

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



**“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA, MEDIANTE LA
METODOLOGÍA MARSHALL, UTILIZANDO ASFALTO
ESPUMADO”**

PRESENTADO POR:

**GABRIELA REGINA MÉNDEZ GONZÁLEZ
JONATHAN ELISEO MORÁN GUTIÉRREZ
LIDIA CAROLINA PINEDA RAMOS**

PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO(A) CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO 2014

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

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 :

Ph.D. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

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 ASFÁLTICA TIBIA, MEDIANTE LA
METODOLOGÍA MARSHALL, UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO”**

Presentado por

:

**GABRIELA REGINA MÉNDEZ GONZÁLEZ
JONATHAN ELISEO MORÁN GUTIÉRREZ
LIDIA CAROLINA PINEDA RAMOS**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores

:

**ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES
ING. LUIS ANTONIO LÓPEZ LEMUS**

San Salvador, Agosto 2014

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES

ING. LUIS ANTONIO LÓPEZ LEMUS

AGRADECIMIENTOS:

A MIS PADRES: Francisco Antonio Méndez Ramos y Sandra Celina González de Méndez, por darme la vida y la inteligencia, por ser parte fundamental de mi vida y darme su apoyo en todos mis proyectos desde mi infancia. El camino que hemos recorrido para llegar a esta meta no ha sido fácil, pero sin ustedes a mi lado, jamás los hubiera podido superar.

A MI FAMILIA: Mi hermana Celina Michelle Méndez González; mis tías Flor de María Quiñones, María Irma Ramos y María Delfina González por estar siempre presentes en todos los aspectos de mi vida y darme su apoyo incondicional en todos los momentos difíciles.

A MI NOVIO: el Ing. Ricardo Antonio Escobar Orellana (Miau o Satanás), por amarme con locura y apoyarme con todo en mi trabajo de graduación. Te amo mucho y espero que esto nos sirva para que podamos ser prósperos en nuestra vida juntos. Estos seis años junto a ti han sido los mejores y quiero seguir contando muchos años más.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS DE TESIS: Lidia Carolina Pineda Ramos y Jonathan Eliseo Morán Gutiérrez; este trabajo no hubiera sido posible sin su gran ayuda y me enseñaron mucho en esta travesía juntos. Deseo tener el honor de graduarme con ustedes, de poder seguir trabajando con ustedes en el plano profesional y estar en contacto para vernos de vez en cuando.

A MIS ASESORES: Al Ing. Dilber Antonio Sánchez y al Ing. Luis Antonio López Lemus, por otorgarnos todos sus conocimientos, ayuda y apoyo, para la realización de nuestro trabajo de graduación. Su gran interés y entusiasmo, nos fueron dando la determinación y coraje para salir adelante.

A TODOS LOS PROFESIONALES Y DEMÁS PERSONAS: Al Ing. Otto Rivera por brindarnos su entero apoyo y permiso para el uso de las instalaciones y equipo del laboratorio de la Planta de Mezclas Asfálticas de CONSTRUCTORA DISA, S.A. de C.V.

Además de a las personas que laboran en la planta asfáltica de CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V. por atendernos y darnos su aporte para lograr este proyecto. Mencionado a Carmen Ramos, Henry Pérez, Nelson y Ricardo Méndez.

Gabriela Regina Méndez González.

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS: Por permitirme llegar a este punto de mi vida, por darme las armas necesarias para seguir adelante, la capacidad de poder estudiar y la sabiduría para entender las cosas más difíciles. Tú has hecho de mi lo que hoy soy una profesional y con mucho orgullo.

A MIS PADRES: Edith Elizabeth Ramos y Leonardo Pineda Aguilar quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Los amo con mi vida.

A MIS HERMANOS: Eva Cecilia Pineda de Quevedo, quien es mi segunda madre, has sido un pilar para mi formación profesional, siempre me motivaste y me diste todo tu apoyo cuando sentía que ya no podía seguir; a Claudia Sofía Pineda mi inseparable amiga, que siempre me ayuda y aconseja para que las cosas me salgan bien y a mi hermano Yovani Alexander Pineda quien a pesar de la distancia siempre está pendiente de mí y dándome más de lo que necesito; son los mejores hermanos que pueda tener; los amo.

A MI NOVIO: Gilberto Luis Quijada Olmedo quien más que mi pareja es mi mejor amigo, gracias por tu paciencia y comprensión, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas, por ayudarme a madurar y ser una mejor persona cada día. Tu amor y tus sabios consejos me hicieron ver que no hay que rendirse cuando se anhela algo; te amo con todo mi corazón.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS: Gabriela Regina Méndez y Jonathan Eliseo Morán, quienes trabajaron conmigo hombro a hombro durante este trabajo de graduación, poniendo lo mejor de su energía y empeño por el bien de nuestra

formación profesional, espero poder trabajar en un futuro con ustedes y que siempre nos recordemos con cariño y sigamos compartiendo esta bonita amistad.

A NUESTROS ASESORES: Ing. Luis Antonio López e Ing. Dilber Antonio Sánchez por manifestar interés en dirigir nuestro trabajo de grado, por su confianza, paciencia y orientación que nos brindaron para la realización de esta tesis. Gracias por compartir sus conocimientos, dentro y fuera de la asesoría, haciendo posible que nuestra formación profesional sea una realidad hoy en día.

A TODOS LOS PROFESIONALES Y DEMAS PERSONAS: Agradezco a constructora DISA S.A de C.V. por su fiel ayuda para realizar nuestro trabajo de graduación, especialmente al Ing. Miguel Ángel Díaz y al Ing. Otto Rivera quienes muy amablemente nos proporcionaron todos los materiales y el equipo para realización de los ensayos necesarios para la tesis; infinitas gracias además a todo el personal del Laboratorio de Planta asfáltica que se portó muy bien en nuestra estadía en el laboratorio.

Lidia Carolina Pineda Ramos

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS: Todopoderoso, por manifestarme su amor en cada una de las personas que aparecieron como ángeles en todo el transcurso de mis estudios que me ayudaron y que me apoyaron en los buenos y en los malos momentos.

A MIS PADRES: José Eliseo Morán Melara y María Sara Gutiérrez de Morán, por darme la vida y la oportunidad de cumplir mi sueño de ser un profesional, por ser los pilares fundamentales para culminar mis estudios, brindándome su amor incondicional, demostrándomelo con su apoyo moral y económico, porque padres como ustedes no hay en este mundo. Los amo padres con toda mi alma y corazón y sé que de igual forma lo hacen conmigo.

A MI FAMILIA: Mis hermanos, Carlos Javier y Jorge Luis Morán Gutiérrez, por alegrarse conmigo cada vez que lograba un avance con éxito en este trabajo de graduación, demostrándome que somos los mejores hermanos del mundo. Además a todos mis familiares que estuvieron pendientes del desarrollo de mi trabajo de graduación, mostrándome su cariño inmenso, mis abuelitos, mis primos y primas , mis tías y tíos, a los cuales quiero y aprecio mucho.

A MI NOVIA: Lyssie Gabriela Mena Orellana, por ser esa persona que llena mi vida día a día con amor y esperanza y por estar a mi lado como nadie lo hace para apoyarme en todas las decisiones que han marcado mi vida en este trayecto de mis estudios. Porque sin tu amor y compañía todo me hubiera resultado muy complicado y porque estoy seguro que tu amor para mí, es el más sincero que he conocido y con el que quiero forjar un futuro hermoso.

A MIS GRANDES COMPAÑERAS Y AMIGAS DE TESIS: Lidia Carolina Pineda Ramos y Gabriela Regina Méndez González; por ser únicas y excepcionales en este trabajo que realizamos juntos, por que aprendimos mucho todos de todos, pero sobre todo por apoyarme de la manera como lo hicieron conmigo. Gracias, Reggie

por ser tan paciente y Carito por ser tan disciplinada con el trabajo realizado y a los dos porque no desfallecieron conmigo y llegamos hasta el final. Estoy seguro que seguiremos siendo grandes amigos y seremos excelentes profesionales.

A MIS ASESORES: Ing. Dilber Antonio Sánchez e Ing. Luis Antonio López Lemus, porque junto a nuestro grupo de trabajo de graduación tomaron este reto para llevarlo adelante, brindándonos sus conocimientos y estando dispuestos a ayudarnos en todo y especialmente por apoyarme tomando en cuenta mi situación laboral ya que sin su ayuda no hubiera logrado este gran triunfo.

A MIS AMIGOS DE LA U: Ronald, porque sos un gran amigo que me ayudaste y diste a conocer muchas cosas, por corregirme en lo indebido y porque siempre me brindaste tu amistad sincera. A Fran Burgos, a Frank Cisneros, Pablo Sánchez y Felipe, porque vivimos muchísimos momentos de alegría y desconsuelo producto del estudio al que enfrentamos con valor. A mis grandes amigos, Elder Santos y Eleazar Gil (Elio) que sufrimos, reímos y vivimos muchas experiencias inolvidables. Y a todos los compañeros que formaron parte de esta inolvidable experiencia.

A TODOS LOS PROFESIONALES Y DEMÁS PERSONAS: Al Ing. Otto Rivera por contar con su aprobación al utilizar el equipo y las instalaciones de la empresa DISA S.A de C.V que patrocinó nuestro trabajo de graduación, la cual fue indispensable para finalizarlo satisfactoriamente, y también aquellos empleados que nos ayudaron en el desarrollo de este trabajo como lo son Carmen Ramos, Henry Pérez, Nelson y Ricardo Méndez.

