hernández**

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I. “GENERALIDADES”</b> .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
ANTECEDENTES .....	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	6
OBJETIVOS .....	8
OBJETIVO GENERAL .....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	8
ALCANCES .....	9
LIMITACIONES .....	10
JUSTIFICACIÓN .....	10
<b>CAPÍTULO II. “AGREGADOS PÉTREOS, CEMENTO ASFÁLTICO, CLIMA DE EL SALVADOR Y CAL HIDRATADA”</b> .....	12
2.1 IMPORTANCIA DEL AGREGADO PÉTREO EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA. ....	13
2.2 ACOPIO DE AGREGADO PÉTREO .....	14
2.3 IMPORTANCIA DEL MUESTREO Y REDUCCIÓN DE AGREGADO PÉTREO. ....	15
2.4 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS QUE SE UTILIZAN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (M.A.C). ....	16
2.5 ESPECIFICACIONES PARA AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (M.A.C.) .....	19
2.6 ASFALTO .....	21
2.7 CUALIDADES Y CLASIFICACIÓN DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS. ....	22
2.8 ENSAYOS REALIZADOS AL ASFALTO PARA DETERMINAR SUS PROPIEDADES. ....	23
2.9 CLIMA DE EL SALVADOR. ....	24
2.9.1 Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas principales. ...	25
2.10 CAL HIDRATADA .....	27

2.10.1 Aplicaciones de la Cal Hidratada .....	28
2.11 INFLUENCIA DE LA CAL HIDRATADA EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE. ....	29
2.12 MÉTODOS DE ADICIÓN DE CAL HIDRATADA PARA ASFALTAR. ....	31
2.13 EXPERIENCIAS EN OTROS PAISES QUE HAN UTILIZADO CAL HIDRATADA EN CARRETERAS.....	31
<b>CAPITULO III. “HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS EN EL SALVADOR, MÉTODO BAILEY, MÉTODO MARSHALL ”</b> .....	<b>34</b>
3.1 HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS EN EL SALVADOR.....	35
3.2 MÉTODO BAILEY.....	36
3.2.1 Empaquetamiento de los agregados. ....	38
3.2.2 Agregado grueso y fino.....	38
3.2.3 Dosificación de los agregados por volumen. ....	39
3.2.4 Análisis de la mezcla combinada.....	43
3.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLA (ANALIZANDO EL MÉTODO MARSHALL). ....	44
3.4 MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL. ....	48
3.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO MARSHALL. ....	48
3.5.1 Especificaciones de la Metodología.....	49
3.6 EVALUACION Y AJUSTES DE UNA MEZCLA DE DISEÑO.....	51
3.7 LINEAMIENTOS GENERALES PARA AJUSTAR LAS MEZCLAS DE PRUEBA. ....	52
3.7.1 Bajo Contenido de vacíos, baja estabilidad. ....	52
3.7.2 Bajo contenido de vacíos, estabilidad satisfactoria.....	53
3.7.3 Contenido satisfactorio de vacíos, baja estabilidad. ....	53
3.7.4 Contenido alto de vacíos, estabilidad satisfactoria. ....	54
3.7.5 Contenido alto de vacíos, baja estabilidad. ....	54
3.8 ENSAYOS REALIZADOS A LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA. ....	55
3.8.1 Determinación de la gravedad específica bulk. ....	55
3.8.2 Ensayo de estabilidad y flujo. ....	55

3.8.3 Análisis de densidad y vacíos.....	56
<b>CAPITULO IV. “DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON CAL HIDRATADA”</b> .....	<b>58</b>
4.1 ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS AL ASFALTO.....	59
4.2 ENSAYOS DE LABORATORIOS DE LOS AGREGADOS. ....	61
4.3 METODO BAILEY.....	65
4.3.1 Granulometría combinada .....	67
4.3.2 Porcentaje de asfalto optimo teórico.....	68
4.4 DISEÑO MARSHALL.....	69
4.4.1 Puntos de diseño .....	69
4.4.2 Gravedad especifica teórica máxima y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación. ....	77
4.4.3 Gravedad especifica Bulk de mezclas asfálticas en caliente compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos. ....	79
4.4.4 Resistencia de Mezclas Bituminosas al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Utilizando el Aparato Marshall.....	80
4.4.5 Vacíos.....	81
4.4.6 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto .....	82
4.5 Ensayo de susceptibilidad a la humedad.....	87
4.5.1 Extracción Cuantitativa de asfalto en mezclas de pavimento bituminoso. ....	88
4.6 DISEÑO MARSHALL CON INCORPORACIÓN DE PORCENTAJES DE CAL HIDRATADA. ....	91
4.6.1 Mezclado de los diferentes porcentajes con cal hidratada. ....	94
4.6.2 Ensayos para el 1% y 2% de cal hidratada .....	95
4.7 ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD POR CADA PORCENTAJE DE CAL HIDRATADA. ....	96
4.7.1 Extracción del asfalto por cada porcentaje de cal hidratada.....	99
4.8 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. ....	101
<b>CAPITULO V. “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”</b> .....	<b>105</b>
CONCLUSIONES .....	106

RECOMENDACIONES .....	108
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	109
<b>ANEXOS</b> .....	112
ANEXO 1. GRANULOMETRÍA GRAVA TMN $\frac{3}{4}$ " .....	113
ANEXO 2. GRANULOMETRÍA GRAVA CERO .....	114
ANEXO 3. GRANULOMETRÍA ARENA TRITURADA .....	115
ANEXO 4. DESGASTE MÁQUINA DE LOS ANGELES GRAVA TMN $\frac{3}{4}$ " .....	116
ANEXO 5. PESOS VOLUMÉTRICOS GRAVA TMN $\frac{3}{4}$ " .....	117
ANEXO 6. PESOS VOLUMÉTRICOS GRAVA CERO .....	118
ANEXO 7. PESOS VOLUMÉTRICOS ARENA TRITURADA .....	119
ANEXO 8. ABSORCIÓN GRAVA TMN $\frac{3}{4}$ " .....	120
ANEXO 9. ABSORCIÓN GRAVA CERO .....	121
ANEXO 10. ABSORCIÓN ARENA TRITURADA .....	122
ANEXO 11. RAZÓN DE CORRELACIÓN DE ESTABILIDAD .....	123
ANEXO 12. ECUACION DE MEJOR AJUSTE PARA EL EQUIPO BAJO PRUEBA .....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

### **CAPITULO II. "AGREGADOS PÉTREOS, CEMENTO ASFÁLTICO, CLIMA DE EL SALVADOR Y CAL HIDRATADA".**

Fig. 2.1 Acopios de DISA S.A DE C.V.....	15
Fig. 2.2 Cuarteo manual de agregados pétreos.....	16

### **CAPITULO III. "HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS EN EL SALVADOR, MÉTODO BAILEY, MÉTODO MARSHALL".**

Fig. 3.1 Esquema del Peso Volumétrico sin compactar.....	40
Fig. 3.2 Esquema del Peso Volumétrico compactado.....	40
Fig. 3.3 Selección de la masa específica escogida para los agregados.....	43
Fig. 3.4 Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada.....	46
Fig. 3.5 Diagrama de los componentes de una mezcla asfáltica en caliente.....	47

### **CAPITULO IV. "DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON CAL HIDRATADA".**

Fig. 4.1 Proceso de mezclado de agregados y calentamiento del asfalto.....	74
Fig. 4.2 Mezclado de los agregados con el asfalto.....	74
Fig. 4.3 Cuarteo de la mezcla asfáltica en caliente.....	74
Fig. 4.4 Calentamiento del equipo de compactación.....	76
Fig. 4.5 Proceso de compactación de las briquetas.....	76
Fig. 4.6 Materiales pesados para el 1% y 2% de cal hidratada.....	94
Fig. 4.7 Peso de la muestra, colocación en la canasta y en el horno de ignición.....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

### **CAPITULO II. "AGREGADOS PÉTREOS, CEMENTO ASFÁLTICO, CLIMA DE EL SALVADOR Y CAL HIDRATADA".**

Tabla 2.1. Requisitos del agregado grueso.....	20
Tabla 2.2. Rangos requeridos, granulometría de agregados para concreto asfáltico en caliente.....	21
Tabla 2.3. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas principales de la zona occidental.....	25
Tabla 2.4. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas principales de la zona central.....	26
Tabla 2.5. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas principales de la zona paracentral.....	26
Tabla 2.6. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas principales de la zona oriental.....	27

### **CAPITULO III. "HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS EN EL SALVADOR, MÉTODO BAILEY, MÉTODO MARSHALL".**

Tabla 3.1 Criterios del instituto del asfalto para el diseño Marshall.....	50
Tabla 3.2 Porcentaje mínimo de VMA.....	51

## **CAPITULO IV. "DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON CAL HIDRATADA".**

Tabla 4.1 Resultados de los laboratorios realizados al asfalto.....	61
Tabla 4.2 Resultados de los laboratorios realizados a los agregados pétreos.....	64
Tabla 4.3 Composición granulométrica BAILEY.....	66
Tabla 4.4 Granulometría combinada.....	67
Tabla 4.5 Factor k a utilizar en el diseño óptimo teórico.....	69
Tabla 4.6 Proporcionamiento de los agregados para el diseño.....	71
Tabla 4.7 Rango de viscosidad temperatura para un cemento asfaltico ac-30..	73
Tabla 4.8 Resultados de la gravedad específica teórica máxima.....	77
Tabla 4.9 Resultados de gravedad específica Bulk para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.....	79
Tabla 4.10 Resultados de estabilidad y flujo de diseño de mezcla asfáltica en caliente.....	80
Tabla 4.11 Datos para el cálculo de los vacíos.....	81
Tabla 4.12 Resumen de resultados.....	83
Tabla. 4.13 Resultados obtenidos de los gráficos.....	87

Tabla 4.14 Resumen de extracción cuantitativa del asfalto.....	89
Tabla 4.15 Grado de tensión indirecta (TSR).....	90
Tabla 4.16 Cantidad de material total.....	92
Tabla 4.17 Cantidad de material para los mezclado de 7500g y 10000g.....	92
Tabla 4.18 Puntos de diseño con cal hidratada para mezclado de 7500 g.....	93
Tabla 4.19 Puntos de diseño con cal hidratada para mezclado de 10000g.....	93
Tabla 4.20 Cuadro resumen de los ensayos.....	95
Tabla 4.21 Grado de Tensión TSR para el 1.00% de cal hidratada.....	97
Tabla 4.22 Grado de Tensión TSR para el 2.00% de cal hidratada.....	98
Tabla 4.23 Resumen de resultados para graficar.....	101

# **CAPÍTULO I.**

## **“GENERALIDADES”**

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación se lleva a cabo por la necesidad de mejorar la resistencia a la humedad, de los pavimentos elaborados con mezclas asfálticas en caliente por medio de la incorporación de cal hidratada.

En nuestro país la red vial juega un papel muy importante en la economía, por ello es necesario tener infraestructuras de carreteras modernas, en buenas condiciones, para que exista una interconexión entre las principales ciudades de nuestro país y los de la región.

Los pavimentos de mezclas asfálticas en caliente que actualmente se encuentran en nuestro país, tienen buen diseño geométrico, los materiales que se utilizan se rigen bajo las especificaciones y normas que establece el contratante; sin embargo no están cumpliendo con el tiempo de vida útil para el cual han sido diseñados y uno de los factores que contribuye a eso es la humedad, especialmente en épocas lluviosas.

El DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA HUMEDAD, tiene como objeto de estudio, realizar un diseño con la incorporación de cal hidratada a mezcla asfáltica en caliente, mediante la metodología Marshall y medir el aumento que esta adición genera mediante el método de ensayo de laboratorio bajo la norma AASHTO T283-07 (Método estándar de prueba para la

resistencia de mezclas asfálticas compactadas debido al daño inducido por la humedad).

Los capítulos que se abordan se describen a continuación:

Capítulo I contiene la introducción de la investigación, información sobre los antecedentes de la temática resaltando su importancia y auge, el planteamiento del problema, los objetivos de estudio, general y específicos, la justificación, los alcances y limitaciones de la investigación.

Capítulo II se presenta el marco teórico, iniciando con la importancia de los agregados pétreos, reducción, muestreo y otros aspectos de éstos, definiciones, tablas y desarrollo de los aspectos generales para la investigación como el ligante asfáltico, MAC, el clima de nuestro país y finalizando con las aportaciones y experiencias en otros países sobre la cal hidratada.

Capítulo III se continúa con el marco conceptual iniciando con la historia de los pavimentos en el país, conocer la metodología Bailey, características y especificaciones del método Marshall, y lineamientos para ajustar mezclas de pavimentos flexibles.

Capítulo IV se centra en el desarrollo de los ensayos al asfalto AC-30 y los diferentes agregados pétreos, luego se realiza el proporcionamiento Bailey del cual se obtiene la granulometría combinada, para dar origen al diseño Marshall con el objetivo de encontrar el porcentaje óptimo de asfalto, continuando con la

incorporación del 1% y 2% de cal hidratada al diseño Marshall, siendo evaluada por medio de la norma AASHTO T 283-07, concluimos con el análisis de los resultados obtenidos por medio de gráficos.

Capítulo V se muestran las conclusiones y recomendaciones; para finalizar la bibliografía utilizada y los anexos.

## **ANTECEDENTES**

En El Salvador a raíz del conflicto armado que se vivió de 1979 a 1992, las infraestructuras viales, fueron dañadas enormemente y se deterioraron por el poco mantenimiento. Después del conflicto se inició la etapa de reconstrucción en todo el país, y el área de mantenimiento y rehabilitación vial fue una de las mayores actividades, y se empezó la construcción de nuevas vías para mantener habilitado el sistema vial del país y la interconexión con las carreteras internacionales fomentando el desarrollo local e internacional.

Las capas de rodadura de las vías pavimentadas del país en su mayoría son del tipo flexible a base de mezcla asfáltica en caliente, método de diseño que se utiliza es el método Marshall, desarrollado por Bruce Marshall ingeniero que trabajaba para el departamento de carreteras del estado de Misisipi. El ensayo Marshall, surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un método simple.

La durabilidad y calidad de un pavimento flexible depende de la calidad de los materiales, el diseño, la producción y su control de calidad y los procesos constructivos aplicados. La carpeta asfáltica en nuestro país, no está cumpliendo el período de vida para el cual ha sido diseñada, esto se debe a varios factores; pero en esta investigación se considera la humedad como variable.

El clima tropical de El Salvador es impredecible e incontrolable generando en época lluviosa saturación en las capas de rodadura, originando el fenómeno denominado stripping, sin embargo se pueden hacer diseños para mejorar la resistencia a la humedad, es por ello que nace la idea de incorporar cal hidratada al diseño de la mezcla asfáltica en caliente, entre los países que han implementado este diseño podemos mencionar:

Estados Unidos de América, durante la década de 1970 se experimentó un gran interés por la aplicación de la cal hidratada a los pavimentos elaborados con mezcla asfáltica y de esa manera tratar los daños por humedad y las heladas, en los últimos 44 años se ha utilizado como un aditivo multifuncional para las mezclas asfálticas. Los investigadores y las autoridades relacionadas con el transporte han llegado a la conclusión de que la cal amplía la vida del pavimento hasta el 38%.

En Europa, la cal hidratada también se ha utilizado durante muchos años. Recientes investigaciones han establecido que la cal da lugar a múltiples ventajas para las mezclas asfálticas: calientes, templadas y frías, así como para

el reciclaje “in-situ” frío. La adición de cal hidratada previene los deterioros prematuros y aumenta la vida del pavimento. Después de años de investigación, algunos países europeos han convertido el uso de la cal hidratada en mezclas asfálticas como obligatorio en sus reglamentos nacionales para sus carreteras locales, nacionales y autopistas.

Suiza, Alemania, Venezuela, Colombia, también han implementado este método de diseño y se han obtenidos excelentes resultados.

Actualmente este diseño no ha sido investigado en nuestro país, por lo tanto es de suma importancia indagar en el tema, de esto nace la presente investigación de diseñar mediante el método Marshall, una mezcla asfáltica en caliente con cal hidratada para el mejoramiento de resistencia a la humedad, utilizando cemento asfáltico y los agregados de la Constructora DISA S.A de C.V, siguiendo las Normas AASHTO y los manuales del Instituto del Asfalto correspondientes.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En El Salvador la mezcla asfáltica más utilizada en la capa de rodadura es la mezcla asfáltica en caliente, la cual se conforma de agregados pétreos y cemento asfáltico, que son debidamente calentados a una temperatura adecuada tanto para el mezclado como para la colocación y compactación.

En los últimos años el volumen del tránsito que circula por las carreteras es cada vez mayor, el clima se ha vuelto cada vez más impredecible, las lluvias

generan en ocasiones inundaciones en las carreteras ya sea por el poco mantenimiento o por el mal diseño del drenaje, ocasionando de esta forma una mayor exposición al daño a los pavimentos. Por lo tanto es necesario que los pavimentos sean diseñados tomando en cuenta el daño que la humedad causa a estos.

Dado que en nuestro país predomina un clima tropical, la temperatura y la humedad a la que los pavimentos se encuentran expuestos son muy variados e impredecibles, esto es debido a que obedecen a características propias de cada región en cuanto a altitud, masas de agua y viento. Según la altura en metros sobre el nivel medio del mar, se distinguen tres zonas térmicas de acuerdo al promedio de la temperatura ambiente a lo largo del año, las cuales son: De 0 a 800 metros, promedio de temperatura disminuyendo con la altura de 27 a 22 ° C en las planicies costeras y de 28 a 22 ° C en las planicies internas; De 800 a 1200 metros, promedio de temperatura disminuyendo con la altura de 22 a 20 ° C en las planicies altas y de 21 a 19 ° C en las faldas de montañas; De 1200 a 2700 metros, de 20 a 16 ° C en planicies altas y valles, de 21 a 19° C en faldas de montañas y de 16 a 10 ° C en valles y hondonadas sobre 1800 metros. La mayor elevación de El Salvador se encuentra en el Pital, departamento de Chalatenango, con 2700 metros<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Clima en El Salvador, MARN

Por lo que es muy importante tomar en cuenta las características ambientales, para hablar de cómo estas influyen y/o contribuyen en el comportamiento de la vida de los pavimentos.

El daño por humedad de las mezclas asfálticas es uno de los principales daños que se presenta en los pavimentos flexibles, lo que se traduce en la producción de altos costos para la realización de las respectivas acciones de mantenimiento y reparaciones.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- ✓ Elaborar el diseño de mezcla asfáltica en caliente con cal hidratada para el mejoramiento de la resistencia a la humedad.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Realizar los ensayos correspondientes a los agregados pétreos y al cemento asfáltico siguiendo las respectivas normas para determinar su calidad en el diseño.
- ✓ Determinar la proporción de los agregados pétreos por el método Bailey que conformaran la combinación granulométrica de nuestro diseño de mezcla asfáltica en caliente.
- ✓ Aplicar la metodología de diseño Marshall, siguiendo la norma AASHTO T-245, (Resistencia a la fluencia plástica de mezclas bituminosas usando

el aparato Marshall), para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente y el proceso de elaboración de briquetas, obteniendo el porcentaje óptimo de asfalto.

- ✓ Elaborar un diseño Marshall con el porcentaje óptimo de asfalto incorporando porcentajes de cal hidratada, en base al peso de los agregados pétreos.
- ✓ Obtener la resistencia a la compactación de mezcla asfáltica en caliente debido al daño inducido por la humedad, basado en la norma AASHTO T283 para cada porcentaje de cal hidratada.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

### **ALCANCES**

- ✓ Se realizará el diseño de la mezcla asfáltica en caliente utilizando el método Marshall.
- ✓ Los ensayos para agregados pétreos, cemento asfáltico y mezcla asfáltica se realizarán conforme a normas AASHTO o ASTM.
- ✓ El diseño de la mezcla asfáltica en caliente será a nivel de laboratorio.
- ✓ No se realizará tramo de prueba.

### **LIMITACIONES.**

- ✓ El tipo de cemento asfáltico, agregados pétreos y cal hidratada que se utilizara en el diseño de la mezcla asfáltica se limitará al proporcionado por la empresa Constructora DISA S.A. de C.V.
- ✓ Los ensayos correspondientes se realizarán con el equipo disponible en los laboratorios “Ing. Mario Ángel Urbina” en la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador y planta asfáltica de la empresa Constructora DISA S.A. de C.V. ubicada en Quezaltepeque.
- ✓ El uso de los laboratorios estará restringido a la disponibilidad de los horarios, espacio disponible y materiales.

### **JUSTIFICACIÓN**

Actualmente nuestro país no cuenta con estudios que cuantifiquen los aportes que la cal hidratada puede proporcionar a la mezcla asfáltica en caliente, cuando esta es adicionada como sustituyente o como un porcentaje del fino. Es importante tener conocimientos de esta alternativa de diseño, ya que tiene ventajas según documentación bibliográfica, y experiencias de otros países en el aumento de resistencia a la humedad.