Jonathan Eliseo Morán Gutiérrez

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 ANTECEDENTES	5
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	10
1.5 OBJETIVOS	12
1.6 ALCANCES	14
1.7 LIMITACIONES	16

CAPÍTULO II AGREGADOS PÉTREOS Y COMPOSICION GRANULOMETRICA BAILEY

2.1 MATERIALES PÉTREOS	19
2.1.1 Definición de agregado	19
2.2 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS QUE SE UTILIZAN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	19
2.2.1 Graduación y tamaño máximo de la partícula.	20
2.2.1.1 Graduación	20
2.2.1.2 Tamaño de las partículas.....	20
2.2.1.2.1 Tamaño máximo nominal de partícula.....	20
2.2.1.2.2 Tamaño máximo de partícula.....	21
2.2.2 Textura superficial.	21
2.2.3 Limpieza.	21
2.2.4 Capacidad de absorción.....	22
2.2.5 Dureza.	22
2.2.6 Afinidad por el asfalto.....	23

2.2.7 Forma de la partícula.....	23
2.2.8 Peso específico.....	24
2.3 ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PÉTREOS PARA OCUPARLOS EN MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE.	26
2.3.1 Importancia del muestreo y reducción del agregado.	26
2.3.1.1 Muestreo de agregados	26
2.3.1.2 Reducción de muestras de agregado a tamaño de ensayo.	27
2.3.2 Ensayos que contribuyen en el diseño de una mezcla asfáltica.....	28
2.3.2.1 Análisis por tamizado de agregados grueso y fino.	28
2.3.2.2 Materiales más finos que pasan el tamiz de 75 μm (no. 200) en agregado mineral por lavado.....	29
2.3.2.3 Gravedad específica y absorción del agregado fino.	30
2.3.2.4 Gravedad específica y absorción del agregado grueso.	32
2.3.3 Ensayos que se utilizan para conocer la calidad de los agregados	33
2.4 ESPECIFICACIONES PARA AGREGADOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS.	34
2.4.1 Especificaciones técnicas.....	34
2.4.2 Requisitos que deben cumplir los agregados	35
2.4.2.1 Requisito que debe cumplir el Agregado Grueso.....	35
2.4.2.2 Requisito que debe cumplir el Agregado Fino.	35
2.4.2.2.1 Especificaciones para agregado fino en mezclas de pavimentos bituminosos, según AASHTO M 29-03.....	36
2.5 METODOLOGÍA DE COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA BAILEY.	37
2.5.1 Definición de la metodología.....	37
2.5.2 Desarrollo de metodología.....	37
2.5.3 Principios básicos de la metodología.	38
2.5.3.1 Empaquetamiento de los agregados	38
2.5.3.2 Definición de agregado grueso y fino.	38
2.5.4 Principales pasos en el método Bailey.....	39
2.5.4.1 Combinación de agregados por volumen.....	39
2.5.4.1.1 Peso unitario suelto del agregado grueso	40
2.5.4.1.2 Peso unitario compactado del agregado grueso	40
2.5.4.1.3 Peso unitario escogido del agregado grueso	41

2.5.4.1.4	Peso unitario compactado del agregado fino.....	43
2.5.5	Análisis de diseño de mezcla.....	43
2.5.5.1	Relación Agregado Grueso.....	46
2.5.5.2	Relación agregado fino grueso.....	46
2.5.5.3	Relación agregado fino.....	47

CAPÍTULO III TECNOLOGÍA DE ASFALTO ESPUMADO

3.1	ASFALTO.....	49
3.1.1	Definición de asfalto.....	49
3.1.2	Caracterización de los materiales asfálticos.....	50
3.1.3	Clasificación de asfaltos para pavimentación.....	53
3.1.3.1	Cementos asfálticos.....	53
3.1.3.2	Asfaltos diluidos.....	59
3.1.3.3	Emulsiones asfálticas.....	59
3.1.3.4	Asfaltos modificados.....	60
3.2	RESUMEN DE ENSAYOS QUE SE LE REALIZAN AL ASFALTO PARA DETERMINAR SUS PROPIEDADES.....	61
3.2.1	Muestreo de materiales bituminosos.....	61
3.2.2	Ensayo de punto de ablandamiento del asfalto. (Método del Anillo y la Esfera).....	61
3.2.3	Gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos.....	62
3.2.4	Penetración de materiales bituminosos.....	63
3.2.5	Punto de flama y llama por la copa abierta de Cleveland.....	63
3.2.6	Solubilidad de materiales bituminosos.....	64
3.2.7	Ductilidad de materiales bituminosos.....	64
3.2.8	Viscosidad cinemática de asfaltos (betunes).....	65
3.2.9	Procedimiento para cartas de viscosidad-temperatura de productos de petróleo líquido.....	65
3.2.10	Efecto del calor y el aire en materiales asfálticos.....	66
3.3	MEZCLA ASFÁLTICA.....	66

3.3.1 Definición de mezcla asfáltica	66
3.3.2 Clasificación de mezcla asfáltica.	67
3.3.3 Características de la mezcla asfáltica.	69
3.3.4 Propiedades de mezcla asfáltica.	70
3.3.5 Mezcla Asfáltica Tibia.....	72
3.3.5.1 Definición de una mezcla asfáltica tibia.....	72
3.3.5.2 Antecedentes de Mezclas asfálticas tibias.....	73
3.3.5.3 Tecnologías que producen mezcla asfáltica tibia.....	75
3.3.5.3.1 Procesos de espumación	75
3.3.5.3.2 Aditivos orgánicos.	81
3.3.5.3.3 Aditivos químicos.	83
3.4 MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA CON LA TECNOLOGÍA ASTEC GREEN DE ASFALTO ESPUMADO.....	85
3.4.1 Historia de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado	85
3.4.2 Asfalto espumado.....	87
3.4.3 Propiedades del asfalto espumado	88
3.4.3.1 Razón de expansión	88
3.4.3.2 Vida Media.....	88
3.4.3.3 Características de la razón de expansión y la vida media.....	88
3.4.4 Definición de mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.....	89
3.4.5 Características de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.....	90
3.4.6 Ventajas de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.	92
3.4.7 Aspectos comparativos entre Mezcla asfáltica en caliente MAC y Mezcla asfáltica tibia MAT.	92
3.4.8 Producción de asfalto espumado.....	94
3.4.8.1 Sistema ASTEC GREEN para asfalto espumado.	94
3.4.9 Aplicaciones de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.	103
3.4.9.1 Reciclado de pavimentos asfálticos.....	103
3.4.9.2 Estabilización de suelos	104
3.4.10 Evaluación de desempeño a nivel teórico de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado	105
3.4.10.1 Susceptibilidad a la humedad.	105
3.4.10.2 Resistencia al ahuellamiento.....	107

3.4.10.3 Baja temperatura de agrietamiento.....	107
3.4.10.4 Resistencia a la fatiga	108
3.4.10.5 Rigidez de la mezcla.....	108
3.4.11 Beneficios del asfalto espumado como factor constructor de pavimentos.	109

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA CON ASFALTO ESPUMADO.

4.1 MÉTODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA CON ASFALTO ESPUMADO.	112
4.1.1 Metodología.....	112
4.1.2 Descripción de la metodología.....	112
4.1.3 Especificaciones de la metodología.	113
4.1.4 Evaluación y ajuste de la mezcla de diseño.	115
4.1.5 Ensayos realizados a la Mezcla Asfáltica Compactada.	116
4.1.5.1 Gravedad Específica Teórica Máxima y Densidad de Mezclas Bituminosas para Pavimentación.	116
4.1.5.2 Determinación de la Gravedad Específica Bulk.	116
4.1.5.3 Resistencia de Mezclas Bituminosas al Flujo Plástico Utilizando el Aparato Marshall.....	116
4.1.5.4 Análisis de Densidad y Vacíos.....	117
4.1.5.5 Daño inducido por la humedad.....	117
4.2 ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PARA DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	118
4.2.1 Análisis Granulométrico.....	119
4.2.2 Resumen de resultados.	122
4.2.3 Granulometría Bailey para determinación de porcentajes de agregados.	124
4.2.4 Combinación granulométrica.....	125
4.2.5 Estimación de porcentaje óptimo teórico de asfalto.....	127
4.3 TRABAJO DE LABORATORIO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA EN CALIENTE.	130

4.3.1 Gravedad Específica Bulk de Mezclas Asfálticas en Caliente Compactadas Utilizando Especímenes Saturados Superficialmente Secos.....	135
4.3.2 Gravedad Específica Teórica Máxima y Densidad de Mezclas Bituminosas de Pavimentación.....	137
4.3.3 Resistencia de Mezclas Bituminosas al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Utilizando el Aparato Marshall.....	138
4.3.4 Análisis e interpretación de resultados.....	141
4.3.4.1 Densidad.....	141
4.3.4.2 Porcentaje de Vacíos de Aire.....	141
4.3.4.3 Vacíos del Agregado Mineral (VMA).....	142
4.3.4.5 Determinación de contenido óptimo de asfalto.....	143
4.4 PUNTO DE COMPROBACIÓN.....	148
4.4.1 Extracción Cuantitativa del Ligante Asfáltico de Mezclas Asfálticas en Caliente.....	148
4.4.2 Análisis Mecánico del Agregado Extraído.....	149
4.4.3 La Resistencia de la Mezcla Bituminosa Compactada al Daño por Humedad Inducido.....	151
4.5 GENERACIÓN CURVA DE COMPACTACIÓN A TEMPERATURA DE CAMPO.....	153
4.5.1 Gravedad Específica Teórica Máxima.....	153
4.5.2 Gravedad específica bulk.....	153
4.5.3 Determinación del porcentaje de vacíos.....	156
4.5.4 Curva de compactación.....	157

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFALTICA TIBIA

5.1 TRABAJO DE LABORATORIO PARA ELABORACION DE ESPECIMENES.....	159
5.2 ELABORACION Y RESULTADOS DE ENSAYOS.....	165
5.2.1 Gravedad específica Bulk.....	165
5.2.2 Gravedad Específica Teórica Máxima.....	168
5.2.3 Determinación de porcentaje de vacíos.....	170
5.3 GERERACIÓN DE CURVA DE COMPACTACIÓN.....	171

5.3.1 Compactación a temperatura de laboratorio.....	172
5.3.2 Compactación a temperatura de campo.	174
5.4 EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE LA MEZCLA ASFALTICA TIBIA.	178
5.5 CONCLUSIONES.....	182
5.6 RECOMENDACIONES	184
5.7 BIBLIOGRAFÍA.....	185
ANEXOS	189
ANEXO 1: RAZÓN DE CORRELACIÓN DE ESTABILIDAD.....	190
ANEXO 2: ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS DE GRAVA TMN $\frac{3}{4}$ ".....	191
ANEXO 3: PESO VOLUMETRICO Y VACÍOS EN EL AGREGADO TMN $\frac{3}{4}$ ".....	192
ANEXO 4: ENSAYO DE PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS DE TMN $\frac{3}{4}$ ".....	193
ANEXO 5: PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO TMN $\frac{3}{4}$ ".....	194
ANEXO 6: PARTÍCULAS DE CARAS FRACTURADAS DEL AGREGADO TMN $\frac{1}{2}$ ".	195
ANEXO 7: PESO VOLUMETRICOS Y VACÍOS EN EL AGREGADO TMN $\frac{1}{2}$ ".	196
ANEXO 8: PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS DE GRAVA TMN $\frac{1}{2}$ ".	197
ANEXO 9: PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO TMN $\frac{1}{2}$ "...	198
ANEXO 10: EQUIVALENTE DE ARENA.....	199
ANEXO 11: PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO.....	200
ANEXO 12: PESO VOLUMETRÍCO Y VACÍOS EN EL AGREGADO FINO.....	201

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Muchas de las preocupaciones mundiales con respecto al deterioro de nuestro planeta Tierra incluyen o tienen relación con los procesos llevados a cabo para el desarrollo económico y social de los diferentes países del mundo, por lo que no podemos evitar hablar que dentro de estos proyectos se incluyen los carreteros, que de alguna forma la práctica de producción de ellos abona al deterioro antes mencionados. Esto ha despertado el interés por disminuir la incidencia en el daño ocasionado, implementando procesos y tecnologías que bajan los niveles de deterioro acrecentados por las prácticas comunes de proyectos o metodologías que tienen mayor influencia como procesos de deterioro mundial.

Es por esto que con respecto a tecnologías de mezclas asfálticas para proyectos de carreteras se están desarrollando metodologías que ayudan a la disminución del problema antes mencionado, una de estas metodologías es la fabricación y diseño de mezclas asfálticas tibias con asfaltos espumados que ofrecen una serie de ventajas tanto económicas, sociales como ambientales que se mencionarán en el cuerpo del trabajo de graduación.

El presente documento se enfoca en la propuesta del diseño de una mezcla asfáltica tibia, a partir del diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Marshall, utilizando asfalto espumado.

La investigación pretende dar un medio para satisfacer la creciente demanda que existe en el país por adoptar medidas que contribuyan al cuidado del medio ambiente en el ámbito de la construcción de carreteras.

Por tales razones se pretende realizar el diseño de una mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado que permita disminuir de manera drástica las emisiones de dióxido de carbono y otros gasóleos a la atmósfera, cumpliéndose de esta manera lo

estipulado en el Protocolo de Kioto, el cual manifiesta medidas jurídicamente vinculantes de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

La propuesta para el diseño de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, primeramente consiste en hacer el análisis granulométrico de los agregados pétreos, utilizando la composición volumétrica propuesta por el método Bailey. Continuando con el procedimiento, en base al método Marshall, se hará el diseño de la mezcla asfáltica en caliente, asumiendo un contenido óptimo de asfalto teórico, calculado de acuerdo a los requerimientos del Instituto del Asfalto en su Publicación “Método de Diseño de Mezcla” (MS-2), Sexta Edición; posteriormente se procederá a realizar las briquetas para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente para obtener un contenido óptimo de asfalto real y de los cuales se generarán los gráficos de porcentaje de vacíos, VFA, VMA, densidad, estabilidad y flujo, además se elaborarán briquetas compactadas a diferentes temperaturas, con la finalidad de generar una gráfico de temperatura vrs vacíos del cual se obtendrá la temperatura óptima de compactación a nivel de laboratorio. Al término del diseño de la mezcla asfáltica en caliente, se continuará con la elaboración de la mezcla asfáltica tibia a través de la tecnología de asfalto espumado, con el objetivo de obtener una muestra para la elaboración de briquetas, las cuales se ensayarán a diferentes temperaturas de compactación, obteniendo sus respectivos vacíos; reproduciendo las condiciones tanto en campo como en laboratorio con estos datos se generarán nuevamente los gráficos temperatura vrs vacíos y posteriormente se obtendrán las temperaturas que cumplan con un 4% de vacíos para la compactación en laboratorio y las que cumplan con un rango entre 7% y 10% de vacíos para la compactación en campo.

El trabajo de graduación se desarrollará en diferentes capítulos, iniciando con la información general del tema, el propósito de su realización, su justificación entre otra información que genera un amplio panorama de lo que tratará el trabajo de

graduación en sí. Se definirá de forma general las diferentes mezclas asfálticas existentes y de forma completa el diseño de la mezcla asfáltica en caliente con el método Marshall, ya que es una parte esencial para el desarrollo del diseño de la mezcla asfáltica tibia que también se define en el presente trabajo de graduación. A su vez se describirá el diseño de la mezcla asfáltica tibia, desde lo concerniente a los agregados que se usarán para dicha mezcla, su respectivo análisis granulométrico que se realizará por el método Bailey, hasta la espumación del cemento asfáltico AC-30 con la tecnología ASTEC GREEN.

Con respecto al asfalto espumado, describiremos la tecnología de producción, las aplicaciones en el área de construcción de pavimentos y las ventajas del sistema.

En lo concerniente a la teoría a investigar y las pruebas de laboratorio a realizar tanto a las briquetas hechas con un diseño de mezcla asfáltica en caliente y las que tienen un diseño de mezcla asfáltica tibia, se mostrarán los resultados de dichas pruebas y se elaborarán las conclusiones y recomendaciones de dicho trabajo.

1.2 ANTECEDENTES

Una mezcla asfáltica en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utiliza para capas superficiales de pavimentos flexibles. Las proporciones relativas de estos minerales junto con el asfalto determinan las propiedades físicas de la mezcla asfáltica.

Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C , su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

Existen formas distintas de volver tibia una mezcla asfáltica, entre las cuales están, usando aditivos orgánicos, aditivos químicos y espumación a base de agua. Entre los aditivos orgánicos más importantes se encuentra el Sasobit, creado por la compañía Sasol Wax Corporation que nos permite reducir la viscosidad del asfalto derritiendo cera modificada de tal forma que las cadenas de hidrocarburo tienen alrededor de 100 átomos de carbono, incrementando el punto de disolución de la misma.

El Evotherm Emulsion Technology es una combinación de químicos que permite que el agua se encuentre presente, mejorando de forma significativa la trabajabilidad, reduciendo la fricción que existe entre el asfalto y el agregado, permitiendo disminuir la temperatura de la mezcla asfáltica de entre 85°C a 115°C. Y finalmente la espumación a base de agua, la cual cuenta con un método para producir la mezcla asfáltica tibia, The Double Barrel Green System que consiste en una máquina de espumación desarrollada por Astec Industries que incorpora agua a una cámara donde se da el proceso de espumación unos segundos antes de mezclarse con el agregado.

El origen del asfalto espumado se remonta al año 1956 en la Universidad estatal de Iowa, Estados Unidos, donde se utilizó un proceso de inyección de vapor para formar la espuma.

La primera persona en darse cuenta del potencial de usar asfalto espumado como agente estabilizador fue el profesor Ladis Csanyi en la Estación Experimental de Ingeniería (Engineering Experiment Station) de la Universidad Estatal de Iowa (Iowa State University).

La primera aplicación de asfalto espumado aconteció en 1957 en un camino de Iowa, otras aplicaciones de campo incluyeron proyectos en Arizona (1960) y en Nipawin, Canadá (1960-62). Cabe mencionar que el proyecto original consistió en inyectar vapor a alta presión, con temperatura y presión controladas, sobre un cemento asfáltico calentado. Esto requería un equipo especial en el lugar de trabajo, tal como una caldera, lo que no resultaba muy práctico.

Esta tecnología fue posteriormente mejorada por la organización Mobil Oil de Australia en 1968, al adquirir los derechos de la patente de invención y desarrollar la primera cámara de expansión que mezclaba agua fría con asfalto caliente para generar espuma, transformándose así en un proceso más práctico, económico y menos peligroso. A pesar de ser una tecnología desarrollada hace más de 40 años, su uso se incrementó sólo a partir del año 1991, al expirar en ese año los derechos sobre la patente de invención de esta tecnología.

Con el desarrollo tecnológico y los avances de investigación, la tecnología de los asfaltos espumados para la elaboración de mezclas asfálticas tibias ha sido tema de desarrollo de las universidades de Alabama, NCAT (National Center for Asphalt Technology), Universidad de Texas, California, NAPA (Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos), NCHRP (National Cooperative Highway Research Program).

Latinoamérica no es la excepción en la investigación de esta nueva tecnología de asfaltos espumados, ya que se conoce de países que han llevado a cabo dicha investigación. La Universidad Católica de Chile publicó una revista realizada por Thenoux G. y Jamet A. en el año 2002, referente a los asfaltos espumados, en donde presentan diferentes ventajas de las mezclas con asfaltos espumados sobre las mezclas de asfalto tradicionales, entre otra información sobre dichos asfaltos.

Costa Rica en el año de 2011 hizo una publicación llamada “EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTOS ESPUMADOS EN TRAMOS DE PRUEBA”, la cual fue realizada por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la Universidad de Costa Rica, en donde se aborda como tema principal la estabilización de bases con asfaltos espumados, que es una de las aplicaciones de estos asfaltos.

En El Salvador a través de los tiempos se han diseñado y aplicado diferentes tipos de mezclas asfálticas en proyectos carreteros, predominando en caliente ante las mezclas en frío, en busca de mejoras en el comportamiento estructural del pavimento y en las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en sí.