El objetivo de utilizar cal hidratada como variante en un diseño de mezcla asfáltica en caliente es el aumento en la resistencia a la humedad, y esto en nuestro país con precipitaciones históricas medias anuales de 1869mm,

correspondientes a los años 1981-2010 y 1901 mm para el año 2014<sup>2</sup>, significa una contribución que debe aprovecharse para el mejoramiento de las capas de rodadura.

Es así como se propone la utilización de cal hidratada como material componente de la mezcla asfáltica en caliente, para controlar los daños ocasionados por la humedad e intentando mejorar algunas propiedades mecánicas de las mismas, redundando en una mejor utilización de las herramientas de los pavimentos, obteniendo así materiales más durables, reduciendo el costo en el mantenimiento de los pavimentos asfálticos elaborados con mezclas asfálticas en caliente.

---

<sup>2</sup> Perspectiva de lluvias mayo-agosto 2015. Por: Centro de predicción climática/ GM/DOA. MARN

**CAPÍTULO II.**

**“AGREGADOS**

**PÉTREOS, CEMENTO**

**ASFÁLTICO, CLIMA DE**

**EL SALVADOR Y CAL**

**HIDRATADA”**

## **2.1 IMPORTANCIA DEL AGREGADO PÉTREO EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA.**

La calidad de la mezcla asfáltica en caliente producida es tan buena como la calidad de los materiales usados en la producción. En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables, los agregados pétreos y el asfalto, para nuestro caso se usará asfalto normal (tipo AC-30) sin aditivos; los agregados son importantes porque una mezcla asfáltica posee, el 90% y el 95%<sup>3</sup> en peso, y entre el 75% y 85% en volumen, de la mayoría de estructuras de pavimento; la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica. El control de la calidad del agregado usado es un factor crítico en el comportamiento de una carpeta de concreto asfáltico, sin embargo, además de la calidad se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación, estos criterios incluyen el costo, la disponibilidad del agregado su origen y además, deberá cumplir con ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad.

---

<sup>3</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 2.4, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992

✓ **Definición de agregado pétreo.**

Agregado pétreo, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente.<sup>1</sup>

Los agregados utilizados para este trabajo de graduación serán los proporcionados de la planta asfáltica de la Constructora DISA S.A de C.V, ubicada en Quezaltepeque y consisten en grava TMN 19 mm (3/4”), grava cero y arena triturada.

**2.2 ACOPIO DE AGREGADO PÉTREO.**

Para producir mezclas asfálticas en caliente de alta calidad es esencial tener buenos procedimientos de acopio de reservas. Los agregados pétreos retienen su graduación si son adecuadamente acopiados. Cuando el acopio es malo, las partículas de agregado se segregan (separan por tamaño), y la graduación varía en los diferentes niveles del acopio.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 2.4.C, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.



*Figura 2.1 Acopios de DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.  
Fuente: Planta asfáltica DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Septiembre 2016.*

### **2.3 IMPORTANCIA DEL MUESTREO Y REDUCCIÓN DE AGREGADO PÉTREO.**

#### **✓ Importancia del muestreo de agregado pétreo.**

La muestra seleccionada debe ser verdaderamente representativa de todo el agregado para que los resultados de los ensayos sean confiables<sup>5</sup>. Es muy importante por lo tanto, tener técnicas apropiadas de muestreo.

En la norma AASHTO T-2 (Muestreo de Agregados) se describen los diferentes procedimientos para el muestreo.

#### **✓ Importancia de la reducción de agregado pétreo.**

Después que se ha realizado el muestreo en campo para realizar cualquier ensayo es necesario hacer una reducción del material que se ha muestreado a un tamaño de muestra suficiente para realizar dicho ensayo, éste proceso de reducción de muestra de campo a muestra de ensayo es necesario realizarlo con el equipo y procedimientos adecuados para poder garantizar que una muestra de unos cuantos gramos presentará las mismas características y

<sup>5</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 2.4.C.4, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

propiedades del agregado en bruto al cual representa<sup>3</sup>. La norma ASSHTO T248 (Reducción de Muestras de Agregado a Tamaño de Ensayo), establece los lineamientos básicos para la reducción de agregados. En la **figura 2.2** se observa uno de los procedimientos establecidos para la reducción de muestras según AASHTO T284.



*Figura 2.2: Cuarteo manual de agregados pétreos.  
Fuente: Planta asfáltica DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque.*

## **2.4 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS QUE SE UTILIZAN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (M.A.C).**

### **❖ Graduación.**

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones.<sup>6</sup> La graduación que utilizaremos en el diseño es tomada del

---

<sup>6</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 2.4.D.1, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

resultado de la granulometría BAILEY el cual corresponde a grava TMN 19mm (3/4") 48% y grava "0" 52%.

#### ❖ **Tamaño máximo de partícula.**

Se determina de acuerdo a la Norma ASTM C-136(Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales). Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

- ✓ Tamaño máximo nominal de partícula, designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 por ciento de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

Nuestro tamaño máximo nominal es 19mm (3/4").

- ✓ Tamaño máximo de partícula, designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregado.<sup>4</sup>

El tamaño máximo de los agregados pétreos utilizados es de 1/2"

#### ❖ **Limpieza.**

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables en el agregado como lo son: vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, entre otros.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 2.4.D.4, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

El material proporcionado por la empresa constructora DISA S.A de C.V, estaba libre de impurezas orgánicas, arcilla o algún otro contaminante que pudiera afectar el diseño de la MAC, ya que sus acopios de agregados pétreos se encuentran debidamente cubiertos y drenados.

❖ **Dureza.**

En el Manual de Series 22 del Instituto del Asfalto (MS-22), define que los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación, y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento.<sup>8</sup>

Una manera de medir la dureza del agregado es el método de ensayo para abrasión e impacto en la máquina de los ángeles basado en la norma AASHTO T-96

El porcentaje de desgaste del agregado grueso TMN 19mm (3/4") obtenido es del 13%.

❖ **Forma de la partícula.**

El Manual de Series 22 del Instituto del Asfalto (MS-22), define que la forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla asfáltica en caliente durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla

---

<sup>8</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 2.4.D.4, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.<sup>9</sup>

La forma de los agregados pétreos utilizados en el presente trabajo es angulosa y áspera.

## **2.5 ESPECIFICACIONES PARA AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (M.A.C.)**

**Especificaciones.** Son todas las normativas, disposiciones y requisitos, relativos a la ejecución de la obra.<sup>10</sup>

**Especificaciones especiales:** Son el complemento y/o revisión de las especificaciones generales, que abarcan las condiciones peculiares de una obra individual.<sup>9</sup>

**Especificaciones técnicas:** Son aquellas que se utilizan para establecer los requisitos de calidad de los materiales pétreos que son utilizados para la elaboración del esqueleto de una carpeta asfáltica.

### **❖ Requisitos que deben cumplir los agregados gruesos.**

**Agregados gruesos:** Es el retenido en la malla de 4.75 milímetros. Este material debe consistir en piedra o grava de buena calidad triturada y mezclada

---

<sup>9</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 2.4.D.5, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

<sup>10</sup> Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, Edición 2004, sección 101.04.

de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados en la **Tabla 2.1** y que además llene los requisitos de la **tabla 2.2**.<sup>11</sup>

**TABLA 2.1. REQUISITOS DEL AGREGADO GRUESO**

<b>REQUISITOS</b>	
(1) Abrasión de los Ángeles, AASHTO T 96	40% máx.
(2) Disgregabilidad (sanidad) en sulfato de sodio(5 ciclos), AASHTO T 104	12% máx.
(3) Caras fracturadas, FLH T 507	75% min.
(4) Índice durabilidad (agregado grueso) AASHTO T 210	35% min.

**Fuente: Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, Edición 2004, apartado 703.07**

---

<sup>11</sup> Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, Edición 2004, sección 703.07

**TABLA 2.2. RANGOS REQUERIDOS, GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS  
PARA CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE**

Malla  Mm	Porcentaje por peso que pasa la malla estándar (AASHTO T 27 Y AASHTO T 11)					
	Designación de la Granulometría					
	A	B	C	D	E	F
37.5	100	-	-	-	-	-
25	97-100	100	100	-	-	-
19	-	97-100	97-100	100	100	-
12.5	-	76-88(±5)	* (±5)	97-100	97-100	-
9.5	53-70(±6)	-	* (±6)	-	* (±5)	100
4.75	40-52(±6)	49-59(±7)	* (±7)	57-69(±6)	* (±6)	33-47(±6)
2.36	25-39(±4)	36-45(±5)	* (±5)	41-49(±6)	* (±6)	7-13(±4)
600 µm	12-22(±4)	20-28(±4)	* (±4)	22-30(±4)	* (±4)	-
300 µm	8-16(±3)	13-21(±3)	* (±3)	13-21(±3)	* (±3)	-
75 µm	3-8(±2)	3-7(±2)	3-8(±2)	3-8(±2)	3-8(±2)	2-4(±2)

**Notas:** \* El Contratante especifica el valor del rango y límites.

() Desviación permisible

(±) del rango de valores.

**Fuente:** Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, Edición 2004, tabla 703-8

## 2.6 ASFALTO.

El asfalto usado en pavimentación, es un material viscoso y pegajoso. Que se adhiere fácilmente a las partículas de los agregados pétreos y por lo tanto, es

un excelente cemento para unir partículas de agregados pétreos en un pavimento de mezcla en caliente.<sup>12</sup>

## **2.7 CUALIDADES Y CLASIFICACIÓN DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS.**

### **❖ CUALIDADES**

**Ligante Asfáltico:** Término genérico aplicado a cualquier material adhesivo conteniendo asfalto.

Las cualidades de los asfaltos que los hacen tan importantes en el campo de construcción y mantenimiento de vías de comunicación son las siguientes:

- Poder Aglomerante.
- Agente Estabilizante
- Agente Impermeabilizante.
- Manejabilidad.
- Resistencia a los Agentes Atmosféricos.<sup>13</sup>

### **❖ CLASIFICACIÓN**

El Comité Europeo de Normalización (Terminology of Bituminous Binders), establece la siguiente clasificación.

#### **✓ Ligante asfáltico.**

---

<sup>12</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 2.3, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

<sup>13</sup> Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista, Alejandro Padilla Rodríguez, año 2004.

Término genérico aplicado a cualquier material adhesivo conteniendo asfalto.

- Asfaltos para pavimentación.
- Asfaltos industriales.
- Asfaltos fluidificados o “cut back”.
- Asfaltos fluxados.
- Asfaltos modificados.
- Emulsión de Asfalto.<sup>14</sup>

## **2.8 ENSAYOS REALIZADOS AL ASFALTO PARA DETERMINAR SUS PROPIEDADES.**

### ➤ **Muestreo de materiales bituminosos.**

Basado en norma AASHTO: T 40-02 (2012) (ASTM: D 140 – 00).

### ➤ **Ensayo de punto de ablandamiento del asfalto (método del anillo y la esfera).**

Basado en Norma AASHTO: T 53-96 (2008) (ASTM: D 36-95).

### ➤ **Gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos.**

Basado en norma AASHTO: T 228-06 (ASTM: D 70-03).

### ➤ **Penetración de materiales bituminosos.**

Basado en norma AASHTO: T 49-07 (2011) (ASTM: D 5-97).

### ➤ **Punto de flama y llama por la copa abierta de Cleveland.**

---

<sup>14</sup> Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista, Alejandro Padilla Rodríguez, año 2004.

Basado en norma AASHTO: T 48 – 06 (2010) (ASTM: D 92 – 02).

➤ **Viscosidad cinemática de asfaltos.**

Basado en norma AASHTO: T 201-03(2007) (ASTM: D 2170-01).

## **2.9 CLIMA DE EL SALVADOR.**

El área encargada de realizar el monitoreo sobre las condiciones atmosféricas en nuestro país es el Servicio Meteorológico Nacional. El monitoreo y la vigilancia de las situaciones atmosféricas en todo el país consiste, en obtener la información que genera cada una de las estaciones meteorológicas de la Red, (5 estaciones sinópticas entre automáticas y convencionales con una cobertura de 100 kilómetros cada una, 27 estaciones climatológicas convencionales y 72 pluviométricas, éstas últimas registran sólo las precipitaciones y es transmitida por observadores en las estaciones al Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM)). Los productos son emitidos en formatos diferentes entre los cuales tenemos los mapas numéricos meteorológicos de variables como: humedad, viento, precipitación.

El Centro de Predicción Climática (CPC) es donde se elaboran las perspectivas de la lluvia y la temperatura en el país a mediano plazo (3 meses de anticipación) y estacional (6 meses siguientes), monitorea y publica las perspectivas de los índices del Océano Pacífico y Atlántico Norte para vigilancia del ENOS (El Niño Oscilación del Sur), la predicción de fechas de inicio de la época lluviosa, posibilidades de desarrollo, magnitud y fechas de canícula en

Julio y/o agosto, comportamiento de la temporada de huracanes y sus efectos en nuestro país, periodo de finalización de época lluviosa, informes y resúmenes de temperaturas.<sup>15</sup>

### 2.9.1 Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas principales.

➤ **Zona Occidental.**

**TABLA 2.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS PRINCIPALES DE LA ZONA OCCIDENTAL<sup>13</sup>**

<b>Código</b>	<b>Estaciones</b>	<b>Latitud Norte</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>
A-37	Santa Ana, UNICADES	13°58.9´	89°32.9´	685
A-15	Güija	14°13.7´	89°28.7´	485
A-18	Los Andes	13°52.5´	89°38.7´	1770
A-27	Candelaria de la Fronteras	14°07.2´	89°39.1´	700
A-31	Los Planes de Montecristo	14°23.9´	89°21.6´	1971
H-8	Ahuachapán	13°56.6´	89°51.6´	725
H-14	La Hachadura	13°51.6´	90°05.4´	30
T-6	Acajutla	13°34.4´	89°50.0´	15
T-24	Los Naranjos	13°52.5´	89°40.5´	1450

---

<sup>15</sup> *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Boletín Climatológico Mensual, Septiembre 2015, MARN.*

➤ **Zona Central.**

**TABLA 2.4. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS PRINCIPALES DE LA ZONA CENTRAL<sup>13</sup>**

<b>Código</b>	<b>Estaciones</b>	<b>Latitud Norte</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>
G-3	Nueva Concepción	14°07.5´	89°17.4´	320
G-4	La Palma	14°17.5´	89°09.7´	1000
G-13	Las Pilas	14°21.9´	89°05.4´	1960
L-4	San Andrés	13°48.5´	89°24.4´	460
L-27	Chiltiupán	13°35.7´	89°28.9´	680
S-10	Ilopango	13°41.9´	89°07.1´	615

➤ **Zona Paracentral.**

**TABLA 2.5. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS PRINCIPALES DE LA ZONA PARACENTRAL<sup>13</sup>**

<b>Código</b>	<b>Estaciones</b>	<b>Latitud Norte</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>
C-9	Cojutepeque	13°43.2´	88°55.6´	880
V-9	Puente Cuscatlán	13°36.1´	88°35.6´	20
B-1	Chorrera del Guayabo	13°59.8´	88°45.4´	190
B-6	Sensuntepeque	13°52.2´	88°39.0´	650
B-10	Cerrón Grande	13°56.3´	88°47.1´	200

➤ **Zona Oriental.**

**TABLA 2.6. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS PRINCIPALES DE LA ZONA ORIENTAL<sup>13</sup>**

<b>NDO</b>	<b>Estaciones</b>	<b>Latitud Norte</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>
M-24	San Miguel UES	13°26.3´	88°09.5´	117
U-6	Santiago de María	13°29.1´	88°28.3´	920
Z-2	San Francisco de Gotera	13°41.8´	88°05.4´	250
Z-3	Perquín	13°57.5´	88°09.7´	1225
N-2	La Unión, Corsain	13°19.9´	88°52.9´	35

## **2.10 CAL HIDRATADA**

### **¿Qué es la cal hidratada?**

También conocida como Hidróxido de Calcio, es un material resultante de la humectación de la cal viva (óxido de calcio, CaO). El óxido de calcio (CaO) obtenido en la calcinación de la caliza reacciona inmediatamente con el agua, transformándose en hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). Este fenómeno se conoce como hidratación o apagado de la cal viva (CaO). Algunas de sus ventajas son las siguientes:

- ✓ Reduce el daño por humedad y stripping debido a la sensibilidad a la humedad de los agregados pétreos.
- ✓ Reduce el contenido de asfalto de diseño u óptimo.

- ✓ Tiene un mayor poder espesante, particularmente importante para obtener un elevado cuerpo de película de ligante y para mejorar la adherencia.
- ✓ Reduce el envejecimiento del ligante asfáltico.
- ✓ Incrementa la estabilidad y la durabilidad de la mezcla.
- ✓ Transporte sencillo y almacenamiento fácil.
- ✓ Aplicación inmediata.<sup>16</sup>

### **2.10.1 Aplicaciones de la Cal Hidratada.**

#### **Construcción**

- **Infraestructuras:** En estabilización de suelos para mejorar las propiedades de los suelos arcillosos y en mezclas bituminosas en caliente para aumentar su durabilidad.
- **Edificación:** En morteros de cal, encalados, para pintura y decoración, en prefabricados de cal, piedra artificial de cal y bloques de tierra comprimida.

#### **Protección ambiental**

- Tratamiento de aguas potables (potabilización).
- Tratamiento de aguas residuales.

---

<sup>16</sup> Construcción de asfaltos, uso de la cal para modificar el asfalto, ANFACAL(Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A.C), México, D.F, año 2007

- Remineralización de agua desalinizada.
- Depuración de gases.
- Tratamiento de suelos contaminados.<sup>14</sup>

## **2.11 INFLUENCIA DE LA CAL HIDRATADA EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.**

La cal en las mezclas asfálticas se utiliza como mejorador de adherencia entre agregados pétreos y cemento asfáltico.

La cal es un excelente modificador del asfalto reduciendo o eliminando los daños por humedad, además tiene otras propiedades que aún no se han descubierto, por lo que se denomina “modificador multifuncional”.

Si usamos cal como sustituyente del fino, dado su naturaleza químicamente activa, elimina componentes indeseables y hace a la mezcla más resistente a altas temperaturas, lo que implica más resistencia al ahuellamiento.

La cal también logra reducir el índice de envejecimiento, retardando la oxidación del ligante, ya que la cal reacciona con las moléculas altamente polares (extremo con carga positiva y otro con carga negativa) del cemento asfáltico y la resistencia a la fatiga.

---

<sup>14</sup> Construcción de asfaltos, uso de la cal para modificar el asfalto, ANFACAL (Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A.C), México, D.F, año 2007

Cuando los pavimentos están envejeciendo, se agrietan y estos agrietamientos comienzan con la formación de microfisuras, las cuales se van uniendo y forman macrofisuras que dañan al pavimento, al llegar a ésta etapa es muy común que se presenten fallas del tipo “piel de cocodrilo”, provocadas por la incapacidad elástica del asfalto, lo que resulta en fallas mecánicas y en el consiguiente deterioro de la capa por constante fricción con el tráfico del camino, a su vez que las capas inferiores quedan expuestas a la humedad del ambiente. La cal hidratada, logra interceptar las microfisuras y las desvía, y así evita que se hagan grietas grandes y se dañe el pavimento, como es un mineral no se deteriora con los rayos UV, su costo de aplicación es muy bajo y esto es bueno, porque se reducen los costos en los presupuestos y en la ejecución.<sup>17</sup>

La expulsión de los agregados pétreos, es una falla común ya que los asfaltos presentan cargas eléctricas al igual que los agregados, si la cargas predominantes son del mismo signo el agregado es expulsado de la matriz del asfalto y así se deteriora; siendo la cal un anfótero, en química significa dos cargas, calcio positivo y el OH es negativo, al combinarlas permiten la neutralización, evitando así el rechazo del agregado.

La adherencia también es preocupante, entre capas de asfalto viejas y capas nuevas, o las bases y la capa de asfalto, si esto sucede el deterioro será rápido

---

<sup>17</sup> Asociación Europea de la Cal (EULA), Cal hidratada un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos.

debido a la falta de liga en las interfaces, la cal brinda adherencia, en gran medida.<sup>14</sup>

## **2.12 MÉTODOS DE ADICIÓN DE CAL HIDRATADA PARA ASFALTAR.**

- **Método de adición al tambor.**

La cal se añade al tambor junto con los fillers, o se puede mezclar con los demás finos en el grupo de tratamiento.

- **Método de los agregados húmedos.**

Se mojan superficialmente los agregados y se adhiere la cal.

- **Método de la lechada de cal.**

Necesitamos una lechada de cal, se aplica a los agregados en un porcentaje medido.<sup>15</sup>

## **2.13 EXPERIENCIAS EN OTROS PAISES QUE HAN UTILIZADO CAL HIDRATADA EN CARRETERAS.**

Los resultados obtenidos con la Cal han sido tan buenos, que la Asociación Nacional de la Cal en los Estados Unidos, ha determinado que el efecto de adicionar Cal Hidratada a las mezclas asfálticas mejora su módulo dinámico el cual es una propiedad fundamental usada en la evaluación del agrietamiento

---

<sup>14</sup> Construcción de asfaltos, uso de la cal para modificar el asfalto, ANFACAL (Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A.C), México, D.F, año 2007.