Actualmente existen tecnologías de mezclas asfálticas tibias que no son conocidas en El Salvador; de la cual se cuenta solamente con dos tramos de prueba realizadas con el aditivo Evotherm, en este trabajo se abordará la metodología de mezcla asfáltica tibia utilizando asfaltos espumados, la cual puede ofrecer una serie de ventajas en relación a las mezclas asfálticas que actualmente se manejan en el país.

Esta metodología del asfalto espumado, en nuestro país es un tipo de técnica que no se ha podido implementar ya que no se contaba con el equipo necesario para su realización, por lo que no se cuenta con mezclas de prueba, ni mucho menos con pruebas de desempeño.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En El Salvador históricamente se han utilizado en proyectos de pavimentos flexibles dos tipos de mezclas asfálticas; en frío y en caliente. El tipo de mezcla asfáltica más utilizada ha sido la mezcla asfáltica en caliente, la cual consiste en una combinación de agregados pétreos y cemento asfáltico, que son debidamente calentados a altas temperaturas para que éstos se puedan mezclar y así colocarse en obra. Las características de este tipo de asfalto que lo hacen muy ventajoso son la estabilidad, durabilidad, resistencia a la fatiga, la resistencia al deslizamiento y la rápida apertura al tráfico. Dentro de las mezclas asfálticas, también existen en el medio las mezclas asfálticas en frío, cuya elaboración puede realizarse a temperatura ambiente debido a la utilización de emulsión asfáltica para cubrir los agregados pétreos. Este tipo de mezcla asfáltica se caracteriza por permanecer trabajable durante semanas tras su fabricación y por ser viable su almacenamiento; pero, tiene la desventaja de no soportar un tráfico pesado y que requiere de mayor tiempo para la apertura al tráfico por la evaporación del fluidificante.

La opción de la tecnología de las mezclas asfálticas tibias con asfaltos espumados para la construcción de pavimentos asfálticos, se vuelve una alternativa muy atractiva por las ventajas económicas, que presenta, en su producción y la colocación en obra; en contraposición con el uso de las mezclas asfálticas en caliente y frías. Debido a la creciente necesidad de encontrar soluciones que representen una economía en las inversiones, y que al mismo tiempo permitan un desarrollo sostenible, se considera importante que en El Salvador se inicie la investigación de esta tecnología.

La producción de mezclas asfálticas con asfalto espumado, en comparación con los métodos tradicionales de mezclado asfáltico en caliente, implica un ahorro en el consumo de energía en un 80%. Como ventajas que presenta está; su versatilidad, pues permite utilizar una gran variedad de agregados, el tiempo de proceso de

mezclado es sensiblemente menor para el material tratado con asfalto espumado, además que permanece trabajable por mayores períodos de tiempo. En la actualidad la mezcla asfáltica en caliente emite mucho dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, ayudando de alguna manera a que se originen diversos daños ambientales; por tanto, la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado se vuelve una tecnología verde y sustentable, que reduce la emisión de gases efecto invernadero. La decisión del uso de estas mezclas, dependerá de algunas consideraciones tales como: la comparación técnica, mejoras en la durabilidad de pavimentos, y optimización de recursos disponibles.

En nuestro país no se ha implementado esta tecnología para la construcción de carreteras, debido a que ninguna empresa constructora poseía la maquinaria necesaria para su fabricación, pero en la actualidad empresa constructora DISA S.A. de C.V. ya cuenta con ella, debido a esto es de importancia realizar esta investigación de manera que nos brinde las bases para que esta alternativa de diseño de mezcla sea una mejora para el desarrollo de las mezclas asfálticas en nuestro país.

En busca de la mejora antes mencionada el trabajo de graduación desarrollará el diseño de mezclas asfálticas tibias con asfalto espumado, el cuál debe cumplir parámetros exigidos en el instituto del asfalto y sus normas establecidas. El diseño será elaborado, de acuerdo a la metodología Marshall, primeramente como una mezcla asfáltica en caliente utilizando un cemento asfáltico AC 30 debido a su alta estabilidad a la temperaturas cálidas de la región central del país, posterior al diseño se producirá la mezcla asfáltica en la planta de constructora DISA S.A. de C.V., contando ya con la tecnología de asfaltos espumados que volverá la mezcla asfáltica en tibia. Seguidamente esta mezcla asfáltica tibia será ensayada en laboratorio y se buscará que esta mezcla a bajas temperaturas tenga las mismas propiedades que se logra obteniendo el contenido óptimo de asfalto con una mezcla asfáltica en caliente.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en el campo de los pavimentos flexibles, la incesante búsqueda por ser amigables con el medio ambiente y la creciente necesidad de cuidar nuestros recursos naturales; ha promovido la aceptación a nivel mundial, de las mezclas asfálticas tibias con todo tipo de aditivo. La mezcla asfáltica tibia cumple con lo establecido por el Protocolo de Kyoto que pretende reducir los gases de efecto invernadero que son lanzados a la atmósfera, haciendo que la mezcla asfáltica en caliente, quede obsoleta en diversos países.

A nivel Latinoamericano, la aplicación de la tecnología de los asfaltos espumados es muy limitada, encontrándose a la cabeza los países de Colombia y Chile, que cuentan con mayor experiencia en esa área. En Centroamérica, Costa Rica ha sido el primer país de la región en realizar estudios sobre esta nueva tendencia mundial que se encuentra respaldada y estudiada por el National Center for Asphalt Technologies (NCAT) y que está por ser aprobada por la American Society for Testing Materials (ASTM); garantizando ser un método confiable al que El Salvador debe incursionar para estar a la vanguardia y tener mayor competitividad en investigación ante los demás países de América Latina.

La mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado ofrece la viabilidad de ser más económico en muchos aspectos a nivel técnico, como el menor costo en manufactura y transporte, el tiempo de compactación y colocación de la mezcla con asfalto espumado es sensiblemente menor; permitiendo innovar y tener un crecimiento económico sustentable en los tiempos de crisis económicas, como se vive actualmente, por tanto su conocimiento y difusión se vuelve de importancia.

La alternativa en mezclas asfálticas tibias en mención busca mejorar los procesos de producción al disminuir la temperatura de la misma teniendo como resultado una mayor trabajabilidad, facilitándoles a los trabajadores el colocar y compactar

la mezcla en obra; permitiendo así, que los mismos tengan un menor riesgo de sufrir daños severos por las altas temperaturas con las que se manipulan las mezclas asfálticas en caliente.

1.5 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Elaborar el diseño de una mezcla asfáltica tibia mediante la metodología Marshall utilizando asfaltos espumados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Desarrollar el diseño de una mezcla asfáltica tibia mediante la tecnología de asfaltos espumados, con una combinación granulométrica de una mezcla asfáltica densa; elaborada con agregados de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$, que cumpla con la composición volumétrica de los requisitos del método Bailey.
- ✓ Diseñar la mezcla asfáltica tibia con la tecnología de asfaltos espumados mediante el método Marshall, para una mezcla asfáltica en caliente, utilizando cemento asfáltico AC-30.
- ✓ Realizar la comprobación granulométrica obtenida teóricamente, de manera que pueda ser verificada, y posteriormente reproducida su combinación.
- ✓ Evaluar los lineamientos establecidos en la metodología Marshall para la determinación del contenido óptimo teórico de asfalto y determinar el valor que será utilizado en el diseño de la mezcla en caliente realizada en laboratorio, el cual será utilizado para la mezcla asfáltica tibia.
- ✓ Definir las condiciones de temperatura del asfalto y porcentaje de agua inyectada que optimizan las propiedades de la espuma, siendo ellos la Razón de expansión y la vida media, que garanticen la correcta composición del asfalto espumado.

- ✓ Generar la curva de compactación de la mezcla asfáltica en caliente, para determinar la temperatura de la cual obtenga un porcentaje de vacíos del 7% requerido en campo.

- ✓ Generar la curva de compactación de la mezcla tibia con asfalto espumado, para determinar aquellas temperaturas que originen porcentajes de vacíos que varían del 7% requerido en campo.

1.6 ALCANCES

- ✓ La investigación abordará el diseño teórico y de laboratorio, de la mezcla asfáltica tibia, excluyendo para la presente; la realización de tramos de prueba.
- ✓ Se obtendrá un diseño de mezcla asfáltica tibia mediante el Método Marshall, utilizando la tecnología de asfalto espumado del equipo ASTEC GREEN, que constructora DISA S.A. de C.V. tiene en operación en su planta asfáltica.
- ✓ El diseño de mezcla asfáltica será realizado en laboratorio y su comportamiento se evaluará mediante una producción realizada en la planta asfáltica, donde posteriormente se realizarán los ensayos de control de calidad en laboratorio, para garantizar las propiedades de la mezcla asfáltica diseñada.
- ✓ La aplicación del diseño de mezcla asfáltica utilizando asfalto espumado, será exclusivamente para el uso como carpeta de rodadura, excluyendo cualquier otra utilidad que se le pueda dar a la mezcla asfáltica tibia desarrollada.
- ✓ Los resultados obtenidos del comportamiento de las mezclas asfálticas, con asfalto espumado serán objeto de un mayor conocimiento, para determinar la factibilidad de la mezcla, como un posible agente utilizado para carpeta asfáltica.

- ✓ El diseño realizado será de una mezcla asfáltica densa, analizada mediante las propiedades volumétricas Bailey, únicamente para el comportamiento de los agregados de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ y cemento asfáltico AC-30, proporcionados por constructora DISA S.A. de C.V.

1.7 LIMITACIONES

- ✓ El trabajo de graduación abordará solamente una investigación teórica y el diseño en laboratorio de la mezcla asfáltica en caliente, volviéndose tibia con la tecnología de asfaltos espumados, excluyendo para este la realización de un tramo de prueba con este tipo de mezcla.
- ✓ Para el diseño de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado sólo se utilizará la tecnología ASTEC GREEN, excluyendo para este trabajo el diseño con otras tecnologías para espumar el asfalto.
- ✓ Para el diseño de la mezcla asfáltica tibia, se realizarán los ensayos a los agregados de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " , $\frac{1}{2}$ " y arena triturada que serán proporcionados por la empresa constructora DISA S.A. de C.V.
- ✓ Para el diseño de la mezcla asfáltica tibia, no se llevará a cabo la realización de los respectivos ensayos al cemento asfáltico AC-30 proporcionado por la empresa constructora DISA S.A. de C.V.
- ✓ Para el análisis granulométrico se utilizará el método Bailey, rigiéndose la distribución y dosificación de agregados en base al análisis volumétrico que este método proporciona para mezclas densas.
- ✓ El tipo de cemento asfáltico utilizado para el diseño de la mezcla asfáltica tibia con asfaltos espumados se limitará al que será proporcionado por la empresa constructora DISA S.A. de C.V., siendo este un AC-30 que debe cumplir con tabla 2 según ASTM D 3381-09 para realizar sus diseños.

- ✓ Las muestras de la mezcla asfáltica tibia a ensayar en laboratorio tomarán directamente de la producción realizada en la planta asfáltica DISA S.A. de C.V, según la norma de muestreo AASHTO T 2-91 (2010).

CAPÍTULO II
AGREGADOS
PÉTREOS Y
COMPOSICION
GRANULOMETRICA
BAILEY

2.1 MATERIALES PÉTREOS

2.1.1 Definición de agregado

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en las capas de las carreteras, con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.¹

El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. Ver Figura 2.1.



FIGURA. 2.1 Agregados pétreos.

FUENTE: Foto tomada en Planta Asfáltica de Constructora DISA S.A, de C.V., Abril 2014.

2.2 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS QUE SE UTILIZAN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Las propiedades más comunes para considerar apropiado un agregado para concreto asfáltico de buena calidad, son las siguientes: Graduación y tamaño máximo de partícula, textura superficial, limpieza, capacidad de absorción, dureza, afinidad con el asfalto y forma de la partícula.

¹Smith M. R. and L. Collins, 1994.

2.2.1 Graduación y tamaño máximo de la partícula.

2.2.1.1 Graduación

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de distribución de diferentes tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertos porcentajes en una serie de tamices. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla.²

2.2.1.2 Tamaño de las partículas



FIGURA. 2.2 Tamaño de las partículas.

FUENTE: Foto Tomada en Planta Asfáltica de Constructora DISA S.A, de C.V. Enero 2014.

Existen dos formas de designar el tamaño máximo del agregado:

2.2.1.2.1 Tamaño máximo nominal de partícula.

Designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

²Aplicación Del Método Marshall Y Granulometría Superpave En El Diseño De Mezcla Asfáltica Templada Con Emulsión Asfáltica, 2011.

2.2.1.2.2 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% de las partículas de agregado.

2.2.2 Textura superficial.

La textura superficial de las partículas de agregado es un factor que determina no solo la trabajabilidad y la resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también la resistencia que tiene esta al deslizamiento en la superficie de la carpeta de rodadura.

Una textura áspera, como el papel de lija, aumenta de forma significativa la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas.³

2.2.3 Limpieza.

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera) en el agregado, que provoquen deterioro cuando estos se apliquen para la producción de mezclas asfálticas. La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200).

³Aplicación Del Método Marshall Y Granulometría Superpave En El Diseño De Mezcla Asfáltica Templada Con Emulsión Asfáltica, 2011.

El Ensayo de Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos por el Uso del Ensayo del Equivalente de Arena (AASHTO T 176-08) es un método con el cual se puede determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

2.2.4 Capacidad de absorción.

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información; si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado.

Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades más grandes de asfalto que un agregado menos poroso.

El ensayo utilizado para medir esta propiedad física es: el ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado. El valor de gravedad específica y absorción son utilizados en el diseño de mezclas para superficie, por ejemplo; la gravedad específica es utilizada en el análisis de densidad-vacíos de las mezclas asfálticas.

2.2.5 Dureza.

Es la resistencia de los agregados a resistir los efectos de abrasión e intemperie a los cuales serán sometidos en los procesos de producción, colocación, compactación y en su vida de servicio. La resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión es medida a partir del ensayo en la Máquina de Los Ángeles regido por la norma (AASHTO T 96-02).

Una medida indirecta de la dureza, también la proporciona la prueba de Sanidad de Agregados por Sulfato de Sodio (AASHTO T 104-99), ya que mide la resistencia de este a una simulación de intemperismo agresivo.

2.2.6 Afinidad por el asfalto.

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia a aceptar y retener una capa de asfalto. La afinidad debe ser tal que garantice una fuerza que permita, tanto al agregado como al asfalto, mantenerse unidos ante las condiciones ambientales a las que se verá expuesta la mezcla asfáltica.

2.2.7 Forma de la partícula.

Las exigencias de forma de la partícula varían ligeramente para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas redondas, planas, alargadas y en forma de lascas, ya que este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas.

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida. Ver la figura 2.3.

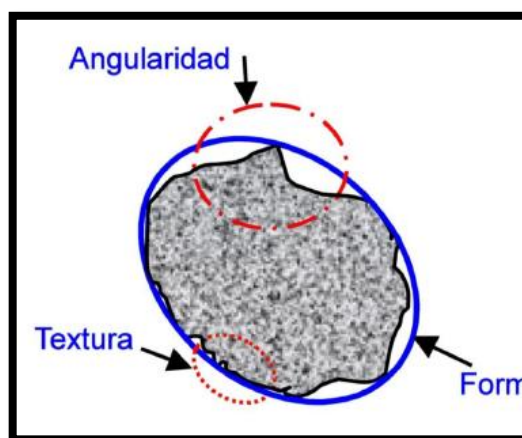


FIGURA. 2.3 Imagen que describe La Forma, Textura y Angularidad de las partículas de agregado.

FUENTE: Paramo J., Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente en los Inicios del Siglo XXI, Argentina, 2012.

2.2.8 Peso específico.

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica), es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados en la mezcla, de acuerdo al peso.

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es: que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado⁴

Se ha desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final; estos tres tipos son:

- Peso específico Bulk.
- Peso específico aparente.
- Peso específico efectivo.

La determinación de esta propiedad (peso específico) incluyendo los tres tipos ya mencionados, se logra mediante el ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado.

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al saturar la muestra.

⁴Aplicación Del Método Marshall Y Granulometría Superpave En El Diseño De Mezcla Asfáltica Templada Con Emulsión Asfáltica, 2011.

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera; sin embargo, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

2.3 ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PÉTREOS PARA OCUPARLOS EN MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE.

2.3.1 Importancia del muestreo y reducción del agregado.

2.3.1.1 Muestreo de agregados

Basado en norma AASHTO: T 2-91 (2010) (ASTM:D 75-92)

RESUMEN DEL METODO

Esta práctica cubre el muestreo de agregados gruesos y finos como parte de una investigación preliminar de la fuente potencial de suministro, así como del control de los agregados obtenidos en la fuente; para dar una aceptación o rechazo de los materiales para un uso futuro en construcción.

IMPORTANCIA

El muestreo es muy importante al igual que la realización de un ensayo, la persona encargada que ha de realizarlo deberá hacerlo de una forma muy correcta para que una porción de material que es extraído de un acopio de varias toneladas, presente las características y propiedades del agregado en bruto que representa, y además, los buenos procedimientos de control de calidad requieren de varios ensayos durante los procesos de producción, acopiado, y manejo para:

- Asegurar que solamente se use material satisfactorio en la mezcla de pavimentación, y
- Proporcionar un registro permanente como evidencia de que los materiales cumplen con las especificaciones de la obra.

La muestra seleccionada debe ser verdaderamente representativa de todo el agregado para que los resultados de los ensayos sean confiables. Por lo tanto, es muy importante tener técnicas apropiadas de muestreo.

2.3.1.2 Reducción de muestras de agregado a tamaño de ensayo.

Basado en norma AASHTO: T 248-11 (ASTM: D 702-98) (2003)

RESUMEN DEL MÉTODO

Este método cubre la reducción de muestras grandes de agregado a un tamaño apropiado para el ensayo, empleando técnicas que están encaminadas a minimizar las variaciones de las características medibles entre la muestra seleccionada para ensayo y la muestra total.

IMPORTANCIA

Esta práctica proporciona procedimientos para reducir la muestra total obtenida en campo o producida en el laboratorio a un tamaño conveniente para realizar un número de ensayos que describan el material y medir su calidad.

El 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 pequeña presentará las mismas características y propiedades del agregado en bruto al cual representa; dichos procedimientos se realizan con base al ensayo “Reducción de Muestras de Agregado a Tamaño de Ensayo”, AASHTO T 248-11.



FIGURA. 2.4 Reducción de tamaño de la muestra a través del cuarteo.

FUENTE: Foto Tomada en Planta Asfáltica de Constructora DISA S.A, de C.V. Enero 2014.

2.3.2 Ensayos que contribuyen en el diseño de una mezcla asfáltica.

2.3.2.1 Análisis por tamizado de agregados grueso y fino.

Basado en norma AASHTO: T 27-11(ASTM: C 136-06)

RESUMEN DEL MÉTODO

Este método de ensayo se utiliza para determinar la graduación de materiales propuestos para su uso como agregados o que están siendo utilizados como agregados. Una muestra de agregado seco de masa conocida es separada a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores, para la determinación de la distribución de tamaño de las partículas. Los resultados se usan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas, según los requisitos especificados y para proporcionar información necesaria en el control de la producción de agregados y mezclas que contienen agregados. La información también puede ser usada en el desarrollo de relaciones concernientes a la porosidad y al acomodo de las partículas. Ver imagen de los tamices en la figura 2.5.