<sup>15</sup> Asociación Europea de la Cal (EULA), Cal hidratada un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos.

por fatiga, ahuellamiento y fisuración por efectos térmicos, ya que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo deformación de las mezclas.

La Universidad de Nevada en EE.UU ha concluido una disminución en el costo del ciclo de vida de las carreteras con cal hasta en un 45%, incrementa el rendimiento del pavimento, y aumenta 38% la vida útil.<sup>18</sup>

En Europa, la cal hidratada también se ha utilizado durante muchos años. Recientes investigaciones han establecido que la cal da lugar a múltiples ventajas para las mezclas asfálticas: calientes, templadas y frías, así como para el reciclaje “in-situ” frío. La adición de cal hidratada previene los deterioros prematuros y aumenta la vida del pavimento. Después de años de investigación, algunos países europeos han convertido el uso de la cal hidratada en mezclas asfálticas como obligatorio en sus reglamentos nacionales para sus carreteras locales, nacionales y autopistas.<sup>19</sup>

En España los beneficios más importantes de esta técnica serían los relativos a las deformaciones plásticas y al envejecimiento, que con un costo bajo puede ser una opción interesante para mejorar las características de las mezclas asfálticas.<sup>20</sup>

---

<sup>18</sup> Sebaaly, P.E., Hitti, E., and Weitzel, D. “Effectiveness of lime in Hot-Mix Asphalt Pavements,” Journal of the Transportation Research Board, N° 1832, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2003.

<sup>19</sup> P.C. Hopman, A. Vanelstraete, A. Verhasselt “Active filler as asphalt modifier”, AIPCR/PIARC, Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumen with additives in road pavements, March 1999.

<sup>20</sup> Ventajas del uso de la cal hidratada como aditivo de mezclas bituminosas, 2002.

Proyectos en México donde se ha hecho uso de la cal hidratada son: La Carretera México-Cuernavaca; Proyecto Arco Norte; Periférico D.F, segundo nivel; reparación en México-Puebla; patios de Nissan mexicana en Aguascalientes.<sup>21</sup>

Perú, Bolivia, Colombia, Venezuela, Ecuador, han tenido resultados excelentes en sus carreteras que han incorporado la Cal Hidratada para diseñarlas y para remodelarlas.

---

<sup>21</sup> Construcción de asfaltos, uso de la cal para modificar el asfalto, ANFACAL (Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A.C), México, D.F, año 2007.

**CAPITULO III.**

**“HISTORIA DE LOS  
PAVIMENTOS EN EL  
SALVADOR, MÉTODO  
BAILEY, MÉTODO  
MARSHALL ”**

### **3.1 HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS EN EL SALVADOR**

En 1528 fue fundada la Villa de San Salvador, entonces se hicieron las calles principales reforzadas de piedras, porque se utilizaban carretas y caballos.

En 1905 es creada una oficina bajo el nombre de Cuerpo de Ingenieros Oficiales. A esta oficina le correspondía la Dirección General de Obras Públicas como dependencia directa del Ministerio de Fomento, con la salvedad de que los trabajos de caminos eran realizados por el Ministerio de Gobernación. A este le correspondía la inmediata inspección técnica en la ejecución de todas aquellas obras que sin ser nacionales se auxilien con fondos del tesoro público, asignándole funciones de ejecución y mantenimiento de las obras públicas, así como la construcción y mantenimiento de los edificios destinados al servicio público, y en general, todas las obras de ornato y mejora de las poblaciones de la República, entre otras.

En San Salvador se inició la pavimentación entre 1912 y 1916, los pavimentos fueron de concreto hidráulico, el más representativo es en la avenida Independencia y calle de la finca Modelo, en 1928, con un total de 15,250m<sup>2</sup>.

En 1920 fueron asfaltadas las primeras calles de San Salvador y la mejoría se debía a la llegada del automóvil en 1915, poco después el camión y el autobús.

En 1930 se construye la Carretera Troncal del Norte, desde San Salvador hasta la Frontera con Honduras, en 1939 se construye la Ruta Militar, la cual desde

San Miguel conduce a Santa Rosa de Lima, pasando por El Divisadero y uniendo la carretera Panamericana.<sup>22</sup>

En 1940 el General Maximiliano Hernández Martínez crea el Reglamento para la Construcción, Mantenimiento y Mejoramiento de las Carreteras de la República, en la cual tuvo su apogeo los pavimentos flexibles.

En 1954, la Dirección de Urbanismo y Arquitectura y la Dirección de Caminos, se convierte en Direcciones Generales dentro del Ramo de Obras Públicas. Todos estos cambios son producto de la necesidad de ordenar el crecimiento de las ciudades, tanto en su parte arquitectónica como en infraestructura, por lo cual se le encomiendan las funciones específicas de construir, mantener y rehabilitar la infraestructura urbana y vial del país, en esta última se incluyen las carreteras interurbanas, rurales y urbanas; las cuales se constituyen en uno de los pilares que sostiene la economía nacional.

El Salvador, en la actualidad no tiene alguna carretera que contenga cal hidratada en su diseño.

### **3.2 MÉTODO BAILEY.**

El método de Bailey es un procedimiento que permite seleccionar la granulometría más adecuada para obtener las mejores propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en caliente. Fue desarrollado, en la década de los

---

<sup>22</sup> Historia de la Red Vial de El Salvador, Diplomado de Pavimento Rígidos, Universidad de El Salvador, año 2014

años 80, por Robert Bailey del Departamento de Transporte de Illinois para evaluar el empaquetamiento de los agregados y predecir los vacíos y el rozamiento interno entre ellos. Se trata de un sistema volumétrico de dosificación de agregados basado en el hecho de que las partículas de agregados de mayor tamaño producen o proporcionan vacíos, que son ocupados por las partículas de agregados de menor tamaño, el cemento asfáltico y el aire.<sup>23</sup>

Es un método de selección granulométrica que está directamente relacionado con las características de compactación de cada fracción de los agregados, con los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos de la mezcla (Vv). Selecciona la estructura de los agregados de la mezcla buscando una mayor interacción del agregado grueso y se puede utilizar con cualquier método de dosificación de mezclas de asfalto (Superpave, Marshall, Hveem, etc.)

La granulometría resultante de aplicar el método Bailey permite el intertrabamiento del agregado grueso y una buena compactación de los agregados, con lo cual se proporciona una resistencia a la deformación permanente. Al variar la cantidad de agregados gruesos y finos en la mezcla, los vacíos en el agregado mineral (VMA) pueden cambiar para garantizar una cantidad óptima de asfalto. Por lo que las mezclas seleccionadas por el método

---

<sup>23</sup> Método de Dosificación Bailey. Aplicación a las Mezclas Tipo Stone Mastic Asphalt (SMA).

Bailey pueden tener un esqueleto de agregados con alta estabilidad y un volumen adecuado (VMA) para una buena durabilidad.<sup>24</sup>

En nuestro caso inicialmente poseíamos 3 tipos de agregados los cuales son: grava TMN 19mm ( $\frac{3}{4}$ " ), grava cero y arena triturada, al hacer la granulometría Bailey, obtuvimos un proporcionamiento del 48% correspondiente a grava TMN 19mm ( $\frac{3}{4}$ " ) y el 52% a grava cero, eliminando de nuestro diseño la arena triturada, por lo tanto el diseño se realizara con grava TMN 19mm ( $\frac{3}{4}$ " ) y grava cero.

### **3.2.1 Empaquetamiento de los agregados.**

El empaquetamiento de los agregados por compactación no es total y siempre hay vacíos entre las partículas minerales. El grado de empaquetamiento de los agregados depende de los siguientes factores:<sup>25</sup>

- Tipo y energía de compactación
- Forma de las partículas
- Textura de las partículas
- Resistencia a la fragmentación
- Tamaño de las partículas

### **3.2.2 Agregado grueso y fino.**

En el método Bailey se clasifica y se define el agregado en función de sus características volumétricas y de su rozamiento interno.

---

<sup>24</sup> Análisis de los Parámetros del Método Bailey y su Influencia en la Segregación de Mezclas Densas en Caliente.

<sup>25</sup> Método de Dosificación Bailey, Aplicación a las Mezclas Tipo Stone Mastic Asphalt (SMA).

- ❖ **El Agregado Grueso (CA):** se define como las partículas de mayor tamaño que producen o proporcionan vacíos.
- ❖ **El Agregado Fino (FA):** son las partículas de menor tamaño que rellenan los vacíos.<sup>13</sup>

### 3.2.3 Dosificación de los agregados por volumen.

El agregado grueso, tal como se ha definido anteriormente, proporciona los vacíos que deben rellenarse por medio del agregado fino. Por tanto es necesario determinar los vacíos creados por el agregado grueso que se denominan (**VCA**), para poder llenarlos adecuadamente con el agregado fino.

La mejor forma de evaluar la interacción de los agregados en una mezcla es mediante el empleo de métodos de dosificación volumétricos, pero por sencillez y comodidad los agregados se dosifican en la práctica en peso. Para determinar el volumen de vacíos que proporciona el agregado grueso se debe de determinar el peso volumétrico compactado (**RUW**, Rodded Unit Weight) y el peso volumétrico sin compactar (**LUW**, Loose Unit Weight), según el método AASHTO T-19/ASTM C29.<sup>13</sup>

- ❖ **Peso volumétrico sin compactar del agregado grueso (LUM).**

Es la cantidad de agregado que llena una unidad de volumen especificado y representa el volumen de vacíos cuando las partículas de agregados se ponen justo en contacto sin que se aplique ninguna compactación, tal como se representa en el esquema de la **Figura 3.1.**<sup>13</sup>

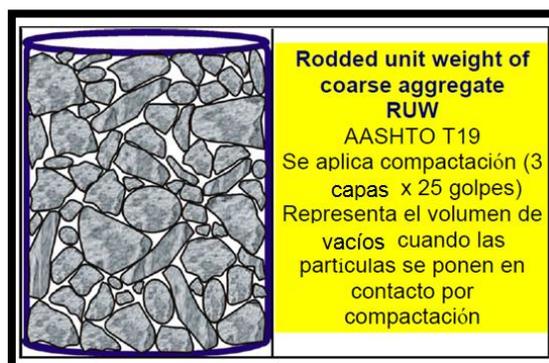


**Figura 3.1: Esquema del Peso Volumétrico sin compactar.**

**Fuente: Método de dosificación Bailey. Aplicación a las mezclas tipo Stone Mastic Asphalt (SMA).**

❖ **Peso volumétrico compactado del agregado grueso (RUM).**

Es la cantidad de agregado que llena una unidad de volumen especificado después de aplicar una energía determinada de compactación. La compactación incrementa el contacto entre las partículas de agregado y disminuye el volumen de vacíos. Este valor representa, por tanto, el volumen de vacíos cuando las partículas de agregado se ponen en contacto por compactación (**Figura 3.2**).<sup>13</sup>



**Figura 3.2: Esquema del Peso Volumétrico compactado.**

**Fuente: Método de dosificación Bailey. Aplicación a las mezclas tipo Stone Mastic Asphalt (SMA).**

El procedimiento descrito en la norma (AASHTO T19) consiste en llenar un recipiente cilíndrico con agregado grueso y determinar su densidad aparente dividiendo la masa por el volumen del recipiente. En el caso del peso volumétrico compactado (RUW) se aplican 3 capas de agregado de igual cantidad que se compactan cada una con 25 golpes mediante una varilla metálica, dicha norma especifica el tamaño del recipiente que se debe emplear en función del tamaño máximo del agregado.<sup>13</sup>

❖ **Peso volumétrico compactado del agregado fino.**

Para determinar el volumen de agregado fino que es necesario para llenar los vacíos proporcionados por el agregado grueso. Se determina siguiendo los lineamientos del procedimiento de la especificación AASHTO T 19.<sup>13</sup>

En el método de Bailey, se definen dos tipos generales de mezclas asfálticas.

1. **Las mezclas gruesas**, que son aquellas que tienen suficiente agregado grueso para que haya contacto entre los agregado y formen un esqueleto mineral.
2. **Las mezclas finas**, que no tienen suficiente agregado grueso para formar un esqueleto mineral y la resistencia se debe fundamentalmente al agregado fino; estas contienen un volumen de agregado fino que excede los vacíos del agregado grueso.

En el método Bailey el diseñador es el responsable de seleccionar el grado de contacto entre el agregado grueso en la mezcla deseada, como un porcentaje del peso volumétrico del agregado grueso. Si el peso volumétrico del agregado grueso elegido en la mezcla es menor que la del peso volumétrico sin compactar LUW no habrá contacto entre el agregado grueso y por lo tanto será una mezcla fina; mientras que si el peso volumétrico del agregado grueso en la mezcla es mayor que la del peso LUW, se tratará de una mezcla gruesa y cuanto mayor sea el peso volumétrico mayor será el contacto entre las partículas de agregado grueso.<sup>13</sup>

En base al porcentaje del peso volumétrico del agregado grueso se pueden dosificar las mezclas asfálticas en (ver **Figura 3.3**):

- ✓ **En las mezclas finas**, el peso CUW de los agregados gruesos en la mezcla debe ser <90% que el peso LUW para que el volumen de agregado fino exceda los vacíos del agregado grueso.
- ✓ **En las mezclas gruesas de tipo denso**, el peso CUW de los agregados gruesos en la mezcla debe estar comprendida entre el 95% y 105% del peso LUW y pueda acomodarse una buena cantidad de agregado fino que densifique la mezcla.
- ✓ **En las mezclas tipo SMA**, el peso volumétrico de los agregados gruesos en la mezcla debe estar comprendida en el rango de 110% y 125% del peso RUW. Estas mezclas contienen un volumen de agregado

fino menor del que se puede alojar en el agregado grueso para proporcionar un buen rozamiento interno y una buena resistencia a las deformaciones plásticas.<sup>13</sup>

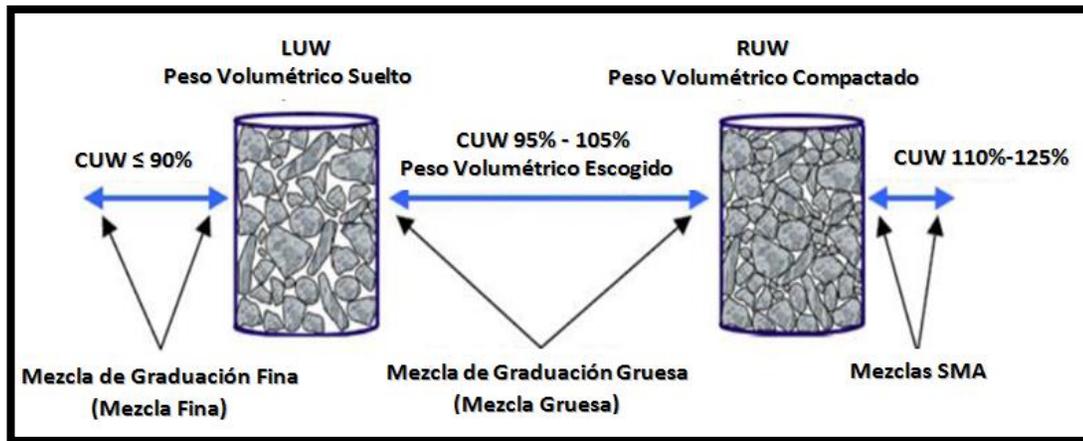


Figura 3.3: Selección de la masa específica escogida para los agregados.  
Fuente: Vavrik.

### 3.2.4 Análisis de la mezcla combinada.

Una vez dosificada la mezcla se analiza su composición mediante tres parámetros.<sup>13</sup>

1. La relación de partículas pequeñas y grandes del agregado grueso (relación **CA**).
2. La relación de arena fina y total del agregado fino (relación **FAc**).
3. La relación de filler y arena fina del agregado fino (relación **FAf**).

#### ❖ Proporción de los agregados gruesos (CA).

La relación de CA describe la distribución de las partículas de agregado grueso y de las partículas de agregado grueso más pequeñas. Esta distribución de

partículas retenido en el PCS determina el número y tamaño de los huecos creados por la fracción gruesa de la mezcla.<sup>26</sup>

❖ **Proporción gruesa de los agregados finos (FAC).**

La relación  $FAC$ , proporciona una comparación de la arena gruesa (material que pasa el PCS) y la arena fina. La fracción de arena gruesa de la mezcla crea huecos dentro de la estructura de agregado grueso que están llenos de arena fina.<sup>14</sup>

❖ **Proporción fina de los agregados finos (FAf).**

La relación  $FAf$  es muy similar a la relación  $FAC$  pero con la parte de las fracciones más finas en la mezcla, ya que define la relación entre el filler y las partículas más finas del agregado fino.<sup>14</sup>

### **3.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLA (ANALIZANDO EL MÉTODO MARSHALL).**

La mezcla asfáltica en caliente que es elaborada en laboratorio, se debe analizar para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así las principales características y la influencia que estas tienen en el comportamiento de dicha mezcla. Las cuatro características son:<sup>27</sup>

1. Densidad de la mezcla.

---

<sup>26</sup> El Manual del Asfalto, MS-4, apartado 4.7 , Asphalt Institute, Séptima Edición, 2007.

<sup>27</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.3, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

2. Vacíos de aire o simplemente vacíos.
3. Vacíos en el agregado mineral.
4. Contenido de asfalto.

### **1) Densidad.**

La densidad se define por el peso unitario. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero.

- ✓ Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua.
- ✓ Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable.

La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) o libras por pie cúbico ( $\text{lb/pe}^3$ ).<sup>28</sup>

### **2) Vacíos de aire.**

Son pequeños espacios de aire o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada. Para capas de base y capas superficiales el porcentaje en las muestras elaboradas en laboratorio

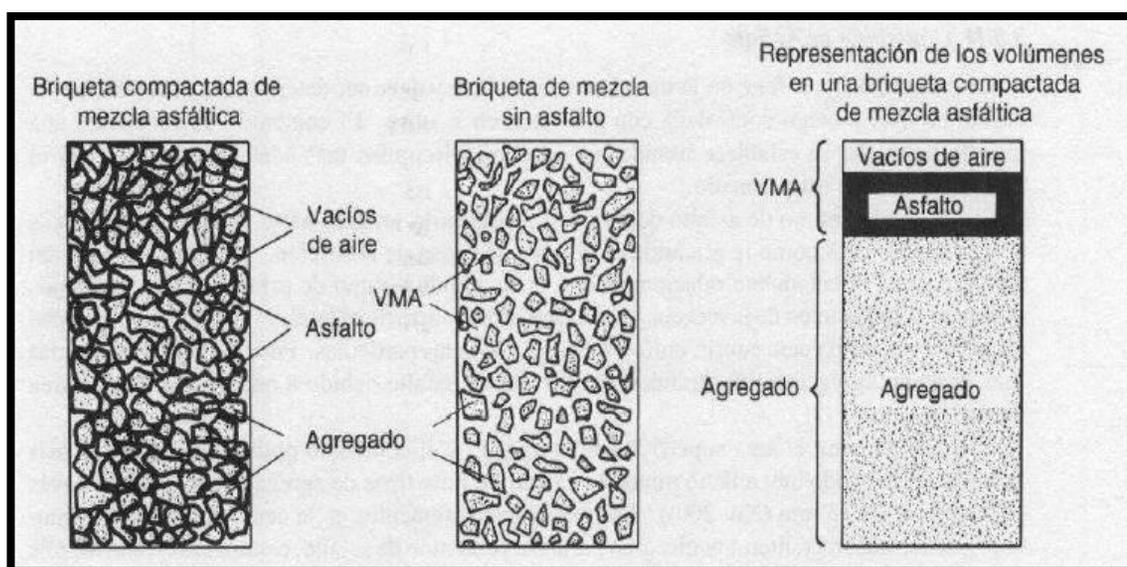
---

<sup>28</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.3.A, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

deben de estar entre 3% y 5%. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.<sup>29</sup>

### 3) Vacíos en el agregado mineral (VMA).

Están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla, en la **Figura 3.4** se ilustra el concepto de VMA.<sup>30</sup>



**Figura 3.4: Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada.**

**Fuente: MS-22, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente.**

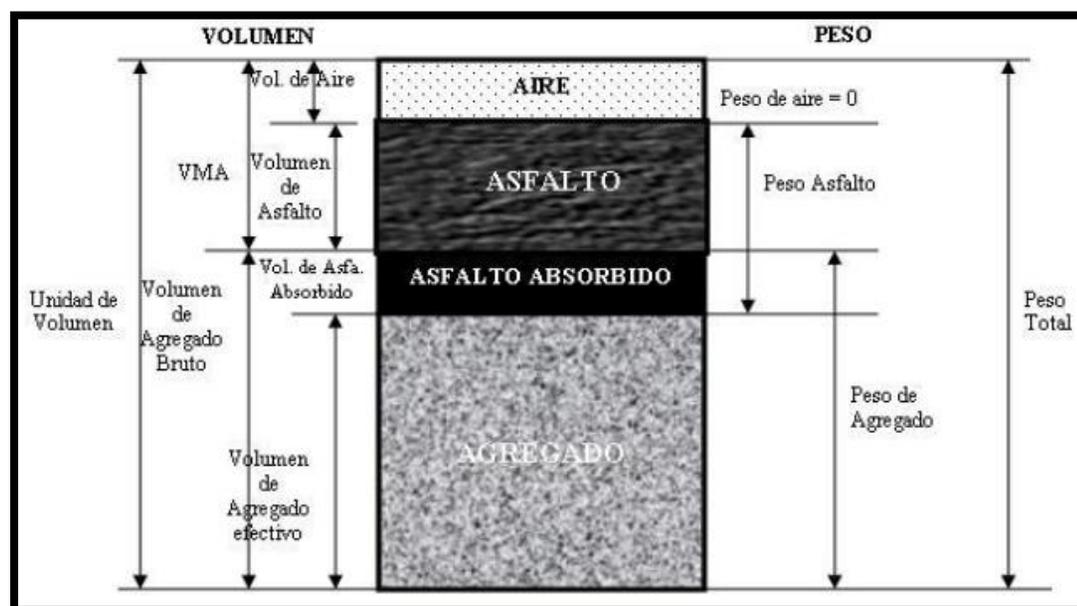
<sup>29</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.3.B, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

<sup>30</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.3.C, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

#### 4) Contenido de asfalto.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. **La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto.** Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas. Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor.