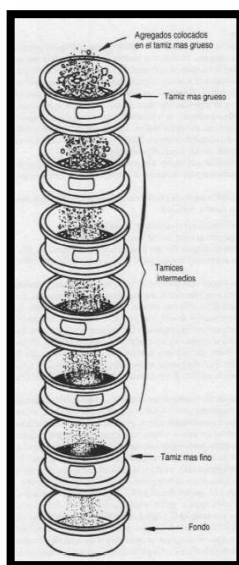


FIGURA. 2.5 Análisis de tamices

FUENTE: Instituto del Asfalto, MS-22

2.3.2.2 Materiales más finos que pasan el tamiz de 75 μm (no. 200) en agregado mineral por lavado.

Basado en norma AASHTO: T 11-05 (2009) (ASTM: C 117-04)

RESUMEN DEL MÉTODO

Una muestra de agregado es lavada en la manera prescrita, usando ya sea agua corriente o agua conteniendo un agente humectante, como se haya especificado. El producto decantado del lavado con agua, que contiene material suspendido y disuelto, es pasado a través de un tamiz de 75 μm (No. 200). La pérdida en masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como el porcentaje de masa de la muestra original y es reportada como el porcentaje de material más fino que el tamiz de 75 μm por lavado. Ver figura 2.6 que describe el proceso de tamizado por lavado en la malla N°200.



FIGURA. 2.6 Proceso de Lavado de Traducción ASTM C 117-04

2.3.2.3 Gravedad específica y absorción del agregado fino.

Basado en norma AASHTO: T 84-10(ASTM: C 128-07)

RESUMEN DEL METODO

Se toma una muestra representativa de agregado fino la cual se sumerge durante 17 ± 2 horas. Al día siguiente se expande la muestra sobre la superficie de un recipiente o bandeja la cual no es absorbente. Con el secador se le inyecta una corriente de aire hasta conseguir un secado uniforme, la operación es terminada cuando los granos del agregado están sueltos.

Coloque el molde cónico con el diámetro de mayor tamaño hacia abajo en un nivel, con superficie firme y lisa, no absorbente y rellenar este con el material parcialmente seco a rebosar. Apisone la superficie del material en el molde 25 veces con el pisón. Permitir que el pisón caiga libremente durante cada capa distribuyendo el pisón de manera uniforme sobre toda la superficie. Cuando se cae el agregado al quitar el molde cónico es porque se ha alcanzado la condición saturada superficialmente seca.



FIGURA. 2.7 Proceso de colocación de arena en el picnómetro

FUENTE: Tomada de norma AASHTO T 84-10

Se procede primeramente a llenar parcialmente con agua el picnómetro, luego se toma una muestra de 500 ± 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 término de este paso, se envasa la muestra en tazas para ser dejadas en el horno hasta que las mismas tengan masa constante. Y por último, las muestras son dejadas en un cuarto aireado por 1 ± 0.5 horas y luego se determina la masa con la balanza y se cuantifica su valor. Ver figura 2.7.

2.3.2.4 Gravedad específica y absorción del agregado grueso.

Basado en norma AASHTO: T 85-10 (ASTM C 127-04).

RESUMEN DEL MÉTODO

Primeramente se secan los agregados en un horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que estos tengan una masa constante y se dejan enfriando entre 1 a 3 horas. Los agregados que han sido muestreados son sumergirlos 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.

Usando la masa y peso de las mediciones obtenidas, y las fórmulas del método, es posible calcular los tres tipos de gravedad específica que son la gravedad específica seca, la gravedad específica superficialmente seca y la gravedad específica aparente; y la absorción. Ver figura 2.8.

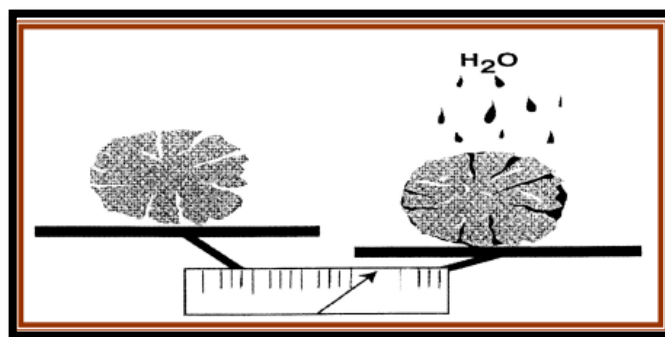


FIGURA. 2.8 Se incrementa la masa de las partículas gracias a la absorción de agua

FUENTE: Imagen de la norma AASHTO T 85-10.

2.3.3 Ensayos que se utilizan para conocer la calidad de los agregados

TABLA 2.1 Descripción y norma de los ensayos para la calidad de los materiales.

ENSAYOS QUE DETERMINAN LA CALIDAD DE LOS AGREGADOS		
ENSAYO	NORMA	DESCRIPCION
PARTICULAS PLANAS, PARTICULAS ALARGADAS, O PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS EN AGREGADO GRUESO	ASTM D 4791-10	Este ensayo cubre la determinación de los porcentajes de partículas planas y alargadas en agregados gruesos. Los valores declarados en unidades de libra-pulgada deben ser considerados como el estándar a excepción con respecto al tamaño del tamiz y al tamaño de agregado que son dadas en unidades SI.
FINOS PLÁSTICOS EN AGREGADO GRADUADO Y SUELOS POR EL USO DEL ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA	AASHTO: T 176-08 ASTM: D 2419-09	Este ensayo se realiza para que sirva como una prueba de campo rápida para mostrar las proporciones relativas de polvo fino o material arcilloso en suelos o agregados graduados.
ENSAYO DE SANIDAD DE AGREGADOS POR SULFATO DE SODIO	AASHTO: T 104-99 (2003) ASTM C 88-05	Este método da los procedimientos a ser seguidos en los ensayos de agregados para determinar su resistencia a la desintegración por soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
RESISTENCIA AL DESGASTE DEL AGREGADO GRUESO DE TAMAÑO PEQUEÑO POR IMPACTO Y ABRASIÓN EN LA MÁQUINA LOS ÁNGELES.	AASHTO: T 96-02 (2010) ASTM: C 131-06	Este ensayo es una medida al desgaste de los agregados minerales de graduaciones estándar, resultando en una combinación de acciones que incluye la abrasión o el desgaste, impacto, y desintegración de los agregados

2.4 ESPECIFICACIONES PARA AGREGADOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS.

2.4.1 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, ya que es el agregado que proporciona la mayor resistencia a las cargas que ejercerá el tráfico he aquí la importancia de presentar las mejores propiedades establecidas en normas, disposiciones tanto internacionales como nacionales, relativos a la ejecución de la obra.

En nuestro país y en Centroamérica se crearon especificaciones técnicas de carácter regional conocidas como S.I.E.C.A. (Secretaría de Integración Económica Centroamericana), estas han sido el resultado de esfuerzos de integración logrados a través de los últimos años, y por convenio pretenden ser obligatorias para todos los países miembros.

Estas especificaciones están clasificadas en:

Especificaciones Generales: Contiene las actividades aplicadas a obras de Mantenimiento en todos los países centroamericanos y,

Especificaciones Particulares: modifican las especificaciones generales para adecuarlas a las condiciones prevalecientes en los contratos específicos de mantenimiento vial, en cada país centroamericano.

Debido a eso es que las especificaciones técnicas que interesan a nuestro documento, parten de las especificaciones generales desarrolladas por S.I.E.C.A. en el “**Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales**”, en dicho manual se establecen los requisitos

que deben cumplir los materiales pétreos, asfalto y mezcla asfáltica en caliente, entre otros factores relacionados con dicha mezcla.⁵

2.4.2 Requisitos que deben cumplir los agregados

2.4.2.1 Requisito que debe cumplir el Agregado Grueso.

Este material debe consistir en piedra o grava triturada de buena calidad que sean retenidos en la malla de 4.75 mm o cumpla con la metodología Bailey; y que sea mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos generales siguientes:

- La Abrasión de los Ángeles, según AASHTO T 96-02 (2010), debe de ser de 35% máximo.
- La Sanidad en sulfato de sodio (5 ciclos), se realizó de acuerdo a AASHTO T 104-99 (2003) y los agregados deben de tener una pérdida de 12% máx.
- Las Caras fracturadas de los agregados, se obtiene en base a ASTM D 5821-01 y se requiere de un mínimo de 75% para no ser considerada fracturada.
- El Índice durabilidad para agregado grueso, según AASHTO T 210-91, debe de ser de 35% mínimo.

No deben usarse agregados con caras pulidas o agregados que contengan carbonato soluble. El residuo insoluble debe ser menor del 25%, de acuerdo a ASTM D 3042-03.

2.4.2.2 Requisito que debe cumplir el Agregado Fino.

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra quebrada cernida, o su combinación y deberá tener una granulometría que pase la malla de 4.75 mm o cumpla con la metodología Bailey, al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría

⁵Aplicación Del Método Marshall Y Granulometría Superpave En El Diseño De Mezcla Asfáltica Templada Con Emulsión Asfáltica, 2011.

requerida según la metodología Bailey incluyendo la pérdida en sulfato, y que llenen además los requisitos generales siguientes:

- El Equivalente de arena, según AASHTO T 176-08, debe ser del 35% min.
- El Índice durabilidad para agregado fino, según AASHTO T 210-91, debe de ser de 35% mínimo.

2.4.2.2.1 Especificaciones para agregado fino en mezclas de pavimentos bituminosos, según AASHTO M 29-03.

Límites de variabilidad en la graduación. Para continuar envíos de agregado fino de una fuente dada, el módulo de finura no variará más de 0.25 del módulo de finura base. El módulo base de finura será el valor que es típico de la fuente, y estará resuelto de pruebas previas, o si ninguna de las pruebas previas existen, del promedio de los valores del módulo de finura para las primeras 10 muestras (o todas las muestras precedentes si son menos de 10) en la orden.