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda.<sup>31</sup>



**Figura 3.5: Diagrama de los componentes de una mezcla asfáltica en caliente.**

**Fuente: Strategic Highway Research Program SHRP A-369, 1994.**

<sup>31</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.3.D, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

### **3.4 MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL.**

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas asfálticas fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi.<sup>32</sup>

#### **❖ Propósito del método.**

El propósito del Método Marshall es determinar el porcentaje óptimo de asfalto para una combinación específica de los agregados, en el presente trabajo el proporcionamiento ha sido obtenido por medio del método Bailey, el cual es grava TMN 19mm ( $\frac{3}{4}$ " ) y grava cero. Una vez obtenido el porcentaje óptimo teórico de asfalto, elaboraremos briquetas y la teórica máxima para dicho porcentaje, se evaluara las características de la mezcla asfáltica en caliente que cumplan con lo establecido en cuanto a: densidades, porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral, entre otros.

### **3.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO MARSHALL.**

El Método Marshall usa muestras normalizadas de prueba (probetas o briquetas) de 64 mm (2.5 pulgadas) de espesor por 102 mm (4 pulgadas) de diámetro. Una serie de probetas, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas

---

<sup>32</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.8.A, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

de agregado. Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del Método Marshall son: un análisis de la relación de vacíos-densidad, y una prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas.<sup>33</sup>

### **3.5.1 Especificaciones de la Metodología.**

Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (**Tabla 3.1**). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.<sup>34</sup>

### **NOTAS**

Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación.

Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60 °C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38 °C, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece

---

<sup>33</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.8.C, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

<sup>34</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.10.E, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas más extremas puede ser necesario usar temperaturas más bajas de ensayo.

**TABLA 3.1 CRITERIOS DEL INSTITUTO DEL ASFALTO PARA EL DISEÑO MARSHALL.**

Criterios para Mezcla del Método Marshall	Transito Liviano Carpeta y Base		Transito Mediano Carpeta y Base		Tránsito Pesado Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, núm. de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75	
Estabilidad, N (lb)	3336 (750)		5338 (1200)	----	8006 (1800)	
Flujo, 0.25 mm (0.01 pulgadas)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de Vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)	Ver tabla 3.2					
Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

**Fuente:** *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla asfáltica en Caliente, MS-22.*

**Clasificaciones del Transito**

- Liviano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño <10,000
- Mediano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño entre 10,000 y 1,000,000
- Pesado Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño > 1,000,000
- Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el tránsito.
- Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

- Cuando se esté calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.<sup>35</sup>

**TABLA 3.2 PORCENTAJE MÍNIMO DE VMA.**

<b>Tamaño Máximo en mm Porcentaje</b>		<b>VMA mínimo, por ciento</b>		
		<b>Vacíos de Diseño, por ciento</b>		
mm	In	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	½	13.0	14.0	15.0
19.0	¾	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

**Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla asfáltica en Caliente, MS-22.**

Especificación Normal para Tamaño de Tamices usados en Pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del material.

Interpolar el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están listados.<sup>36</sup>

### **3.6 EVALUACION Y AJUSTES DE UNA MEZCLA DE DISEÑO.**

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es frecuentemente necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los

<sup>35</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, figura 3.19(Criterios del Instituto del Asfalto(U.S.A.) para el Diseño Marshall), Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

<sup>36</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, figura 3.20(porcentaje mínimo de VMA), Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

criterios de diseño. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación de agregado dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora.

Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones.<sup>37</sup>

### **3.7 LINEAMIENTOS GENERALES PARA AJUSTAR LAS MEZCLAS DE PRUEBA.**

#### **3.7.1 Bajo Contenido de vacíos, baja estabilidad.**

El nivel de vacíos puede aumentarse de varias maneras.

- ✓ Aumentar el VMA mediante la adición de agregado grueso o la reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.
- ✓ Aumentar la cantidad de vacíos es disminuir el contenido de asfalto. Esto puede hacerse solamente si hay exceso de asfalto en la mezcla y si no se reduce el contenido de asfalto por debajo del límite donde el espesor de la película, y eventualmente la durabilidad del pavimento, se encuentra en un nivel aceptable. Demasiada reducción en el contenido

---

<sup>37</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.5, AsphaltInstitute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad.<sup>38</sup>

Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable el agregado tendrá que cambiarse.

### **3.7.2 Bajo contenido de vacíos, estabilidad satisfactoria.**

Un contenido bajo de vacíos puede causar exudación después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo determinado de tiempo. Un contenido insuficiente de vacíos también puede resultaren inestabilidad y exudación cuando ocurre degradación en el agregado.

Por estas razones, las mezclas con contenidos bajos de vacíos deben ser modificadas usando uno de los métodos descritos anteriormente, aun cuando la estabilidad sea satisfactoria.<sup>39</sup>

### **3.7.3 Contenido satisfactorio de vacíos, baja estabilidad.**

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos

---

<sup>38</sup> Aspecto del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Por: Sergio Alonso Romero, 2004.

<sup>39</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.5.B, AsphaltInstitute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.<sup>40</sup>

#### **3.7.4 Contenido alto de vacíos, estabilidad satisfactoria.**

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.<sup>41</sup>

#### **3.7.5 Contenido alto de vacíos, baja estabilidad.**

Cuando el contenido de vacíos es alto y la estabilidad es baja, el contenido de vacíos debe ser disminuido. Si esta modificación no mejora ni el contenido de vacíos o la estabilidad, entonces se debe revisar el tipo de agregado usado de acuerdo a lo descrito en el numeral 3.7.1.<sup>42</sup>

---

<sup>40</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.5.C, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

<sup>41</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.5.D, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

<sup>42</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.5.E, Asphalt Institute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

### **3.8 ENSAYOS REALIZADOS A LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA.**

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer sus características volumétricas y mecánicas.

#### **3.8.1 Determinación de la gravedad específica bulk.**

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se desarrolla de acuerdo con la Norma AASHTO T-166, Gravedad específica bulk de mezclas asfálticas en caliente compactadas utilizando especímenes superficialmente seco; o AASHTO T-275, gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas usando especímenes cubiertos con parafina.<sup>43</sup>

#### **3.8.2 Ensayo de estabilidad y flujo.**

La prueba de estabilidad y flujo se describe en la Norma AASHTO T-245, “Resistencia de mezclas bituminosas al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall” y está dirigida a medir la resistencia de la deformación de la mezcla.

- ✓ El número total de Newton (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

---

<sup>43</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.9.B.1, AsphaltInstitute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

- ✓ La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm (1/100 “) será el valor del flujo Marshall.<sup>44</sup>

### **3.8.3 Análisis de densidad y vacíos.**

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

#### ➤ *Análisis de Vacíos*

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos)..

#### ➤ *Análisis de VMA*

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

#### ➤ *Análisis de VFA*

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El

---

<sup>44</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartados 3.9.B.2, 3.9.B.3 y 3.9.B.4, AsphaltInstitute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire del VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje.<sup>45</sup>

---

<sup>45</sup> Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS-22, apartado 3.9.B.5, AsphaltInstitute, Lexington, KY 40512-4052, U.S.A. 1992.

**CAPITULO IV.**

**“DISEÑO DE MEZCLA**

**ASFÁLTICA EN**

**CALIENTE CON CAL**

**HIDRATADA”**

#### **4.1 ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS AL ASFALTO.**

Los ensayos al asfalto son importantes para conocer algunas de sus propiedades físicas. En este trabajo se utilizó el asfalto AC-30 y los más representativos son los siguientes.

**Método de prueba estándar para la inflamación y combustión por la copa abierta de Cleveland.**

**Basado en norma AASHTO T 48 - 06 y ASTM D 92 – 02**

El ensayo de flama y llama sirve para identificar la temperatura máxima a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado, sin temor a que se inflame.

**Viscosidad cinemática del asfalto.**

**Basado en norma AASHTO T 201 –03 y ASTM D 2170-01.**

Los asfaltos son clasificados según su viscosidad, este ensayo nos brinda la viscosidad del asfalto a una temperatura de 60°C, la cual es la más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio, y la viscosidad a una temperatura de 135°C, la cual se utiliza para mezclar y colocar la mezcla asfáltica.

**Penetración de materiales bituminosos.****Basado en norma AASHTO T 49-07 y ASTM: D 5-97.**

El ensayo de penetración mide la consistencia del asfalto. La medida de la penetración es la longitud que penetró la aguja en el cemento asfáltico en unidades de 0.1mm.

**Punto de ablandamiento del asfalto.****Basado en norma AASHTO T 53-96 y ASTM D 36-95.**

El objetivo de este ensayo es la determinación de la temperatura a la que el asfalto se ablanda.

**Gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos.****Basado en norma AASHTO T 228-06 y ASTM D 70-03.**

El objetivo de este ensayo es conocer el peso específico del asfalto, porque es útil para hacer las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas.

En la **tabla 4.1** se muestran los resultados de laboratorio realizados al asfalto AC-30.

**TABLA 4.1 RESULTADOS DE LOS LABORATORIOS REALIZADOS AL ASFALTO**

ENSAYOS	RESULTADOS
Ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AASHTO T-53 y ASTM D-36	58°C
Penetración de materiales bituminosos AASHTO T-49 y ASTM D-5	50 1/10mm, mínimo
Viscosidad cinemática de asfaltos AASHTO T-201 y ASTM D-2170	519.9mm <sup>2</sup> /s (350mm <sup>2</sup> /s, mínimo)

#### **4.2 ENSAYOS DE LABORATORIOS DE LOS AGREGADOS.**

**Análisis por tamizado de agregados gruesos y finos.**

**Norma AASHTO: T 27 y ASTM C 136.**

La granulometría de las partículas es determinada por un análisis efectuado sobre las muestras de agregado, dicho análisis se realiza por una serie de tamices de diversos tamaños.

**Gravedad específica y absorción de agregado fino.****Basado en norma AASHTO T 84 y ASTM C 128.**

Se deja la muestra en agua durante  $24 \pm 4$  horas a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , estando totalmente seco, se llena el molde y se apisona 25 veces. Cuando se cae el agregado al quitar el molde cónico es porque ha alcanzado la condición saturada superficialmente seco.

Se llena parcialmente con agua el picnómetro, luego se toma una muestra de  $500 \pm 10$  gramos del agregado para envasarla en el picnómetro y por último se llena con agua hasta en un 90% de su capacidad. Se hace girar el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire posibles. Se procede a cuantificar el peso del picnómetro en la balanza anotando su respectivo valor. Al pesar el picnómetro, se deja en el horno la muestra hasta llegar a su masa constante, las muestras se enfrían a temperatura ambiente y luego se pesan y se determina la masa y se cuantifica su valor.

**Gravedad específica y absorción de agregado grueso.****Basado en norma AASHTO T 85 y ASTM C 127.**

Los agregados son usados a masa constante, por lo tanto se secan en el horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , después se dejan enfriando a temperatura ambiente, se sumergen en agua entre 15 a 19 horas hasta llenar esencialmente los poros en las

partículas. Entonces se remueven del agua, para secar el agua superficial de las partículas, y pesar. Seguidamente se toma la muestra y se pesa mientras se sumerge en agua. Finalmente las muestras son secadas en el horno y pesada por tercera vez. Teniendo la masa y peso, es posible calcular la gravedad específica seca, superficialmente seca y aparente, y después la absorción.

### **Método de ensayo para abrasión e impacto en la máquina de los ángeles.**

#### **Basado en norma AASHTO T 96 y ASTM C 131.**

Este método sirve para evaluar el desgaste a la abrasión que sufre el agregado grueso.

Usando el método B debido a nuestro tamaño máximo, pesamos  $5000 \pm 10$  gramos, se colocan en la máquina de los ángeles las 11 esferas, para este método, y luego el agregado, el número de vueltas dentro de la maquina es de 30 a 33rev/ min para 500 revoluciones, se saca el material y se tamiza por la malla 12, la diferencia entre la masa original menos la masa final de la muestra de ensayo, es el porcentaje en perdida.

### **Densidad y vacíos en los agregados.**

#### **Basado en norma AASHTO T 19 y ASTM C-29.**

Se utiliza para determinar el peso volumétrico del agregado, compactado o suelto, y el cálculo de vacíos entre partículas de agregado fino, grueso o

mezclas de ellos. No es aplicable a agregados que no excedan un tamaño máximo nominal de 125mm.

En la **tabla 4.2** se muestra en resumen los resultados de los ensayos de los agregados grueso y fino, ver ensayos completos en anexos.

**TABLA 4.2 RESULTADOS DE LOS LABORATORIOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PÉTREOS.**

Ensayo	Resultados		
	Grava Cero	Arena Triturada	Grava 3/4
<b>Granulometría</b> ASTM C-136 AASHTO T-11	Ver anexos 1, 2 y 3.		
<b>Peso específico y absorción</b> ASTM C-137 AASHTO T-85			
Peso específico seco	2.495	2.468	2.720
% Absorción	1.87	2.880	1.453
<b>Desgaste</b> ASTM C-131 AASHTO T-96	---	---	13%
<b>Pesos volumétricos</b> ASTM C-29 AASHTO T-19			
Peso volumétrico suelto kg/m <sup>3</sup>	1530	1560	1450
Peso volumétrico varillado kg/m <sup>3</sup>	1730	1760	1640

### 4.3 METODO BAILEY

La utilización del método Bailey requiere como datos de entrada las granulometrías individuales de los agregados pétreos, el peso volumétrico compactado y sin compactar y la gravedad específica Bulk.

Para nuestro caso inicialmente tenemos los agregados:

- Grava "0"
- Grava TMN 19mm (3/4")
- Arena triturada

Después de introducir los datos correspondientes a cada agregado en la hoja de cálculo BAYLEY se obtiene que para asegurar el mejor empaquetamiento de los agregados no es necesaria la utilización de arena triturada; por ende el porcentaje de los agregados a utilizar es: 48% grava TMN 19mm (3/4") y 52% grava "cero".

El diseño granulométrico que se hizo para el trabajo de graduación por el método Bailey, se realizó de acuerdo a los parámetros establecidos para una mezcla fina, con una CA LUW igual a 75%, y cumpliendo con los parámetros de CA ratio, FAc ratio y Faf ratio establecidos en la **tabla 4.3**.

### TABLA 4.3 COMPOSICION GRANULOMETRICA BAILEY



**Heritage Research Group**

7901 W Morris Street • Indianapolis, IN 46231 U.S.A.  
317-243-0811 • 486-2985 (FAX)

Design Date: DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE CON CAL HIDRATADADE TAMAÑO MAXIMO NOMINAL DE 3/4 "

Mix Producer Name: PLANTA ASFALTICA CONSTRUCTORA DISA S.A de C.V

Mixture Name/Code: MAC T.M.N 3/4"

Aggregate	#1-CA	#2-CA	#3-CA	#4-CA	#1-FA	#2-FA	#3-FA	#4-FA	MF	RAP	AC
Code	3/4"	1/2"			A.T						
Source id	LA CANTERA	LA CANTERA			LA CANTERA					RAP-1	
Name	GRAVA	GRAVA			A.T					RAP	
Location	P.ASFALTICA	P.ASFALTICA			P.ASFALTICA					Ames	

**Virgin %'s**

#1-CA	48	#2-CA	0	#3-CA	0	#4-CA	0	#1-FA	0	#2-FA	52	#3-FA	0	#4-FA	0	MF	0	RAP	100	AC	0,0
-------	----	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	----	-------	---	-------	---	----	---	-----	-----	----	-----

Sieve, mm	#1-CA	#2-CA	#3-CA	#4-CA	#1-FA	#2-FA	#3-FA	#4-FA	MF	RAP	Virgin	With RAP
37,5	100,00				100,00	100,00					100,0	0,0
25,0	100,00				100,00	100,00					100,0	0,0
19,0	100,00				100,00	100,00					100,0	0,0
12,5	45,17				100,00	100,00					73,7	0,0
9,5	8,09				100,00	100,00					55,9	0,0
4,75	1,91				92,21	91,74					48,6	0,0
2,36	1,74				67,12	60,51					32,3	0,0
1,18	1,70				46,08	38,37					20,8	0,0
0,600	1,65				32,07	26,26					14,4	0,0
0,300	1,57				21,95	17,64					9,9	0,0
0,150	1,48				15,25	11,88					6,9	0,0
0,075	1,39				10,83	8,12					4,9	0,0

<b>% CA LUW</b>	74,7	<b>% FA RUW</b>	100,0
-----------------	------	-----------------	-------

LUW	1450,0			1560,0	1530,0					RAP AC	3,9
CHOSEN UW	1083,2			1760,0	1730,0			0,0		RAP Gmm	2,462
RUW	1640,0			1760,0	1730,0					RAP Gb	1,040
Bulk Spec Gr	2,720			2,468	2,495						2,605
Apparent Gr	2,832			2,657	2,617						2,705
% Absptn.	1,5			2,9	1,9					RAP Gse	
Loose Voids	46,7			36,8	38,7						
Rodded Voids	39,7			28,7	30,7						

Enter the multiplication factor to be used with the Bulk Specific Gravity of the Aggregates according to the values entered for the Unit Weights (e.g. 62.4 lbs./ft<sup>3</sup> or 1000 kg/m<sup>3</sup>)

1000,0

Desired Blends by VOLUME of VIRGIN Aggregates										Total Volume %'s		
Coarse Agg's	100,0	0,0	0,0		100,0	← MUST TOTAL 100.0%				39,8		
Fine Agg's	→ MUST TOTAL 100.0%					100,0	0,0	100,0			60,2	

Enter the percent passing the 0.075mm sieve desired in the VIRGIN Blend

4,00

**For Fine-Graded mixes, where the % CA LUW (cell D36) is ≤ 90%**

Virgin	
CA	0,165
FA <sub>c</sub>	0,427
FA <sub>f</sub>	0,478
New	
CA	0,707
FA <sub>c</sub>	0,478
FA <sub>f</sub>	0,493

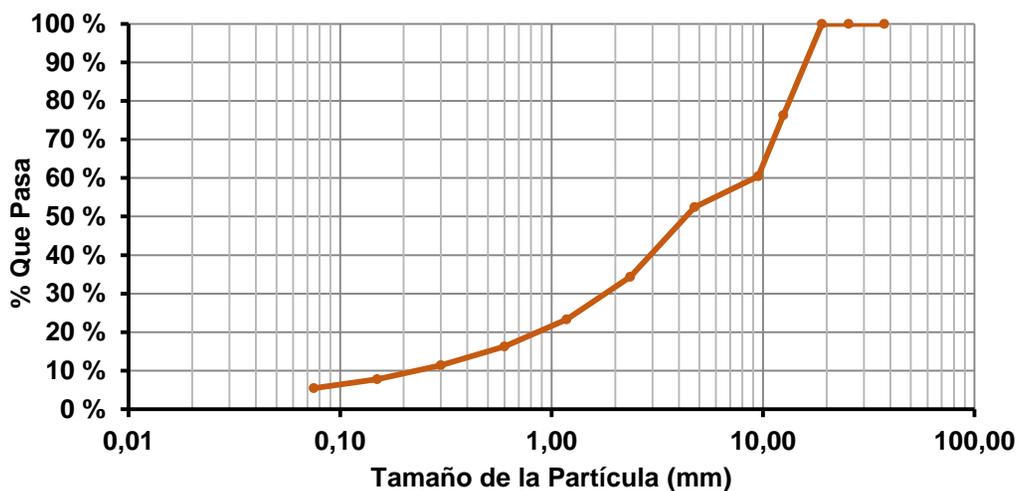
### 4.3.1 Granulometría combinada

La granulometría combina es el resultado de mezclar las proporciones de los agregados obtenidas mediante el método BAILEY las cuales son: 48% grava TMN 19mm (3/4") y 52% grava "cero". Según la norma ASTM C-117 la masa mínima para agregados con tamaño máximo nominal de 19mm (3/4") es de 5000g. Para una muestra total de 5001.6 g tenemos: 2400.77 g de grava TMN 19mm (3/4") y 2600.83 g de grava "Cero. Cada una de estas masas fue muestreada y reducida según la normas ASTM D-75 y ASTM C-702 respectivamente, y los resultados obtenidos se presentan en la **tabla 4.4**.

**TABLA 4.4 GRANULOMETRIA COMBINADA**

Peso Inicial= 5001.60 g			T.M. Nominal =3/4		
MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
NOMBRE	mm				
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
3/4"	19.00	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
1/2"	12.50	1187.40 g	23.74 %	23.74 %	76.26 %
3/8"	9.50	792.10 g	15.84 %	39.58 %	60.42 %
No. 4	4.75	401.00 g	8.02 %	47.59 %	52.41 %
No. 8	2.36	901.30 g	18.02 %	65.62 %	34.38 %
No. 16	1.18	553.20 g	11.06 %	76.68 %	23.32 %
No. 30	0.60	352.20 g	7.04 %	83.72 %	16.28 %
No. 50	0.30	244.90 g	4.90 %	88.61 %	11.39 %
No. 100	0.15	180.30 g	3.60 %	92.22 %	7.78 %
No. 200	0.075	116.90 g	2.34 %	94.56 %	5.44 %
FONDO		272.30 g	5.44 %	100.00 %	0.00 %
TOTALES		5001.60 g	100.00 %		
<b>GRAVA = 47.59 %</b>		<b>ARENA = 46.96 %</b>		<b>FINOS = 5.44 %</b>	

## REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA GRANULOMETRÍA COMBINADA



**Gráfico 4.1** Tamaño de partícula versus porcentaje que pasa

### 4.3.2 Porcentaje de asfalto óptimo teórico<sup>46</sup>

A continuación se muestra la determinación del contenido de asfalto teórico, encontrado en base a los porcentajes del peso retenido y peso pasante en las mallas #8 y #200.

P=	5.4	% Óptimo teórico de asfalto para diseño
a=	65.6	% Retenido en malla #8
b=	28.9	% Pasante en malla #8 y retenido en #200
c=	5.4	% Pasante en #200
K=	0.2	
F=	0.7	

El factor K depende del porcentaje pasante en la malla #200, así tenemos:

<sup>46</sup>Consúltense sección "Método de diseño de mezcla" Capítulo 5, página 56. MS-2 sexta edición, Instituto del Asfalto.

**TABLA 4.5 FACTOR K A UTILIZAR EN EL DISEÑO OPTIMO TEÓRICO.**

<b>Porcentaje que pasa malla #200</b>	<b>Factor K</b>
Entre 11% y 15%	0.15
Entre 6% y 10%	0.18
5% o menor	0.20

El factor F está comprendido entre 0 y 2% basado en la absorción de agregados, pesados o livianos, un valor de 0.7 es sugerido en ausencia de otra información.

Fórmula para porcentaje de asfalto:

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

$$P = 0.035(65.6) + 0.045(28.9) + 0.2(5.44) + 0.7$$

$$P = 5.4 \approx 5.5 \%$$

#### **4.4 DISEÑO MARSHALL**

##### **4.4.1 Puntos de diseño**

En la **tabla 4.6** se muestran los resultados que representan las respectivas cantidades de agregado y asfalto necesarias para realizar la producción de la

mezcla asfáltica de cada uno de los porcentajes de asfalto que contribuirán para el diseño de mezcla en caliente.

El peso de la muestra de asfalto y agregado utilizado para cada uno de los puntos en el diseño de la mezcla asfáltica, fue calculado de acuerdo al porcentaje en masa de cada uno de estos componentes que se encuentra presente en cada una de las briquetas, teniendo como masa para cada briketa aproximadamente 1200 g, adicionando la masa de la mezcla utilizada en el ensayo de la Gravedad Especifica Teórica Máxima, la cual es como mínimo 2500 g, y de la cual se hicieron dos ensayos por cada punto de cemento asfáltico, esto nos hace una masa total de 8600 g. Considerando un desperdicio de 1400g se totalizan 10000 g de materiales mezclados para la producción de la mezcla asfáltica correspondiente a cada porcentaje de cemento asfáltico.

**TABLA 4.6 PROPORCIONAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA EL DISEÑO.**

<b>% de asfalto</b>	<b>Peso total de la muestra (g)</b>	<b>Asfalto (g)</b>	<b>Peso del agregado (g)</b>	<b>Grava TMN ¾" (g) (48%)</b>	<b>Grava cero (g) (52%)</b>
<b>4.5%</b>	10000.00	450.00	9550.00	4584.00	4966.00
<b>5.0%</b>	10000.00	500.00	9500.00	4560.00	4940.00
<b>5.5%</b>	10000.00	550.00	9450.00	4536.00	4914.00
<b>6.0%</b>	10000.00	600.00	9400.00	4512.00	4888.00
<b>6.5%</b>	10000.00	650.00	9350.00	4488.00	4862.00

Cálculos efectuados para la masa total obtenida, para la mezcla asfáltica en cada porcentaje de asfalto utilizado.

Cantidad de mezcla para briquetas= 1200 g/ briqueta X 3 briquetas= 3600 g

Masa total a utilizar en cada porcentaje de cemento asfáltico = Cantidad de mezcla para briquetas + Cantidad de Mezcla para G.E. Teórica Max. = 3600 g + 2500 x 2 g = 8600 g

*Ejemplo de determinación de los pesos de los agregados y asfalto para un contenido de asfalto de 4.5%.*

Se considera un peso total de 10000 g en el que se incluye el Asfalto.

Asfalto =  $10000 (0.045) = 450.00$  gr.

Peso del agregado de acuerdo al porcentaje presente en la mezcla para un 4.5% de cemento asfáltico.

Peso del agregado total =  $10000 (0.955) = 9550.00$  g.

Peso de grava TMN (3/4") y grava Cero para un 4.5% de cemento asfáltico

Peso de grava TMN 19mm (3/4") =  $9550.00 (0.48) = 4584.00$  g.

Peso de grava cero =  $9550.00 (0.52) = 4966.00$  g.

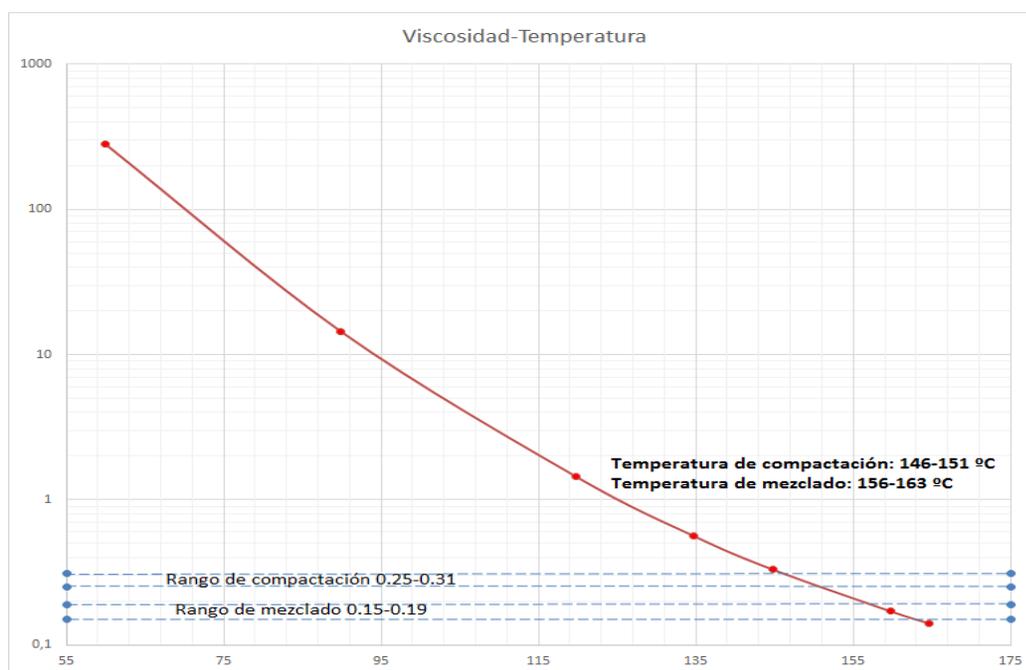
### **TRABAJO DE LABORATORIO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA EN CALIENTE.**

En la dosificación que se realizó, gracias al método Bailey, las proporciones de agregado fueron: Agregado grueso TMN 19mm (3/4") 48%, grava cero 52%. Primeramente se elaboran las briquetas, de acuerdo al procedimiento contemplado en la guía de ensayo basado en AASHTO T 245-97(2008), la cual establece que la temperatura de mezclado para cemento asfáltico es aquella que produce una viscosidad de  $170 \pm 20$  centistoke (cSt), para el cemento asfáltico AC-30 que se ocupó, éste rango de viscosidades se logra con temperaturas de 156 a 163 °C; mientras que las viscosidades para compactación según AASHTO T 245-97(2008) serán de  $280 \pm 30$  (cSt),

alcanzándolas en el cemento asfáltico utilizado en el rango de temperaturas de 146 a 151 °C, los cuales fueron obtenidos de la carta viscosidad-temperatura de la **Grafico 4.2**.

**TABLA 4.7 RANGO DE VISCOSIDAD TEMPERATURA PARA UN CEMENTO ASFALTICO AC-30.**

Punto #	Viscosidad Pa-s	Temperatura °C
1	283	59.9
2	14.4	89.9
3	1.44	119.8
4	0.56	134.8
5	0.33	144.8
6	0.17	159.8
7	0.14	164.7



**Grafico 4.2: Carta de Viscosidad-Temperatura del cemento asfáltico AC-30 (AASHTO T 3381)**

**Fuente: Planta asfáltica DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.**

### Trabajo de laboratorio para dosificación.



**Figura 4.1: Proceso de mezclado de agregados y calentamiento del asfalto.**  
**Fuente: Laboratorio planta asfáltica constructora DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.**



**Figura 4.2 Mezclado de los agregados con el asfalto.**  
**Fuente: Laboratorio planta asfáltica constructora DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.**



**Figura 4.3: Cuarteo de la mezcla asfáltica en caliente.**  
**Fuente: Laboratorio planta asfáltica constructora DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.**

### **Compactación de especímenes.**

- Se calientan el molde limpio con el martillo de compactación, en el horno y la cocina, respectivamente. **(Figura 4.4)**
- Se coloca papel filtro al fondo del molde, antes de introducir la mezcla.
- Se introduce la cantidad dosificada completa en el molde, compactando con una espátula 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en el interior.
- Cuando se alcanza la temperatura de compactación, se coloca en el sujetador de molde y se ejercen 75 golpes con el martillo de compactación con caída libre de 18 pulgadas.
- Se posiciona el molde en posición inversa y se le da el mismo número de golpes.
- Se deja en curado las briquetas hasta que estas se enfríen y se extraen. **(Figura 4.5)**



**Figura 4.4 Calentamiento del equipo de compactación.**

**Fuente: Laboratorio planta asfáltica constructora DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.**



**Figura 4.5 Proceso de compactación de las briquetas.**

**Fuente: Laboratorio planta asfáltica constructora DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.**

El trabajo de laboratorio de las muestras de mezcla asfáltica se realiza a través del procedimiento Marshall, el cual comprende los siguientes ensayos:

- Estabilidad y Flujo (AASHTO T 245-97 (2008)).
- Gravedad Específica Teórica Máxima (AASHTO T 209-12).
- Gravedad Específica Bulk (AASHTO T 166-10).

#### 4.4.2 Gravedad específica teórica máxima y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación.

Basado en norma: AASHTO T 209-05

**TABLA 4.8 RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA.**

<b>% Cemento Asfáltico</b>	<b>4.5</b>	<b>5.0</b>	<b>5.5</b>	<b>6.0</b>	<b>6.5</b>
$W_{\text{inicial}}$ (g)	2504.50	2556.20	2512.50	2519.80	2535.20
$W_{\text{Picnómetro+Agua}}$ (g)	11772.20	11772.20	11772.20	11772.20	11772.20
$W_{\text{Antes del Ensayo}}$ (g)	14276.70	14.328.40	14284.70	14292.00	14307.40
$W_{\text{Después del Ensayo}}$ (g)	13265.80	13.289.90	13256.80	13257.00	13251.50
$W_{\text{antes}} - W_{\text{Después}}$ (g)	1010.90	1.038.50	1027.90	1035.00	1055.90
G.E. Teórica Máxima	2.477	2.461	2.444	2.435	2.401

El ejemplo de cálculo considerando los valores para un 4.5% de contenido de asfalto, es el siguiente:

$$G_{EB} = \frac{W_{inicial}}{W_{inicial} + W_{picnometro+agua} - W_{despues\ del\ ensayo}}$$

$$G_{T.M.} = \frac{2504.50}{2504.50 + 11772.20 - 13265.80} = 2.477$$

**4.4.3 Gravedad específica Bulk de mezclas asfálticas en caliente compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos.**

Basado en norma: ASSHTO T 166-05

**TABLA 4.9 RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.**

% De asfalto	4.50%			5.00%			5.50%			6.00%			6.50%		
Nº Probeta	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$W_{al\ Aire}$ (g)	1109. 1	1144. 6	1161. 6	1167. 7	1170. 6	1171. 6	1153. 4	1165. 3	1163. 1	1162. 4	1164. 4	1151. 4	1158. 0	1158. 2	1161. 5
$W_{SSS}$ (g)	1128. 6	1162. 4	1182. 8	1170. 1	1173. 9	1176. 0	1156. 0	1166. 3	1163. 9	1163. 6	1165. 0	1151. 6	1158. 1	1158. 2	1161. 8
$W_{sumergido}$ (g)	635.2	653.8	665.8	660.6	662.4	661.3	655.8	662.9	658.3	662.6	665.7	658.9	669.5	668.3	669.2
$V_{Probeta}$ (cm <sup>3</sup> )	493.4	508.6	517.0	509.5	511.5	514.7	500.2	503.4	505.6	501.0	499.3	492.8	488.6	490.0	492.6
G.E.Bulk	2.248	2.250	2.247	2.292	2.288	2.276	2.306	2.315	2.300	2.320	2.332	2.337	2.370	2.364	2.358
G.E.B. Media	2.248			2.285			2.307			2.330			2.364		

El ejemplo de cálculo considerando los valores para un 4.5% de contenido de asfalto es el siguiente:

$$G_{EB} = \frac{W_{al\ aire}}{W_{SSS} - W_{sumergido}}, \quad G_{EB1} = \frac{1109.01}{1128.6 - 635.2} = 2.248$$

#### 4.4.4 Resistencia de Mezclas Bituminosas al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Utilizando el Aparato Marshall.

Basado en norma: AASHTO T 245-97 (2008).

**TABLA 4.10 RESULTADOS DE ESTABILIDAD Y FLUJO DE DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.**

% CEMENTO ASFALTICO		4.5			5.0			5.5			6.0			6.5		
Estabilidad	Lectura del Anillo	249	276	267	250	240	270	260	305	244	255	233	269	200	220	220
	Estabilidad (kg)*	987	1148	1154	1080	1037	1168	1081	1269	1014	1060	967	1118	792	872	872
	Factor de Corrección**	1.09	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.09	1.09	1.09
	Estabilidad Corregida (Kg)	1076	1194	1154	1080	1037	1168	1124	1320	1054	1102	1006	1163	863	950	950
	Estabilidad Promedio (Kg)	1141			1095			1166			1091			921		
Flujo	Lectura (0.01 pulg)	9	9	9	11	11	10	10	11	13	13	13	12	14	14	13
	Flujo (mm)	2.29	2.29	2.29	2.79	2.79	2.54	2.54	2.79	3.30	3.30	3.30	3.05	3.56	3.56	3.30
	Flujo Promedio	2.29			2.71			2.88			3.22			3.47		

\*  $F_i = A + B(L_c) + C(L_c)^2$ , ver anexo 12: ecuación de mejor ajuste para el equipo de prueba.

\*\* Ver anexo 11: razón de correlación de estabilidad.

#### 4.4.5 Vacíos

El análisis de vacíos comprende: porcentaje de vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos de asfalto, en la tabla 4.14 se presentan los datos necesarios para el cálculo de estos.

**TABLA 4.11 DATOS PARA EL CALCULO DE LOS VACIOS.**

<b>% Cemento Asfáltico</b>	<b>4.5</b>	<b>5.0</b>	<b>5.5</b>	<b>6.0</b>	<b>6.5</b>
% De agregados	95.5	95.0	94.5	94.0	93.5
G.E Teórica Máxima	2.477	2.461	2.444	2.435	2.401
Gravedad E. Bulk	2.248	2.285	2.307	2.33	2.364
G.E de la combinación de agregados	2.598				
% Vacíos	9.248	7.151	5.618	4.314	1.549
% V.M.A	17.356	16.435	16.091	15.718	14.934
% V.F.A	46.719	56.490	65.086	72.554	89.630

Se presenta un ejemplo de cálculo para un contenido de 4.5% de cemento asfáltico, para cada porcentaje de vacíos calculado.

#### ❖ **Porcentajes de vacíos de aire**

El porcentaje de vacíos para una mezcla densa debe comprender entre 3 y 5%. Existe una relación entre la Gravedad Específica Bulk y la Teórica Máxima, ya que son los datos que se necesitan para obtener el porcentaje de vacíos. La Gravedad Específica Teórica Máxima no contempla vacíos en la muestra,

mientras que la briqueta compactada si, por lo tanto la Gravedad Especifica Bulk es menor que la Teórica Máxima.

$$\%V = \left(1 - \frac{\text{Densidad Bulk}}{G.E \text{ Teorica Maxima}}\right) \times 100$$

$$\%V = \left(1 - \frac{2.248}{2.477}\right) \times 100 = 9.248$$

❖ **Vacíos del Agregado Mineral (VMA).**

$$VMA = \left(1 - \frac{\% \text{ Agregado} \times G.E \text{ Bulk}}{G.E \text{ agregados}}\right) \times 100$$

$$VMA = \left(1 - \frac{0.955 \times 2.248}{2.598}\right) \times 100 = 17.356$$

❖ **Vacíos Llenos de Asfalto (VFA).**

$$VFA = \left(\frac{VMA - \% \text{ Vacios}}{VMA}\right) \times 100$$

$$VFA = \left(\frac{17.356 - 9.248}{17.356}\right) \times 100 = 46.719$$

#### 4.4.6 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

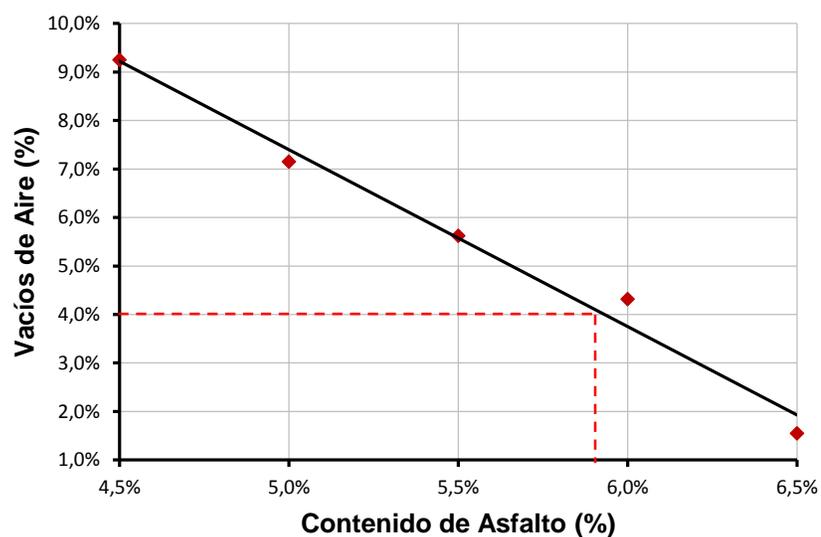
En la siguiente tabla se muestra un resumen de todos los datos necesarios para obtener el contenido óptimo de asfalto para el diseño y los demás parámetros.

**TABLA 4.12 RESUMEN DE RESULTADOS**

% Asf.	% Vacíos	VMA	VFA	G.E. Bulk (kg/m <sup>3</sup> )	G.E. Teórica Máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
4.5	9.248	17.354	46.711	2.248	2.477	1141	2.29
5.0	7.151	16.433	56.483	2.285	2.461	1095	2.71
5.5	5.618	16.088	65.080	2.307	2.444	1166	2.88
6.0	4.314	15.715	72.549	2.330	2.435	1091	3.22
6.5	1.549	14.931	89.628	2.364	2.401	921	3.47

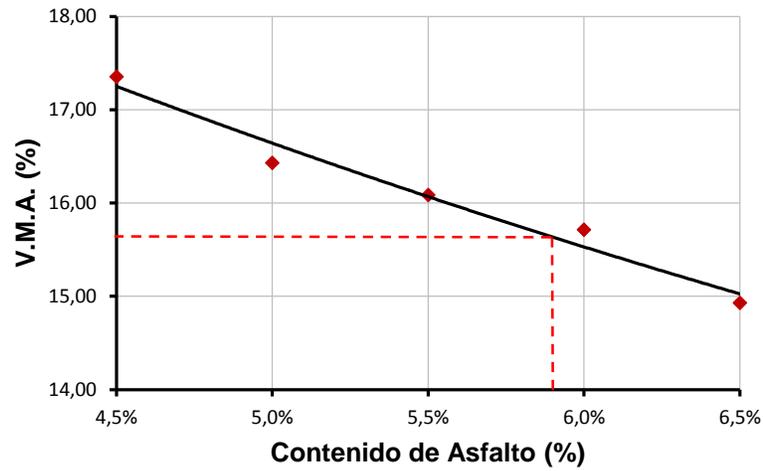
Ahora se procede a graficar cada uno de los resultados de los ensayos.