Índice de plasticidad. El índice de plasticidad de la fracción que pasa el tamiz de 425- μm (No. 40) no excederá de 4.0.

El siguiente requisito suplementario será aplicable sólo cuando sea especificado por el comprador en el contrato o la orden.

Sanidad de Sulfato. El agregado fino, estando sujeto a cinco ciclos del ensayo de sanidad según T 104-99 (2003), tendrá una pérdida de peso de no más de 15 por ciento cuando el sulfato de sodio es usado o 20 por ciento cuando el sulfato de magnesio es usado. Si la sal a ser usada no es indicada por el comprador, entonces el agregado fino será aceptable si llena los requisitos cuando sea probado con cualquier sal.

2.5 METODOLOGÍA DE COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA BAILEY.

2.5.1 Definición de la metodología.

Se caracteriza el método Bailey por ser un enfoque sistemático de la mezcla de agregados que proporciona la trabazón como la columna vertebral de la estructura y una balanceada graduación continua para completar la mezcla como lo indica la figura 2.9.⁶

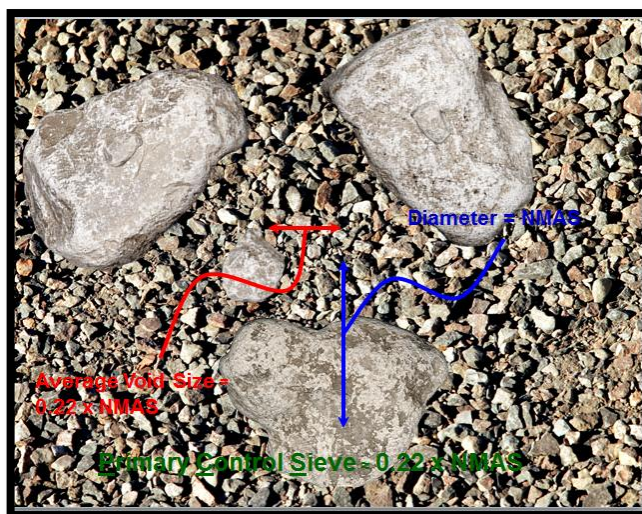


FIGURA. 2.9 El Método Bailey nos proporciona la Trabazón de los agregados
FUENTE: Pine W., The Basics of the Bailey Method., Indianapolis.

2.5.2 Desarrollo de metodología.

El método de Bailey fue desarrollado en la década de los años 80, por Robert Bailey del Departamento de Transporte de Illinois para evaluar el empaquetamiento de los agregados y predecir los huecos 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 agregado de mayor tamaño producen o proporcionan huecos, que son ocupados por las partículas de agregado de menor tamaño, el asfalto y el aire. Para ello utiliza las densidades aparentes de las fracciones de los agregados sin

⁶“Método Bailey para Seleccionar la Graduación en el Diseño de una Mezcla Asfáltica en Caliente”. Robert Bailey y otros.

compactar LUW (Loose Unit Weight) y compactadas RUW (Rodded Unit Weight) qué tienen en cuenta la forma y la textura de las partículas.

El método se utiliza, por tanto, para definir el esqueleto mineral que proporcione un buen rozamiento interno que asegure una buena resistencia a las deformaciones plásticas y un contenido de vacíos en áridos adecuados para obtener una buena durabilidad.⁷

2.5.3 Principios básicos de la metodología.

El método de Bailey fue desarrollado bajo dos principios básicos para establecer la relación entre la composición granulométrica de los agregados y los parámetros volumétricos de la mezcla bituminosa. Dichos principios son:

- El empaquetamiento de los agregados.
- Definición de agregado grueso y fino.

2.5.3.1 Empaquetamiento de los agregados

El empaquetamiento de los áridos por compactación no es total y siempre hay huecos entre las partículas minerales.

El grado de empaquetamiento de los áridos depende de los siguientes factores:

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

2.5.3.2 Definición de agregado grueso y fino.

El método Bailey realiza una definición específica para determinar el empaquetamiento y trabazón de agregados proporcionados por la combinación de varios tamaños mezclados, siendo esta definición la siguiente:

⁷Método de Dosificación Bailey. Aplicación a las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA). Miranda L, 2012.

- Agregado grueso: es la mayor partícula que cuando se coloca en un volumen se producen vacíos.
- Agregado fino: partícula que pueden llenar los vacíos en la mezcla creados por el agregado grueso.

Según el método Bailey, el tamiz que define si una partícula es grueso o fino se define como Tamiz de Control Primario (TCP), y se basa en el TMN de la mezcla de los agregados.

Por tanto el tamiz de control primario se define a partir de la siguiente ecuación, así:

$$\text{TCP} = \text{TMN} \times 0.22$$

TCP: Tamiz de Control Primario.

TMN: Tamaño Máximo Nominal

El valor de 0.22 que es usado en la ecuación de TCP fue determinado de un análisis de empaquetamiento de 2 y 3 dimensiones de diferentes partículas.⁸

2.5.4 Principales pasos en el método Bailey.

A partir de los principios mencionados anteriormente, se definen los pasos principales para el desarrollo del método Bailey, los cuales son:

- Combinar los agregados por volumen.
- Analizar la mezcla combinada.

2.5.4.1 Combinación de agregados por volumen

En los agregados combinados primero debemos determinar la cantidad y tamaño de los vacíos que se han creado con los agregados gruesos y llenar esos vacíos con la cantidad adecuada de agregado fino, esto como parte del análisis del empaquetamiento de la mezcla.

⁸Método Bailey para Seleccionar la Gradación en el Diseño de una Mezcla Asfáltica en Caliente. Robert Bailey y otros.

Para evaluar la combinación volumétrica de los agregados, el diseñador necesita determinar el peso unitario suelto y compacto de agregado grueso y fino, debido a que estas mediciones proporcionan información volumétrica de la estructura de vacíos para evaluar las propiedades de trabazón.

2.5.4.1.1 Peso unitario suelto del agregado grueso

Se define como la cantidad de agregado grueso que llena un volumen unitario sin ningún esfuerzo de compactación aplicado.



FIGURA. 2.10 Esquema para el Peso Unitario No Compactado del Agregado Grueso (LUW)
FUENTE: Miranda L., y otros, "Método de Dosificación Bailey. Aplicación a las Mezclas Stone Mastic Asphalt(SMA)", 2012

2.5.4.1.2 Peso unitario compactado del agregado grueso

Se define como la cantidad de agregado grueso que llena un volumen unitario con un esfuerzo de compactación aplicado, disminuyendo de esta manera el volumen de vacíos en el agregado, debido al incremento de contacto de las partículas, por el esfuerzo aplicado. Ver la figura 2.11.

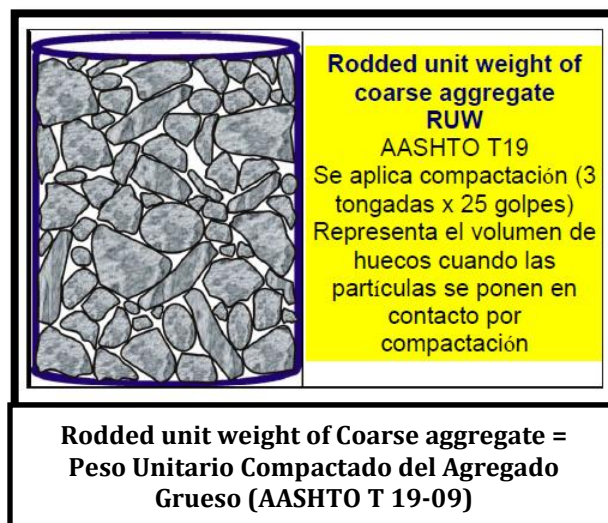


FIGURA. 2.11 Esquema Peso Unitario Compactado del Agregado Grueso (RUW)

FUENTE: Miranda L., y otros, "Método de Dosificación Bailey. Aplicación a las Mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA)", 2012.

2.5.4.1.3 Peso unitario escogido del agregado grueso

Se necesita seleccionar la trabazón deseada del agregado grueso en el diseño de la mezcla, para ello se debe escoger el peso unitario del agregado grueso, ya que es la graduación gruesa la que tiene un esqueleto granular. Para seleccionar un peso unitario el diseñador necesita decidir si la mezcla es gruesa o fina.

El peso unitario suelto, es el límite inferior de la trabazón del agregado grueso. Teóricamente, esta es la línea divisoria entre las mezclas de gradación fina y las de gradación gruesa. Si el diseñador de la mezcla escoge peso unitario del agregado grueso menor que el peso unitario suelto, las partículas de agregado grueso se separan y esta es una condición de contacto no uniforme entre partículas.

El peso unitario compacto es generalmente considerado como el límite superior de la trabazón de una mezcla densamente graduada. Este valor, por lo general es cercano al 110% del peso unitario suelto.⁹

En las mezclas de graduación densa, el peso unitario escogido, es un porcentaje del peso unitario suelto del agregado grueso. Si se busca una trabazón del agregado grueso, el porcentaje oscila entre el 95% y el 105% del peso unitario suelto del agregado grueso. Para agregados blandos propensos a la degradación, el peso unitario escogido será cercano al 105% del peso unitario suelto de los gruesos. Se deben evitar valores mayores a 105% del peso unitario suelto, debido a que la probabilidad de degradación y la dificultad para la compactación en campo, se incrementa. Ver Figura 2.12.