### PORCENTAJE DE VACÍOS



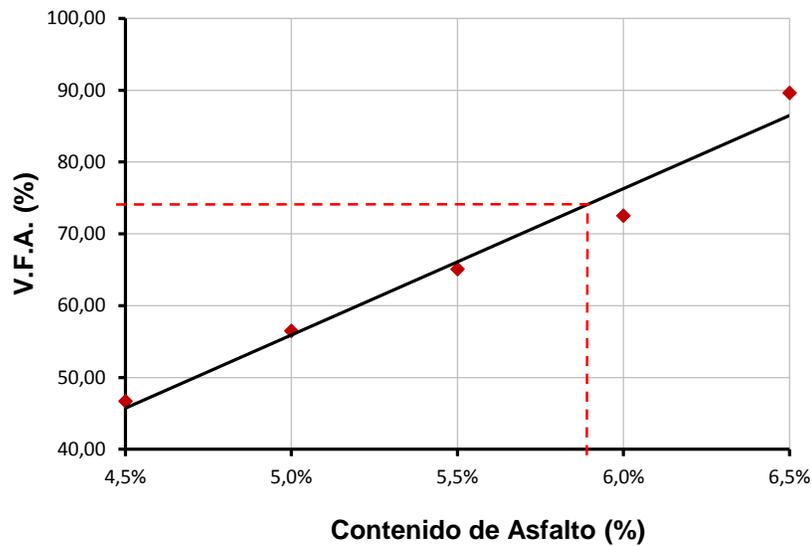
**Gráfico 4.3** Porcentaje de vacíos versus porcentaje de asfalto.

### VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL (V.M.A.)



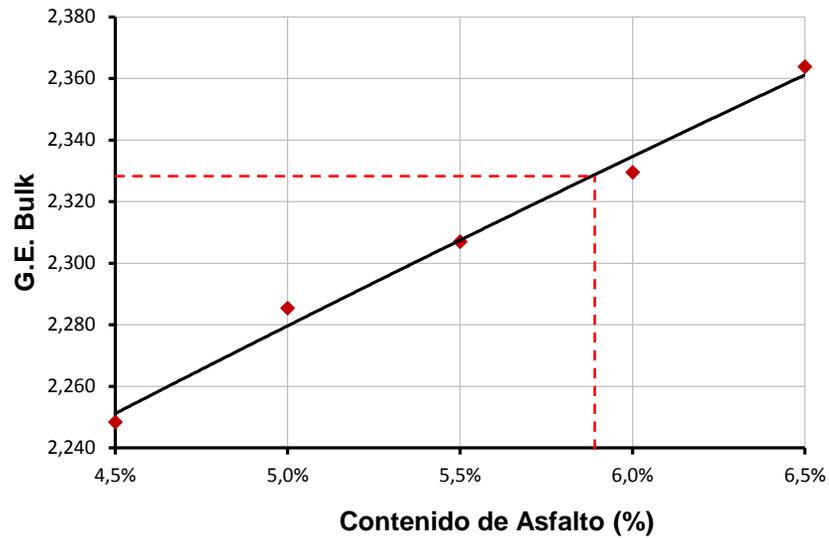
**Gráfico 4.4** V.M.A versus porcentaje de asfalto.

### VACÍOS LLENOS DE ASFALTO (V.F.A.)



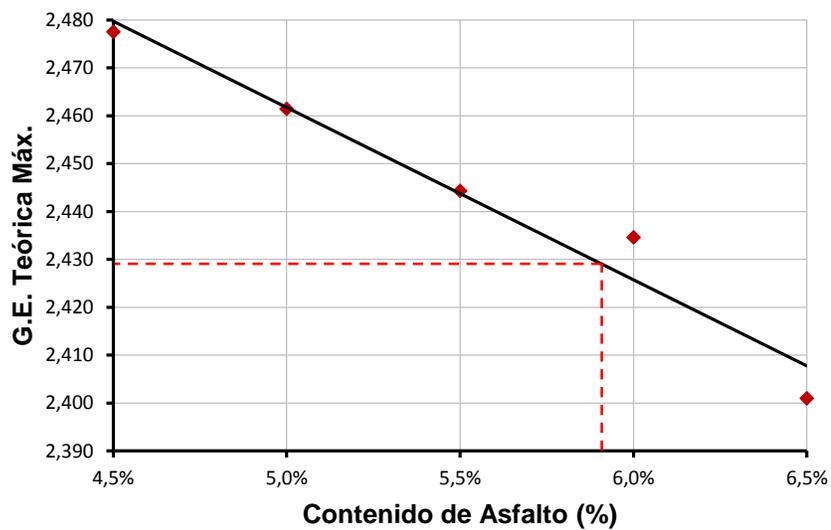
**Gráfico 4.5** V.F.A versus porcentaje de asfalto.

### DENSIDAD



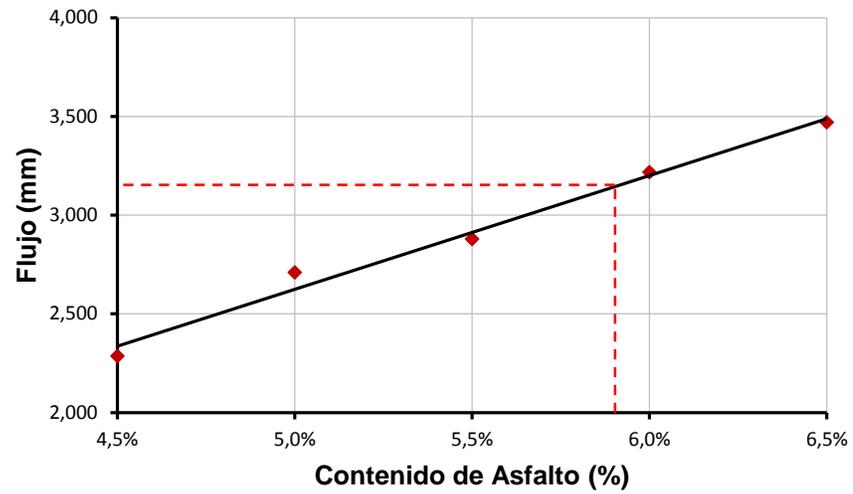
**Gráfico 4.6** Densidad versus porcentaje de asfalto.

### GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA.



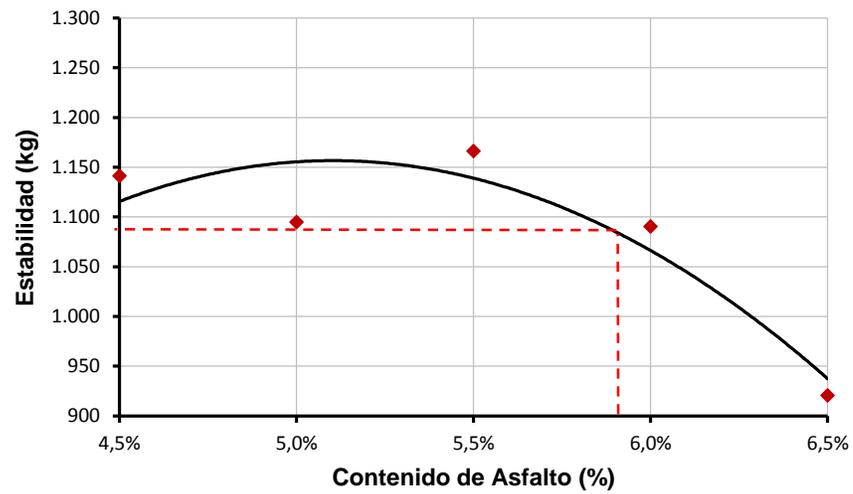
**Gráfico 4.7** Densidad teórica máxima versus porcentaje de asfalto.

### FLUJO.



**Gráfico 4.8** Flujo versus porcentaje de asfalto.

### ESTABILIDAD.



**Gráfico 4.9** Estabilidad versus porcentaje de asfalto.

Los valores obtenidos de los gráficos y los rangos a cumplir, según tabla 3.1 se presentan a continuación:

**TABLA. 4.13 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS GRÁFICOS.**

<b>Descripción</b>		<b>Según tabla 3.1</b>
Contenido de asfalto (%)	5.90	-----
Vacíos (%)	4.0	3-5
V.M.A. (%)	15.60	>13
V.F.A (%)	74.00	65-75
G.E. Bulk	2.328	----
G.E. Teórica máxima	2.428	----
Estabilidad Kg (lb)	1082.0 (2380.4)	> 816.4 (1800)
Flujo (mm)	3.125	2-4

Los valores dados por los gráficos para porcentaje de vacíos, V.M.A., V.F.A., Estabilidad y Flujo cumplen con los requisitos establecidos por la metodología Marshall.

#### **4.5 Ensayo de susceptibilidad a la humedad**

El procedimiento consiste en preparar 6 muestras utilizando el método de compactación de impacto propuesto por Marshall. Los vacíos de aire de las muestras preparadas tienen que oscilar entre 6 y 8%, existen diferentes maneras de lograr estos vacíos, el más común y aplicado en nuestro caso fue

reducir el número de golpes de 75 a 25. El alto porcentaje de vacíos de aire requerido ayuda a acelerar el daño de la humedad de las muestras. Las muestras se dividen en dos grupos: el primer grupo es el grupo de control o "incondicionado", mientras que el segundo grupo, o "acondicionado" es saturada en vacío entre un 55-80%.

Los resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad se muestran en la **tabla 4.14:**

#### **4.5.1 Extracción Cuantitativa de asfalto en mezclas de pavimento bituminoso.**

**Basado en norma: ASTM 2172-05.**

Este método de análisis determina cuantitativamente el contenido de asfalto de mezclas bituminosas utilizando un extractor de centrifuga y tricloroetileno u otros disolventes aprobados. Los resultados de nuestro diseño fueron:

**TABLA 4.14 RESUMEN DE EXTRACCIÓN CUANTITATIVA DEL ASFALTO.**

W inicial de la muestra (g)	2139.70
W final de la muestra (g)	2012.10
W neto seco lavado (g)	1938.20
W perdido (g)	127.60
Perdida por lavado (g)	73.90
% perdido	5.96
FAJ	0.11
FAJ compensación por temperatura	0.14
% asfalto	5.71

TABLA 4.15 GRADO DE TENSION INDIRECTA (TSR)

Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro (mm) D	101	101	101	101	101	101
Espesor (mm) t	62,33	62,45	62,72	63,00	63,00	63,33
Peso seco al aire A	1120,65	1127,07	1129,76	1134,92	1133,16	1134,97
Peso Saturado con Superficie Seca B	1128,47	1139,25	1136,86	1142,79	1141,39	1142,44
Peso sumergido C	636,55	644,46	640,91	641,69	640,7	641,37
Volumen (B-C) E	491,92	494,79	495,95	501,1	500,69	501,07
Gravedad Bulk (A/E) F	2,278	2,278	2,278	2,265	2,263	2,265
Teórica Máxima G	2,428	2,428	2,428	2,428	2,428	2,428
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6,17	6,18	6,18	6,72	6,79	6,71
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	30,37	30,59	30,65	33,67	33,98	33,62
Lectura	185	169	181			
Coefficiente	1,09	1,09	1,04			
Carga (Kg) P	861,71 Kg	787,28 Kg	804,43 Kg			
Carga (N) P	8453,37 N	7723,26 N	7891,49 N			
<b>Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg</b>						
Peso Saturado con Superficie Seca B'				1154,05	1153,05	1154,84
Peso sumergido C'				652,9	652,06	653,71
Volumen (B'-C') E'				501,15	500,99	501,13
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				19,13	19,89	19,87
% Saturación (100J'/I)				56,82	58,53	59,10
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				0,01	0,06	0,01
<b>Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C</b>						
Espesor mm t''				62,41	62,45	62,54
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1163,38	1161,56	1163,76
Peso sumergido C''				657,41	655,3	656,76
Volumen (B''-C'') E''				505,97	506,26	507
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				28,46	28,4	28,79
% Saturación (100J''/I)				84,53	83,57	85,64
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				0,97	1,11	1,18
Lectura				141	145	163
Coefficiente				1,09	1,09	1,04
Carga, (Kg) P''				656,90 Kg	675,54 Kg	724,53 Kg
Carga (N) P''				6444,20 N	6627,03 N	7107,61 N
Tensión Seca 2000 P/πD S <sub>td</sub>	854,85	779,52	793,07			
Tensión Seca Promedio	809,15					
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S <sub>tm</sub>				650,8234948	668,9046735	716,3651876
Tensión Húmeda Promedio				678,70		
<b>Grado de Tensión TSR 100(S<sub>tm</sub>/S<sub>td</sub>)</b>	<b>83,88</b>					
Daño por Humedad Visual	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
OBSERVACIONES: Se pudo observar que la humedad llegó hasta el interior de las briquetas.						

#### 4.6 DISEÑO MARSHALL CON INCORPORACIÓN DE PORCENTAJES DE CAL HIDRATADA.

Una vez encontrado el porcentaje óptimo de asfalto el cual fue del 5.9 %, se procede a hacer los cálculos para grava TMN 19mm (3/4") grava cero, el asfalto y la cal hidratada para los porcentajes (1% y 2%).

Así mismo, se hizo el cálculo de los materiales, para la elaboración del Método Marshall, Teóricas Máximas, Extracciones y el Grado de Tensión Indirecta (TSR).

- ✓ Por lo que se realizaron los cálculos para 9 briquetas, las cuales se dividen 3 para el Método Marshall y 6 para el efecto de agua, con una cantidad de 1180.00 g cada una.
- ✓ Para 4 extracciones, las cuales 3 son para obtener el factor de calibración y la que falta es a la que se coloca dicho factor; con un mínimo de 2000.00 g cada una.
- ✓ Así mismo para 2 teóricas máximas, con una cantidad mínima de 2500.00 g cada una.
- ✓ Y por último colocando un desperdicio total de 1380.00 g.

Haciendo una cantidad total para cada porcentaje de cal de 25000.00 g, se muestra en la **tabla 4.16**.

**TABLA 4.16 CANTIDAD DE MATERIAL TOTAL**

DESCRIPCIÓN	CANT.	PESO (g)	PESO TOTAL(g)
Briquetas	9	1180.00	10620.00
Extracciones	4	2000.00	8000.00
Teórica Máxima	2	2500.00	5000.00
Desperdicio		1380.00	1380.00
<b>TOTAL:</b>			<b>25000.00</b>

❖ **Puntos de diseño con la incorporación de cal hidratada.**

Debido a la cantidad de material, el mezclado se realizó en tres partes. Primeramente se realizaron 2 mezclados de 7500.00 g y uno de 10000.00 g para los porcentaje de cal hidratada (1.00% y 2.00%). El cálculo del asfalto para cada uno de los mezclado, se realizó en base al 5.9% de asfalto óptimo encontrado anteriormente, ver la **tabla 4.17**

**TABLA 4.17 CANTIDAD DE MATERIAL PARA LOS MEZCLADO DE 7500g Y 10000g**

<b>CANTIDAD TOTAL DE MATERIAL 7500.00 g y 10000.00 g</b>		
Agregados pétreos y cal	7057.50	9410.00
Asfalto	442.50	590.00
<b>TOTAL</b>	<b>7500.00</b>	<b>10000.00</b>

El cálculo se realizó basándonos en el 48% de grava TMN 19mm (3/4") y el 52% de grava cero a los cuales en conjunto, se les resto el porcentaje de la cal hidratada para cada uno de los puntos, esto para respetar el total del 100%, las cantidades están en la **tabla 4.18** para los 7500.00 g y en la **tabla 4.19** para los 10000.00g.

**TABLA 4.18 PUNTOS DE DISEÑO CON CAL HIDRATADA PARA  
MEZCLADO DE 7500 g**

% CAL	% ÓPTI. DE ASF.	PESO DE ASF.(g)	PESO TOTAL DE AGREG. (g)	PESO TMN 3/4" (g)	PESO GRAVA CERO (g)	PESO CAL (g)
1.00	5.90	442.50	7057.50	3352.31	3634.61	70.58
2.00	5.90	442.50	7057.50	3317.03	3599.33	141.15
<b>TOTALES</b>	<b>442.50</b>	<b>7057.5</b>				<b>7500.00</b>

**TABLA 4.19 PUNTOS DE DISEÑO CON CAL HIDRATADA PARA  
MEZCLADO DE 10000g**

% CAL	% ÓPTI. DE ASF.	PESO DE ASF. (g)	PESO TOTAL DE AGREG. (g)	PESO TMN 3/4" (g)	PESO GRAVA CERO (g)	PESO CAL (g)	COMPR.
1.00	5.90	590.00	9410.00	4469.75	4846.15	94.10	9410.00
2.00	5.90	590.00	9410.00	4422.70	4799.10	188.20	9410.00
<b>TOTALES</b>		<b>590.00</b>	<b>9410.00</b>				<b>10000.00</b>

#### 4.6.1 Mezclado de los diferentes porcentajes con cal hidratada.

- Pesar todos los materiales.
- Realizar el mezclado en un deposito limpio.
- Esperar que lleguen a la temperatura de mezclado.
- Colocar asfalto y terminar el mezclado.
- Curar la mezcla, pero debido a la cantidad de material se realizaron dos mezclados de 7500.00 g y uno de 10000.00 g. Se procedió a traspalear hasta q la mezcla se enfriara, con el fin que no se formaran grumos.
- Luego se procede al cuarteo para llegar a las diferentes cantidades requeridas para los ensayos a realizar.



**Figura 4.6: Materiales pesados para el 1% y 2% de cal hidratada.**

**Fuente: Laboratorio planta asfáltica constructora DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.**

#### 4.6.2 Ensayos para el 1% y 2% de cal hidratada

Una vez que se ha cuarteado y llevado a las cantidades correspondientes para cada ensayo, se procede a realizar cada uno de ellos. Iniciando por la gravedad específica teórica máxima basada en la norma ASTM D 2041.

**TABLA 4.20 CUADRO RESUMEN DE LOS ENSAYOS**

	Descripción	1.00% Cal			2.00% Cal		
		<b>Gravedad Específica Teórica Máxima</b>	$W_{\text{inicial de la muestra}}$	2601.2			2506.2
$W_{\text{picnómetro + agua}}$	11766.0			11766.1			
$W_{\text{ANTES DEL ENSAYO}}$	14367.2			14272.2			
$W_{\text{DESPUES DEL ENSAYO}}$	13306.2			13248.6			
$W_{\text{antes}} - W_{\text{Después}}$	1061.0			1023.6			
<b>G.E. Teórica Máx.</b>	<b>2.542</b>			<b>2.448</b>			
	Nº de PROBETA	1	2	3	1	2	3
<b>G.E. Bulk AASHTO T166</b>	Densidad Probeta	2.354	2.354	2.355	2.359	2.358	2.358
	<b>Densidad Prom.</b>	<b>2.354</b>			<b>2.358</b>		
<b>Vacíos</b>	Vacíos (%)	4.00	4.00	3.95	3.64	3.68	3.68
	<b>Vacíos Prom. (%)</b>	<b>3.98</b>			<b>3.67</b>		
<b>Estabilidad AASHTO T166</b>	Estabilidad (Kg)	1151.8	1215.6	1390.9	1090.5	1344.9	1160.1
	<b>Estabilidad Prom. (Kg)</b>	<b>1386</b>			<b>1198</b>		
<b>Flujo</b>	Flujo (mm)	3.81	3.05	4.57	3.81	3.56	4.57
	<b>Flujo Prom. (mm)</b>	<b>3.81</b>			<b>3.98</b>		

#### **4.7 ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD POR CADA PORCENTAJE DE CAL HIDRATADA.**

Para los porcentajes del 1.00% y 2.00% de cal hidratada se realizaron seis briquetas a las cuales se les dio 25 golpes por cara, esto con el fin de encontrar un porcentaje de vacíos que esté en el rango de un 6% a un 8%, por lo que se espera obtener un 7% que es el requerido en campo.

También se van a dividir al igual que en el porcentaje óptimo de asfalto en dos grupos, uno seco y otro húmedo.

El ensayo a la susceptibilidad a la humedad con la incorporación de cal hidratada se realizó basándonos en la norma ASTM D 4867, AASHTO T 283.

A continuación se muestran los resultados para el 1.00% de cal hidratada en la **Tabla 4.21** y el de 2.00% de cal hidratada en la **Tabla 4.22**.

**TABLA 4.21 GRADO DE TENSIÓN INDIRECTA (TSR) PARA EL 1.00% DE CAL HIDRATADA**

Muestra	1	2	3	4	5	6
<b>Díámetro mm D</b>	101	101	101	101	101	101
<b>Espesor mm t</b>	63,23	62,67	63,03	64,00	64,23	64,03
<b>Peso seco al aire A</b>	1134,02	1135,76	1134,65	1134,87	1134,06	1135,82
<b>Peso Saturado con Superficie Seca B</b>	1142,12	1143,97	1142,87	1140,18	1139,26	1141,86
<b>Peso sumergido C</b>	648,14	649,23	648,76	644,43	643,94	645,85
<b>Volumen (B-C) E</b>	493,98	494,74	494,11	495,75	495,32	496,01
<b>Gravedad Bulk (A/E) F</b>	2,296	2,296	2,296	2,289	2,290	2,290
<b>Teórica Máxima G</b>	2,452	2,452	2,452	2,452	2,452	2,452
<b>% Vacíos (100(G-F)/G) H</b>	6,38	6,38	6,35	6,64	6,63	6,61
<b>Volumen de vacíos de aire HE/100 I</b>	31,49	31,54	31,37	32,92	32,82	32,79
<b>Lectura</b>	133	147	152			
<b>Coficiente</b>	1,09	1,09	1,04			
<b>Carga (Kg) P</b>	619,62 Kg	684,86 Kg	675,66 Kg			
<b>Carga (N) P</b>	6078,44 N	6718,43 N	6628,23 N			
<b>Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg</b>						
<b>Peso Saturado con Superficie Seca B'</b>				1156,25	1157,01	1155,83
<b>Peso sumergido C'</b>				657,95	658,93	657,06
<b>Volumen (B'-C') E'</b>				498,3	498,08	498,77
<b>Volumen Abs de Agua (B'-A) J'</b>				21,38	22,95	20,01
<b>% Saturación (100J'/I)</b>				64,95	69,94	61,03
<b>% Hinchamiento (100(E'-E)/E)</b>				0,51	0,56	0,56
<b>Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C</b>						
<b>Espesor mm t''</b>				63,51	63,55	63,64
<b>Peso Saturado con Superficie Seca B''</b>				1160,01	1161,47	1159,97
<b>Peso sumergido C''</b>				645,12	646,25	644,05
<b>Volumen (B''-C'') E''</b>				514,89	515,22	515,92
<b>Volumen Abs de Agua (B''-A) J''</b>				25,14	27,41	24,15
<b>% Saturación (100J''/I)</b>				76,38	83,53	73,65
<b>% Hinchamiento (100(E''-E)/E)</b>				3,86	4,02	4,01
<b>Lectura</b>				161	155	125
<b>Coficiente</b>				1	1	1
<b>Carga, (Kg) P''</b>				688,12 Kg	662,49 Kg	534,24 Kg
<b>Carga (N) P''</b>				6750,45 N	6499,03 N	5240,85 N
<b>Tensión Seca 2000 P'/rtD S<sub>td</sub></b>	605,94	675,72	662,84			
<b>Tensión Seca Promedio</b>	648,17					
<b>Tensión Húmeda 2000 P''/rt''D S<sub>tm</sub></b>				669,9419763	644,5772933	519,0850933
<b>Tensión Húmeda Promedio</b>				611,20		
<b>Grado de Tensión TSR 100(S<sub>tm</sub>/S<sub>td</sub>)</b>	<b>94,30</b>					
<b>Daño por Humedad Visual</b>	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
<b>Agregado con grietas o Fracturado</b>	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
<b>OBSERVACIONES:</b> Se pudo observar que la humedad llegó hasta el interior de las briquetas.						

**TABLA 4.22 GRADO DE TENSION INDIRECTA (TSR) PARA EL 2.00% DE CAL HIDRATADA**

		<b>ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICOS PARA PAVIMENTOS AASHTO T 283</b>					
PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente						
SOLICITANTE:	Trabajo de Graduación						
DESCRIPCIÓN:	Mezcla Asfáltica en Caliente Con TMN 3/4"						
PROCEDENCIA:	Planta DISA, Quezaltepeque						
FECHA DE MUESTREO:	25/03/2016						
Muestra	1	2	3	4	5	6	
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101	
Espesor mm t	64,00	63,67	63,00	63,00	63,33	62,73	
Peso seco al aire A	1126,1	1126,91	1126,7	1113,45	1114,51	1110,81	
Peso Saturado con Superficie Seca B	1131,15	1130,87	1133,04	1121,94	1123,57	1119,49	
Peso sumergido C	639,82	638,89	641,52	636,52	637,53	635,11	
Volumen (B-C) E	491,33	491,98	491,52	485,42	486,04	484,38	
Gravedad Bulk (A/E) F	2,292	2,291	2,292	2,294	2,293	2,293	
Teórica Máxima G	2,448	2,448	2,448	2,448	2,448	2,448	
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6,37	6,43	6,36	6,30	6,33	6,32	
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	31,32	31,64	31,27	30,58	30,77	30,62	
Lectura	186	200	199				
Coficiente	1,09	1,09	1,09				
Carga (Kg) P	866,36 Kg	931,43 Kg	926,78 Kg				
Carga (N) P	8498,98 N	9137,33 N	9091,75 N				
<b>Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg</b>							
Peso Saturado con Superficie Seca B'				1136,63	1137,36	1134,68	
Peso sumergido C'				648,13	649,18	647,36	
Volumen (B'-C') E'				488,5	488,18	487,32	
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				23,18	22,85	23,87	
% Saturación (100J'/I)				75,80	74,27	77,96	
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				0,63	0,44	0,61	
<b>Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C</b>							
Espesor mm t''				60,11	60,18	60,09	
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1138,04	1138,92	1135,14	
Peso sumergido C''				650,73	651,01	648,02	
Volumen (B''-C'') E''				487,31	487,91	487,12	
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				24,59	24,41	24,33	
% Saturación (100J''/I)				80,41	79,34	79,46	
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				0,39	0,38	0,57	
Lectura				190	168	184	
Coficiente				1,09	1,09	1,09	
Carga, (Kg) P''				884,96 Kg	782,63 Kg	857,06 Kg	
Carga (N) P''				8681,41 N	7677,61 N	8407,75 N	
Tensión Seca 2000 P/πtD S <sub>td</sub>	837,04	904,57	909,63				
Tensión Seca Promedio	883,75						
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S <sub>tm</sub>				910,3403846	804,090796	881,9882864	
Tensión Húmeda Promedio				865,47			
Grado de Tensión TSR 100(S <sub>tm</sub> /S <sub>td</sub> )	<b>97,93</b>						
Daño por Humedad Visual	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	
OBSERVACIONES: Se pudo observar que la humedad llegó hasta el interior de las briquetas.							

#### **4.7.1 Extracción del asfalto por cada porcentaje de cal hidratada.**

La determinación del contenido del asfalto se realizó en un horno de ignición. Es un método para la determinación exacta del contenido de asfalto que considera el medio ambiente y además es rentable. Fue desarrollado por NCAT, el Centro Nacional de Tecnología de Asfalto. El método de ignición reduce el tiempo de la prueba en comparación con los métodos de prueba de solventes. El rango de temperatura es: 392 a 1202° F (200 a 650° C)<sup>47</sup>.

Es de fácil operación, ya que simplemente se introduce la muestra en una canasta la cual se divide en dos partes, dicha muestra ya fue pesada anteriormente, posteriormente se coloca dentro del horno de ignición y se cierra la puerta, luego se coloca el peso de la muestra, el factor de calibración si es el caso, posteriormente se presiona el botón iniciar, después de transcurrido un periodo de tiempo el horno de ignición emite un sonido al final de la prueba, donde se presiona el botón de parar y se retira el ticket que emite.

Para cada uno de los porcentajes de cal hidratada se realizaron cuatro extracciones, esto se debe a que se necesitan tres para obtener el factor de corrección de la mezcla y a la cuarta se le coloca el valor obtenido, esto se realiza para cada uno de los puntos de diseño.

---

<sup>47</sup><http://www.humboldtmg.com/digital-catalog/Spanish/catalog-pdf/Page%20162.pdf>



**Figura 4.7: Peso de la muestra, colocación en la canasta y en el horno de ignición.**  
**Fuente: Laboratorio planta asfáltica constructora DISA S.A de C.V, Quezaltepeque.**

❖ **Cálculo para obtener el factor de calibración**

Fórmula para obtener el factor de calibración:

$$\text{Factor de Calibración} = \text{Prom (Factor - \% \acute{o}ptimo)}$$

Para obtener el valor de factor de calibración a las primeras tres extracciones se le coloca cero y el resultado que dé en el ticket en el contenido de asfalto, se le va a restar el porcentaje óptimo de asfalto a cada uno de las tres extracciones; pero en nuestro caso solo dos, ya que una nos dio menor del porcentaje óptimo de asfalto entonces lo rechazamos, por lo que se obtuvo el factor de calibración solo con las dos que dieron mayor que el óptimo.

Nº de Extracción	1	2	3
Resultado	6.03	5.82	6.11
Datos a Tomar	6.03		6.11

$$a) 6.03 - 5.9 = 0.13$$

$$b) 6.11 - 5.9 = \underline{0.21}$$

$$((0.13+0.21)/2)= \mathbf{0.17}$$

### Resultados con el factor de corrección

Porcentaje de Cal Hidratada	1.00	2.00
Resultado con Factor de Corrección	5.80%	5.46%

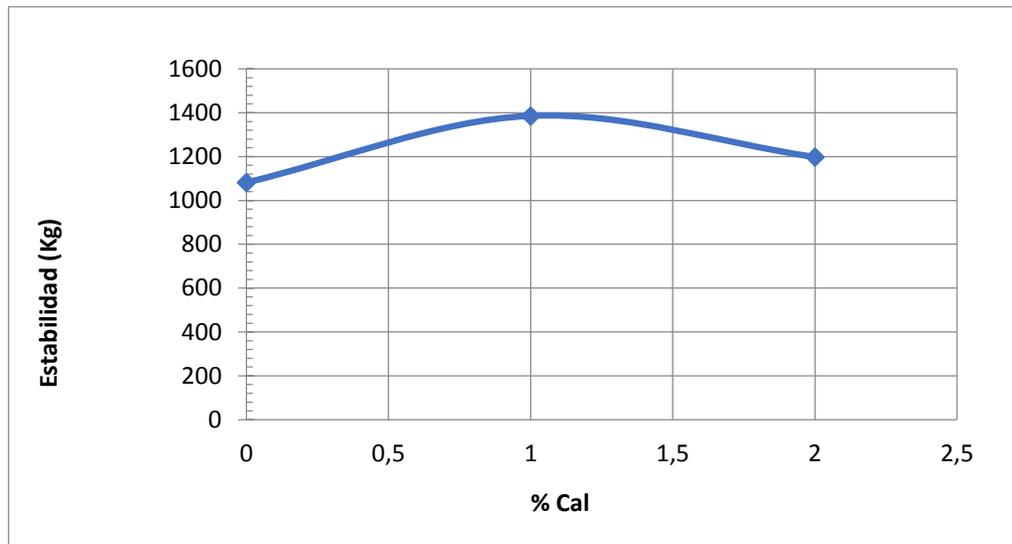
#### ❖ Ensayo granulométrico del agregado pétreo extraído

Después de hacer la extracción de asfalto se procede a comprobar la granulometría del agregado extraído, para ver si se cumple con la especificación granulométrica del diseño.

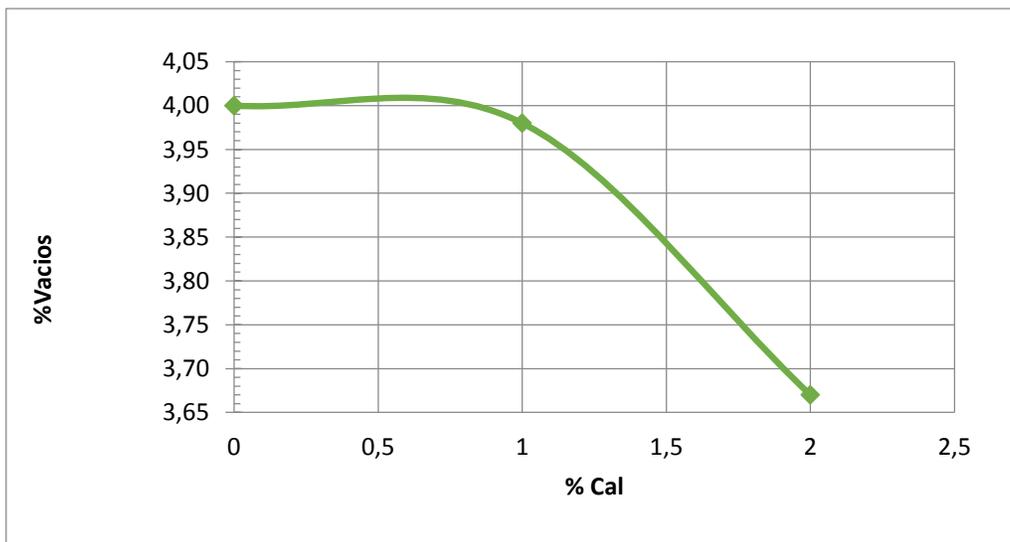
### 4.8 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

**TABLA 4.23 RESUMEN DE RESULTADOS PARA GRAFICAR**

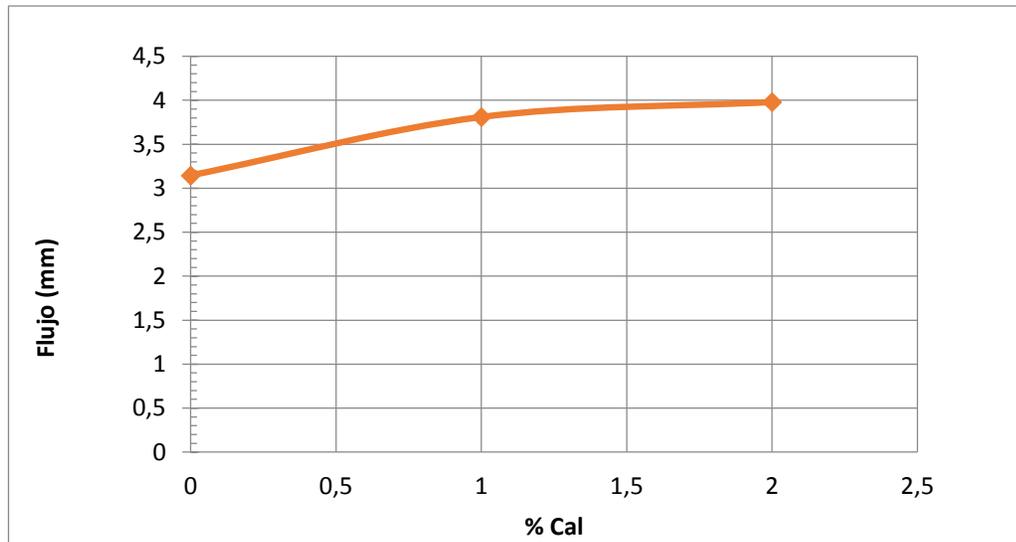
% Cal	Estabilidad (Kg)	% Vacíos	Flujo (mm)	Densidad	G. E. T. Máxima	TSR (%)
0	1082	4.00	3.15	2.328	2.430	83.88
1	1386	3.98	3.81	2.354	2.452	94.30
2	1198	3.67	3.98	2.358	2.448	97.93



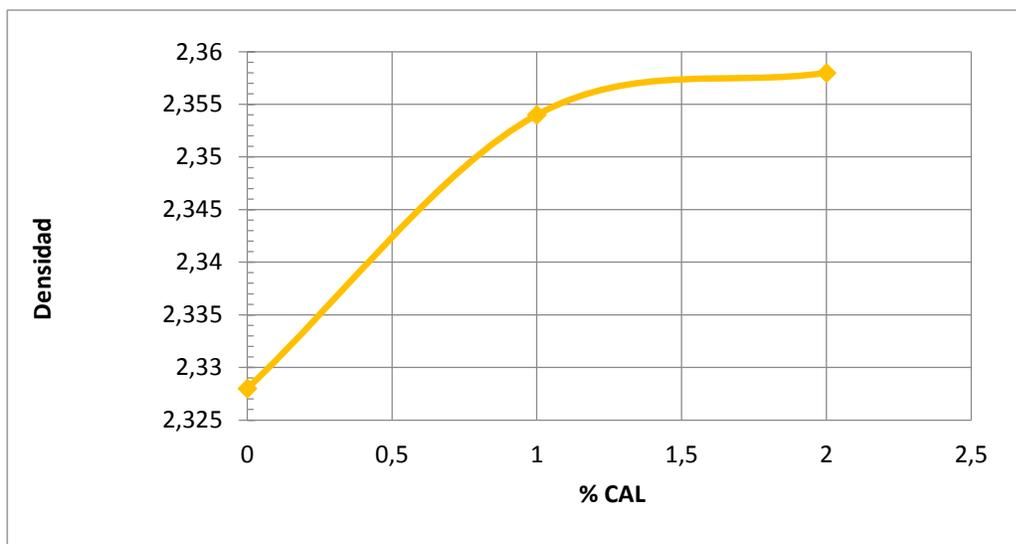
**Gráfico 4.10** Porcentaje de cal versus estabilidad



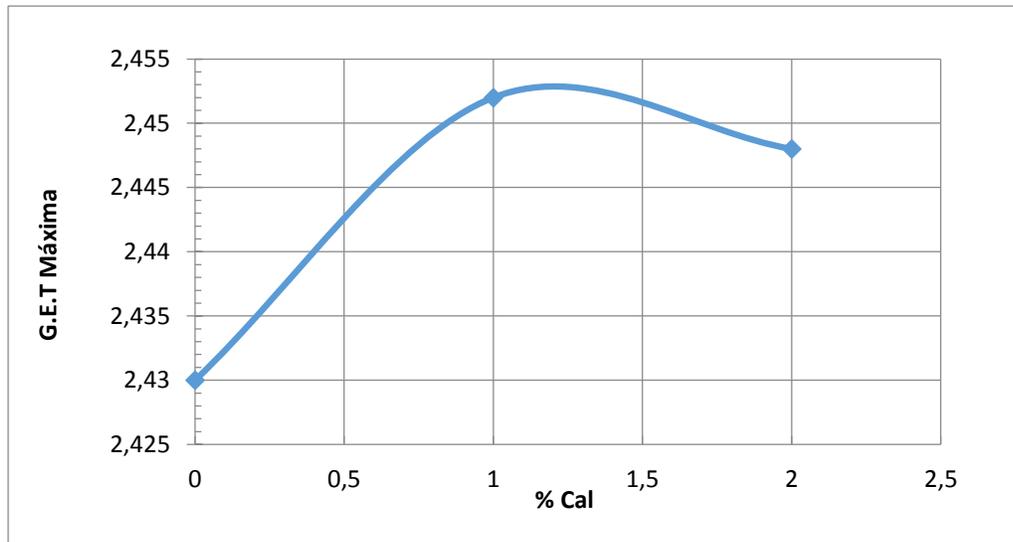
**Gráfico 4.11** Porcentaje de cal versus porcentaje de vacíos



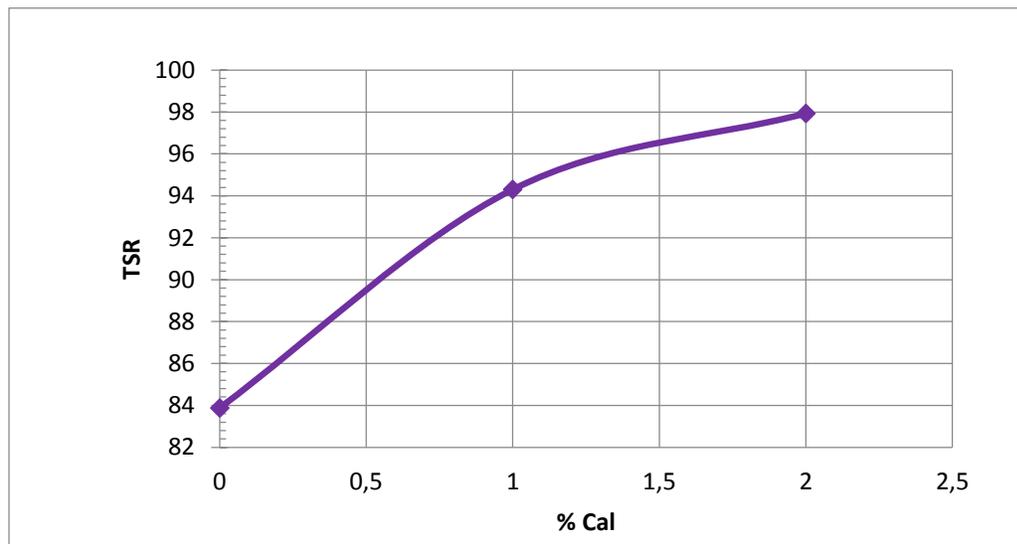
**Gráfico 4.12** Porcentaje de cal versus flujo



**Gráfico 4.13** Porcentaje de cal versus densidad.



**Gráfico 4.14** Porcentaje de cal versus gravedad específica teórica máxima.



**Gráfico 4.15** Porcentaje de cal versus TSR.

**CAPITULO V.**

**“CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES”**

## CONCLUSIONES

Para las condiciones en las que fueron realizados nuestros ensayos de laboratorio, se llegó a las siguientes conclusiones:

- ❖ El trabajo de graduación consistía en utilizar grava TMN 19mm ( $\frac{3}{4}$ "), grava 0 y arena triturada; con la granulometría Bailey obtuvimos que no era necesaria la arena triturada, por lo tanto utilizamos 48% de grava TMN 19mm ( $\frac{3}{4}$ ") y 52% de grava 0 para la realización de nuestro diseño de mezcla asfáltica en caliente con cal hidratada para mejorar la resistencia a la humedad.
- ❖ Con la granulometría Bailey de nuestros agregados pétreos, se elaboró un diseño Marshall y obtuvimos el porcentaje óptimo de asfalto, y ese valor utilizamos para los diferentes porcentajes de cal hidratada.
- ❖ La temperatura de diseño para el mezclado y compactación en laboratorio de la mezcla asfáltica en caliente se obtiene a través de la carta viscosidad-temperatura, la cual indica que la mezcla asfáltica en caliente puede ser mezclada en un rango de temperaturas de 155-160°C y compactada en rango de temperaturas de 145-150°C. En este trabajo de graduación se utilizó una temperatura de 157°C para el mezclado y 147°C para la compactación, ésta se utilizó en mezcla normal y con adición de cal.

- ❖ Para mezcla asfáltica normal el grado de tensión indirecta(TSR) fue del 83.88%, para el 1% de cal hidratada fue del 94.30% y para el 2% de cal hidratada fue del 97.93%. Por lo tanto, la incorporación de la cal hidratada en las mezclas asfálticas en caliente, mejora las condiciones a la humedad en que se exponen los pavimentos flexibles.

## RECOMENDACIONES

- ❖ El técnico que inicie la compactación de las briquetas de mezcla asfáltica en caliente, debe finalizarla, ya que la energía de compactación puede variar de un operador a otro en la compactación manual. Si el proceso de compactación se inicia de forma manual o mecánica, debe respetarse ese método en todo el diseño, hasta finalizar.
- ❖ El mezclado agregado-asfalto-cal hidratada debe realizarse de la manera más homogénea posible y por el mismo operador, para evitar la variabilidad de la mezcla en los distintos ensayos que se realizan.
- ❖ En el curado de la mezcla asfáltica en caliente se debe estar pendiente de mezclarla cuando transcurra una hora, revisar la temperatura del horno de curado, e intercambiar la posición de las bandejas en el horno, ya que las que están cerca de la base se calientan más rápido y la mezcla se pueden quemar.
- ❖ Realizar diferentes diseños de mezcla asfáltica en caliente con la incorporación de cal hidratada, evaluando diferentes agregados pétreos y evaluar el comportamiento de estos cuando son sometidos al grado de tensión indirecta (TSR).
- ❖ Continuar con la presente investigación, por medio de la realización de un tramo de prueba, la finalidad es medir el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente con la incorporación de la cal hidratada, ante las cargas impuestas por el tráfico y las condiciones ambientales.

## BIBLIOGRAFIA.

### Libros:

- Principios De Construcción De Pavimentos De Mezcla Asfáltica En Caliente (MS-22). Estados Unidos: Instituto Del Asfalto.
- The Asphalt Handbook (MS-4), Estados Unidos: Instituto del Asfalto.
- González, J., Alvarenga, E., Rodríguez, I., Santana, A., Rodríguez, E., Manual Centroamericano De Especificaciones Para La Construcción De Carreteras Y Puentes Regionales, Secretaria De Integración Económica Centroamericana. (2da ed.). Guatemala: Proyecto USAID, 2004.
- Especificaciones Y Normas De La Asociación Americana De Carreteras Estatales Y Oficiales Para El Transporte (AASHTO). Washington: AASHTO.
- Liang R., Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave, Estados Unidos: Ohio Department of Transportation, 2008.

### Tesis:

- Antelis, O., Mezcla Asfáltica con cal Hidratada, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2007.
- Plaza, S., Rincón, G., Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo, Colombia: Pontifica Universidad Javerina, 2014.

- Pérez, G., Análisis de los parámetros del método Bailey y su influencia en la segregación de las mezclas densas en caliente, Colombia: Universidad industrial de Santander, 2012.

### **Investigaciones:**

- Vavrick, W., Huber, G., Pine, W., Carpenter, S., y Bailey R., Método Bailey para seleccionar la gradación en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente.
- Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J., Alonso, S. y Alarcón, H., Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas, México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes del Instituto Mexicano del Transporte, 2004.
- Miranda, L., Rubio, B., Jiménez, R., Enríquez, L. y Loma, J., Método de dosificación Bailey. Aplicación a las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA), ASEFMA, 2012.
- Rondón, A., Moreno, A., Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante, Colombia: Universidad de Santander, 2010.
- Asociación Europea de la Cal (EULA), Cal hidratada un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Boletín Climatológico Anual, El Salvador, 2015.

- Construcción de asfaltos, uso de la cal para modificar el asfalto, ANFACAL(Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A.C), México, D.F, año 2007.

# ANEXOS

## ANEXO 1. GRANULOMETRÍA GRAVA TMN ¾"



### ENSAYO DE GRANULOMETRÍA ASTM C136



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Trituradora INTREC  
 Descripción: Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con TMN ¾"  
 Fecha de Ensayo: 17/08/2015

Peso Inicial= 7625.20 g

Tamaño Máximo= ½"

MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
NOMBRE	mm				
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
3/4"	19.00	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
1/2"	12.50	4,181.20 g	54.83 %	54.83 %	45.17 %
3/8"	9.50	2,827.20 g	37.08 %	91.91 %	8.09 %
No. 4	4.75	471.50 g	6.18 %	98.09 %	1.91 %
No. 8	2.36	12.40 g	0.16 %	98.26 %	1.74 %
No. 16	1.18	3.40 g	0.04 %	98.30 %	1.70 %
No. 30	0.60	3.90 g	0.05 %	98.35 %	1.65 %
No. 50	0.30	5.70 g	0.07 %	98.43 %	1.57 %
No. 100	0.15	7.00 g	0.09 %	98.52 %	1.48 %
No. 200	0.075	6.90 g	0.09 %	98.61 %	1.39 %
FONDO		106.00 g	1.39 %	100.00 %	0.00 %
<b>TOTALES</b>		<b>7,625.20 g</b>	<b>100.00 %</b>		
<b>GRAVA 98.09%</b>		<b>ARENA= 0.52%</b>		<b>FINOS= 1.39%</b>	

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

## ANEXO 2. GRANULOMETRÍA GRAVA CERO



### ENSAYO DE GRANULOMETRÍA ASTM C136



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA  
 Descripción: Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro Grava Cero  
 Fecha de Ensayo: 20/08/2015

Peso Inicial= 823.98 g

MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
Nombre	mm				
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
3/4"	19.00	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
1/2"	12.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
3/8"	9.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
No. 4	4.75	68.05 g	8.26 %	8.26 %	91.74 %
No. 8	2.36	257.32 g	31.23 %	39.49 %	60.51 %
No. 16	1.18	182.43 g	22.14 %	61.63 %	38.37 %
No. 30	0.60	99.81 g	12.11 %	73.74 %	26.26 %
No. 50	0.30	71.05 g	8.62 %	82.36 %	17.64 %
No. 100	0.15	47.41 g	5.75 %	88.12 %	11.88 %
No. 200	0.075	30.98 g	3.76 %	91.88 %	8.12 %
FONDO		66.93 g	8.12 %	100.00 %	0.00 %
<b>TOTALES</b>		<b>823.98 g</b>	<b>100.00 %</b>		
<b>GRAVA= 8.26%</b>		<b>ARENA=83.62%</b>		<b>FINOS= 8.12%</b>	

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

### ANEXO 3. GRANULOMETRÍA ARENA TRITURADA



## ENSAYO DE GRANULOMETRÍA ASTM C136



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA  
 Descripción: Arena Triturada Mal Graduada, Color Gris Oscuro  
 Fecha de Ensayo: 25/08/2015

Peso Inicial= 492.08 g

MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
Nombre	MM				
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
3/4"	19.00	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
1/2"	12.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
3/8"	9.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %
No. 4	4.75	38.33 g	7.79 %	7.79 %	92.21 %
No. 8	2.36	123.45 g	25.09 %	32.88 %	67.12 %
No. 16	1.18	103.56 g	21.05 %	53.92 %	46.08 %
No. 30	0.60	68.91 g	14.00 %	67.93 %	32.07 %
No. 50	0.30	49.84 g	10.13 %	78.05 %	21.95 %
No. 100	0.15	32.93 g	6.69 %	84.75 %	15.25 %
No. 200	0.075	21.78 g	4.43 %	89.17 %	10.83 %
FONDO		53.28 g	10.83 %	100.00 %	0.00 %
<b>TOTALES</b>		<b>492.08 g</b>	<b>100.00 %</b>		
<b>GRAVA= 7.79%</b>		<b>ARENA= 81.38%</b>		<b>FINOS= 10.83%</b>	

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:

Aprobado por:

## ANEXO 4. DESGASTE MÁQUINA DE LOS ANGELES GRAVA TMN 3/4"



### Método de Ensayo por Abrasión e Impacto en la Máquina de los Ángeles ASTM C131



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Trituradora INTREC  
 Descripción: Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con TMN 3/4"  
 Fecha de Ensayo: 26/08/2015

**Método a Utilizar: B**

Peso Inicial	(g)	A	5000
Pasa 3/4 y se Retiene en 1/2	(g)		2500
Pasa 1/2 y se Retiene en 3/8	(g)		2500
Peso de la Muestra después de las Revoluciones	(g)	B	4348

Porcentaje de Desgaste (%)	$[(A - B) / A] * 100$	13.040 %
<b>% De Desgaste</b>		13%

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

## ANEXO 5. PESOS VOLUMÉTRICOS GRAVA TMN ¾”



### DETERMINACIÓN DE LOS PESOS VOLUMÉTRICOS Y VACÍOS EN EL AGREGADO ASTM C 29



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Trituradora INTREC  
 Descripción: Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con TMN ¾”  
 Fecha de Ensayo: 03/09/2015

ALTURA 0.165 m	DIAMETRO 0.150 m	PESO MOLDE 2821.0 g.	VOLUMEN 0.0029 m <sup>3</sup>
-------------------	---------------------	----------------------	----------------------------------

#### PESO VOLUMETRICO SUELTO

Peso de la Muestra + Molde	Peso del Molde	Peso Neto	Volumen	Peso Volumétrico
7.017 Kg	2.821 Kg	4.196 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1447 Kg/m <sup>3</sup>
7.063 Kg	2.821 Kg	4.242 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1463 Kg/m <sup>3</sup>
7.022 Kg	2.821 Kg	4.201 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1449 Kg/m <sup>3</sup>
<b>PROMEDIO</b>				<b>1450 Kg/m<sup>3</sup></b>

#### PESO VOLUMETRICO VARRILLADO

Peso de la Muestra + Molde	Peso Del Molde	Peso Neto	Volumen	Peso Volumétrico
7.590 Kg	2.821 Kg	4.769 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1644 Kg/m <sup>3</sup>
7.563 Kg	2.821 Kg	4.742 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1635 Kg/m <sup>3</sup>
7.588 Kg	2.821 Kg	4.767 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1644 Kg/m <sup>3</sup>
<b>PROMEDIO</b>				<b>1640 Kg/m<sup>3</sup></b>

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

## ANEXO 6. PESOS VOLUMÉTRICOS GRAVA CERO



### DETERMINACIÓN DE LOS PESOS VOLUMÉTRICOS Y VACÍOS EN EL AGREGADO ASTM C 29



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA  
 Descripción: Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro Grava Cero  
 Fecha de Ensayo: 07/09/2015

ALTURA 0.165 m	DIAMETRO 0.150 m	PESO MOLDE 2820.0 g.	VOLUMEN 0.0029 m <sup>3</sup>
-------------------	---------------------	----------------------	----------------------------------

#### PESO VOLUMETRICICO SUELTO

Peso de la Muestra + Molde	Peso del Molde	Peso Neto	Volumen	Peso Volumétrico
7.257 Kg	2.820 Kg	4.437 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1530 Kg/m <sup>3</sup>
7.261 Kg	2.820 Kg	4.441 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1531 Kg/m <sup>3</sup>
7.270 Kg	2.820 Kg	4.450 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1534 Kg/m <sup>3</sup>
<b>PROMEDIO</b>				<b>1530 Kg/m<sup>3</sup></b>

#### PESO VOLUMETRICICO VARRILLADO

Peso de la Muestra + Molde	Peso del Molde	Peso Neto	Volumen	Peso Volumétrico
7.802 Kg	2.817 Kg	4.985 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1719 Kg/m <sup>3</sup>
7.832 Kg	2.817 Kg	5.015 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1729 Kg/m <sup>3</sup>
7.821 Kg	2.817 Kg	5.004 Kg	0.0029 m <sup>3</sup>	1726 Kg/m <sup>3</sup>
<b>PROMEDIO</b>				<b>1730 Kg/m<sup>3</sup></b>

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

**ANEXO 7. PESOS VOLUMÉTRICOS ARENA TRITURADA**



**DETERMINACIÓN DE LOS PESOS VOLUMÉTRICOS Y VACÍOS EN EL AGREGADO ASTM C 29**



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA  
 Descripción: Arena Triturada Mal Graduada, Color Gris Oscuro  
 Fecha de Ensayo: 08/09/2015

ALTURA 0.165 m	DIAMETRO 0.150 m	PESO MOLDE 2821.0 g.	VOLUMEN 0.0029 m3
-------------------	---------------------	----------------------	----------------------

**PESO VOLUMETRICO SUELTO**

Peso de la Muestra + Molde	Peso del Molde	Peso Neto	Volumen	Peso Volumétrico
7.349 Kg	2.821 Kg	4.528 Kg	0.0029 m3	1553 Kg/m3
7.345 Kg	2.821 Kg	4.524 Kg	0.0029 m3	1552 Kg/m3
7.452 Kg	2.821 Kg	4.631 Kg	0.0029 m3	1588 Kg/m3
<b>PROMEDIO</b>				<b>1560 Kg/m3</b>

**PESO VOLUMETRICO VARRILLADO**

Peso de la Muestra + Molde	Peso del Molde	Peso Neto	Volumen	Peso Volumétrico
7.964 Kg	2.821 Kg	5.143 Kg	0.0029 m3	1764 Kg/m3
7.962 Kg	2.821 Kg	5.141 Kg	0.0029 m3	1763 Kg/m3
7.959 Kg	2.821 Kg	5.138 Kg	0.0029 m3	1762 Kg/m3
<b>PROMEDIO</b>				<b>1760 Kg/m3</b>

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

## ANEXO 8. ABSORCIÓN GRAVA TMN 3/4"



### Determinación del Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso ASTM C127 / AASTHO T 85



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Trituradora INTREC  
 Descripción: Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con TMN 3/4"  
 Fecha de Ensayo: 16/09/2015

Muestra No.		1	2
Peso Muestra Seca (g)	A	2,010.10 g	2,009.70 g
Peso de Material S.S.S. (g)	B	2,039.00 g	2,039.20 g
Peso del Material Sumergido (g)	C	1,301.50 g	1,299.00 g
Peso Específico Seco	A / (B - C)	2.726	2.715
<b>Peso Específico Seco Promedio</b>		<b>2.720</b>	
Peso Específico S.S.S.	B / (B - C)	2.765	2.755
<b>Peso Específico S.S.S. Promedio</b>		<b>2.760</b>	
Peso Específico Aparente	A / (A - C)	2.837	2.828
<b>Peso Específico Aparente Promedio</b>		<b>2.832</b>	
Porcentaje de Absorción	(B - A) / A	1.438 %	1.468 %
<b>Porcentaje de Absorción Promedio</b>		<b>1.453 %</b>	

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

**ANEXO 9. ABSORCIÓN GRAVA CERO**



**Determinación del Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso ASTM C127 /AASTHO T 85**



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA  
 Descripción: Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro Grava Cero  
 Fecha de Ensayo: 21/09/2015

Muestra No.		1	2
Peso de Material S.S.S. (g)	S	504.65 g	501.09 g
Peso Seco (g)	A	495.50 g	491.80 g
Peso de Picnómetro + Agua (g)	B	1,473.70 g	1,473.70 g
Peso de Picnómetro + Agua + Material (g)	C	1,779.72 g	1,778.33 g
Peso Específico S.S.S.	$S / (B + S - C)$	2.541	2.551
<b>Peso Específico SSS Promedio</b>		<b>2.546</b>	
Peso Específico Seco	$A / (B + S - C)$	2.495	2.503
<b>Peso Específico Seco Promedio</b>		<b>2.495</b>	
Peso Específico Aparente	$A / (B + A - C)$	2.615	2.628
<b>Peso Específico Aparente Promedio</b>		<b>2.621</b>	
Porcentaje de Absorción	$[(S - A) / A] * 100$	1.847 %	1.889 %
<b>Porcentaje de Absorción Promedio</b>		<b>1.87%</b>	

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

## ANEXO 10. ABSORCIÓN ARENA TRITURADA



### Determinación del Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso ASTM C127 / AASTHO T 85



Proyecto: Diseño de Mezclas Asfálticas con Cal Hidratada  
 Solicitante: Trabajo de Graduación  
 Procedencia: Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA  
 Descripción: Arena Triturada Mal Graduada, Color Gris Oscuro  
 Fecha de Ensayo: 24/09/2015

Muestra No.		1	2
Peso de Material S.S.S. (g)	S	500.60 g	501.70 g
Peso Seco (g)	A	486.70 g	487.50 g
Peso de Picnómetro + Agua (g)	B	1,473.70 g	1,473.70 g
Peso de Picnómetro + Agua + Material (g)	C	1,777.10 g	1,778.20 g
Peso Específico S.S.S.	S / (B + S - C)	2.539	2.544
<b>Peso Específico SSS Promedio</b>		<b>2.541</b>	
Peso Específico Seco	A / (B + S - C)	2.468	2.472
<b>Peso Específico Seco Promedio</b>		<b>2.468</b>	
Peso Específico Aparente	A / (B + A - C)	2.655	2.664
<b>Peso Específico Aparente Promedio</b>		<b>2.660</b>	
Porcentaje de Absorción	[(S - A) / A]*100	2.856 %	2.913 %
<b>Porcentaje de Absorción Promedio</b>		<b>2.88%</b>	

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Jefe de Laboratorio

Elaborado por:		Aprobado por:

### ANEXO 11. RAZÓN DE CORRELACIÓN DE ESTABILIDAD

<b>Volumen de Especimen, cm<sup>3</sup></b>	<b>Espesor Aproximado de Especimen, pulg.</b>	<b>mm</b>	<b>Razón de correlación</b>
200 a 213	1	25.4	5.56
214 a 225	1 1/16	27.0	5.00
226 a 237	1 1/8	28.6	4.55
238 a 250	1 3/16	30.2	4.17
251 a 264	1 ¼	31.8	3.85
265 a 276	1 5/16	33.3	3.57
277 a 289	1 3/8	34.9	3.33
290 a 301	1 7/16	36.5	3.03
302 a 316	1 ½	38.1	2.78
317 a 328	1 9/16	39.7	2.50
329 a 340	1 5/8	41.3	2.27
341 a 353	1 11/16	42.9	2.08
354 a 367	1 ¾	44.4	1.92
368 a 379	1 13/16	46.0	1.79
380 a 392	1 7/8	47.6	1.67
393 a 405	1 15/16	49.2	1.56
406 a 420	2	50.8	1.47
421 a 431	2 1/16	52.4	1.39
432 a 443	2 1/8	54.0	1.32
444 a 456	2 3/16	55.6	1.25
457 a 470	2 ¼	57.2	1.19
471 a 482	2 5/16	58.7	1.14
483 a 495	2 3/8	60.3	1.09
496 a 508	2 7/16	61.9	1.04
509 a 522	2 ½	63.5	1.00
523 a 535	2 9/16	65.1	0.96
536 a 546	2 5/8	66.7	0.93
547 a 559	2 11/16	68.3	0.89
560 a 573	2 ¾	69.9	0.86
574 a 585	2 13/16	71.4	0.83
586 a 598	2 7/8	73.0	0.81
599 a 610	2 15/16	74.6	0.78
611 a 625	3	76.2	0.76

**ANEXO 12. ECUACION DE MEJOR AJUSTE PARA EL EQUIPO BAJO  
PRUEBA**

$$F_i = A + B(Lc) + C(Lc)^2$$

Coeficientes	A	B	C
Kg	4.10314	4.33583	-8.22093E-05

Donde:

Fi: es la fuerza de la ecuación de mejor ajuste que se aplica al equipo bajo prueba, en Kg.

Lc: es la lectura observada en el indicador bajo una fuerza aplicada y corregida a la temperatura de calibración y calculada por medio de la siguiente ecuación, en las unidades del indicador del equipo bajo Prueba.

$$* Lc = Li( 1 + 0.00027(T-Tc))$$

Li: es la lectura observada en el indicador bajo una fuerza aplicada, a la temperatura T (°C) del equipo a prueba.

Tc: es la temperatura en el momento de la calibración del equipo a prueba, la cual fue de 31°C.