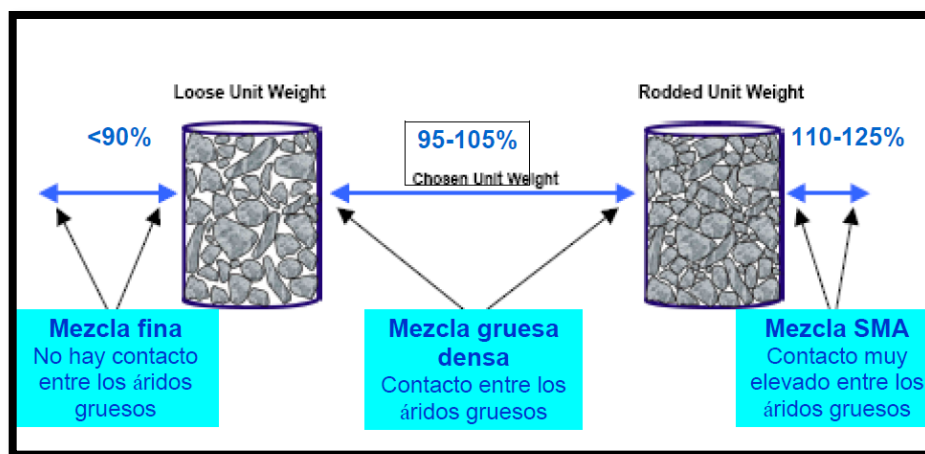


FIGURA. 2.12 Elección de la densidad escogida del proyecto.

FUENTE: Miranda L., y otros, "Método de Dosificación Bailey. Aplicación a las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA)", 2012.

La cantidad de consolidación adicional respecto al peso unitario escogido depende de varios factores:

- Dureza, forma y textura de los agregados

⁹Método Bailey para Seleccionar la Graduación en el Diseño de una Mezcla Asfáltica en Caliente. Robert Bailey y otros.

- La cantidad de agregado fino que acompaña a cada agregado grueso, cuando se realizan los ensayos de peso unitario suelto y compactado
- Características de la mezcla combinada.
- La relación entre el peso unitario escogido y el peso unitario compacto de los agregados gruesos
- La cantidad y el tipo de esfuerzo aplicado

2.5.4.1.4 Peso unitario compactado del agregado fino.

El peso unitario compacto de agregado fino se utiliza, en las mezclas de graduación densa, para determinar el volumen de agregado fino necesario para llenar los vacíos generados por el agregado grueso en el peso unitario escogido. Es determinado sobre cada agregado fino siguiendo los lineamientos del procedimiento de la especificación AASHTO T 19-09.

2.5.5 Análisis de diseño de mezcla.

Previo a realizar el análisis de diseño de la mezcla se le deben de realizar ensayos a los agregados, que deben de determinar: la Gravedad específica Bulk de cada agregado, el Peso unitario escogido de los agregados gruesos, el Peso unitario compacto de los agregados finos, la Mezcla en volumen de los agregados gruesos completando el 100%, la Mezcla total de los agregados finos completando el 100% y la Cantidad que pasa la malla N°200 deseado en la mezcla combinada.

Para proporcionar un sentido general de la mezcla de agregados por volumen, se presentan los siguientes pasos:

1. Seleccione un peso unitario escogido de los agregados gruesos, $\frac{kg}{m^3}$.
2. Calcule el volumen de vacíos para el peso unitario escogido de los agregados. gruesos.
3. Determine la cantidad de agregado fino para llenar los vacíos en el agregado grueso, usando el peso unitario compacto de los finos, $\frac{kg}{m^3}$.

4. Usando los pesos unitarios de cada agregado determine el peso unitario total y convierte a porcentajes individuales la mezcla de agregados.
5. Corregir los agregados gruesos para la cantidad de agregado fino que contiene y la cantidad de agregado fino para la cantidad de agregado grueso que contiene, en orden de tener la mezcla deseada por volumen de agregado grueso y fino.
6. Determine los porcentajes de mezcla ajustada de cada agregado por peso.
7. Sí, el filler mineral o los finos de la cámara de filtros son usados, haga un ajuste del porcentaje de agregado fino por la cantidad de fino deseada para mantener la mezcla deseada por volumen, de agregado grueso y fino.
8. Determine los porcentajes revisados de agregados individuales por peso para usar en los cálculos de la mezcla calculada.

Después de determinar la combinación de graduación por peso, se hace un análisis de la trabazón de los agregados. La mezcla combinada se descompone en tres porciones distintas y cada una de ellas se analiza de forma individual. Las partículas a las cuales se les denomina el agregado grueso de la mezcla son una porción de la mezcla que va desde la partícula de mayor tamaño hasta el TCP.¹⁰

¹⁰Método Bailey para Seleccionar la Gradación en el Diseño de una Mezcla Asfáltica en Caliente. Robert Bailey y otros.

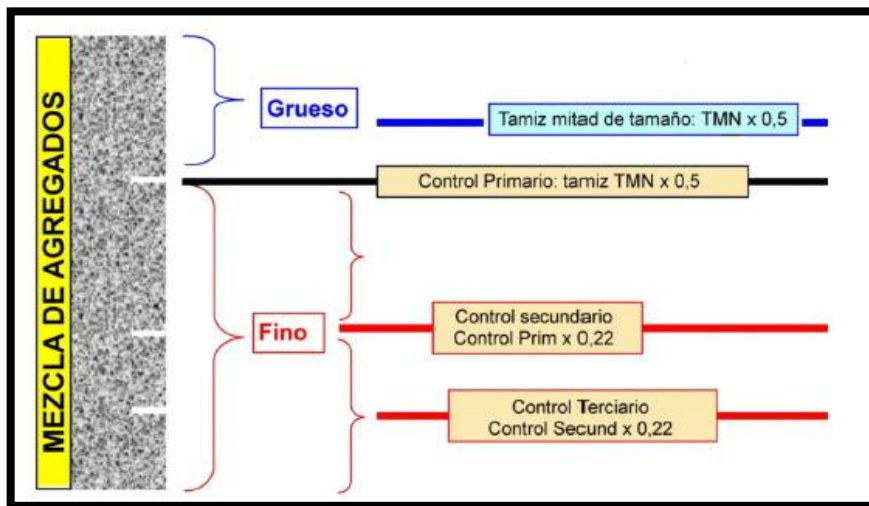


FIGURA. 2.13 Esquema de los agregados definidos según el método Bailey.

FUENTE: Paramo J., Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente en los Inicios del Siglo XXI, Argentina, 2012.

Los agregados finos se descomponen y evalúan en dos porciones. Para tener un parámetro para dividir el agregado fino, se usa el mismo factor de 0.22 que se utiliza para la graduación completa aplicado sobre el TCP, determinando de esta manera el Tamiz de Control Secundario (TCS). Con el TCS se hace la división entre las arenas gruesas y las arenas finas. La arena fina se utiliza para determinar el Tamiz de Control Terciario (TCT), que se obtiene al multiplicar el TCS por un factor de 0.22. Con estos elementos se hace un análisis que evalúa el empaquetamiento de las tres porciones de la graduación de agregados combinados. Estas tres relaciones son:

- Relación Agregado Grueso (CA Ratio)
- Relación Agregado Fino Grueso (FAc Ratio)
- Relación agregado Fino Fino (FAf Ratio)

Con estas tres relaciones se realiza una descripción de lo que es el empaquetamiento de los agregados, de esta forma cambiando la graduación, se

puede modificar así las propiedades volumétricas, constructivas o de desempeño de una mezcla asfáltica.

2.5.5.1 Relación Agregado Grueso

Con esta relación se evalúa el empaquetamiento de los agregados gruesos y los vacíos resultantes. Para entender sobre el empaquetamiento de los agregados se debe introducir el concepto de Tamiz de Control Medio (TCM), definiéndose como la mitad del TMN. A las partículas que son más pequeñas que el TCM, se les denomina como INTERCEPTORAS, siendo estas demasiado grandes para ocupar los vacíos creados por los agregados más gruesos que ellas, teniendo que ser separadas.

Valores inferiores a 1 en esta ecuación, incrementan la compactación, por haber menor número de interceptoras que limitan la compactación de las partículas gruesas más grandes.

Valores cercanos a 1, incrementan los Vacíos del Agregado Mineral (VAM), provocando que la fracción de agregado grueso sufra un desequilibrio porque los agregados de tamaños interceptores que intentan controlar el esqueleto del agregado grueso.

Cuando los valores de esta relación excedan de 1, las partículas llamadas interceptoras dominan la formación del esqueleto mineral grueso.

2.5.5.2 Relación agregado fino grueso.

La porción gruesa del agregado fino crea muchos vacíos que pueden ser llenados por la porción más fina que hay en sí misma. Esta relación se da por la ecuación:

Es recomendable trabajar con valores de esta relación menores a 0.50; ya que valores superiores indican mayores porcentajes de finos dentro de la porción fina, teniendo una cantidad excesiva de arena natural o una arena natural excesivamente fina, lo cual debe ser evitado.

2.5.5.3 Relación agregado fino.

La porción fina de los agregados finos, es la encargada de llenar los vacíos de la porción gruesa de los agregados finos. Al igual que para la relación de agregado fino grueso, los valores deben ser menores de 0.50, ya que los Vacíos del Agregado Mineral aumentan cuando los valores de esta relación decrecen.

CAPÍTULO III

TECNOLOGÍA DE

ASFALTO

ESPUMADO

3.1 ASFALTO

3.1.1 Definición de asfalto.

El asfalto es un material negro, cementante que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido, a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla caliente.¹¹

El asfalto, según la American Society for Testing and Materials (ASTM), es un material cementante color café oscuro a negro, en el cual los constituyentes predominantes son los bitumen los cuales existen en la naturaleza o son obtenidos por el procesamiento del petróleo.¹²

Refinación del Petróleo.

El proceso para realizar la refinación del petróleo se produce por medio de la destilación, la cual se produce a partir de un aumento, en etapas, de la temperatura; obteniéndose así la separación de las fracciones fuera del crudo del petróleo.

La Figura 3.1 muestra el flujo de petróleo durante el proceso de refinación, en el cual puede observarse que las fracciones livianas se separan por destilación simple, los más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente por una combinación de calor y vacío.¹³ Además se observa que el asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480 °C (900 °F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo de petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo.

¹¹Instituto del Asfalto Series del manual N 22, MS22

¹²Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, 2010.

¹³ Mayo información consúltese Instituto del Asfalto Series del manual N 22, MS 22

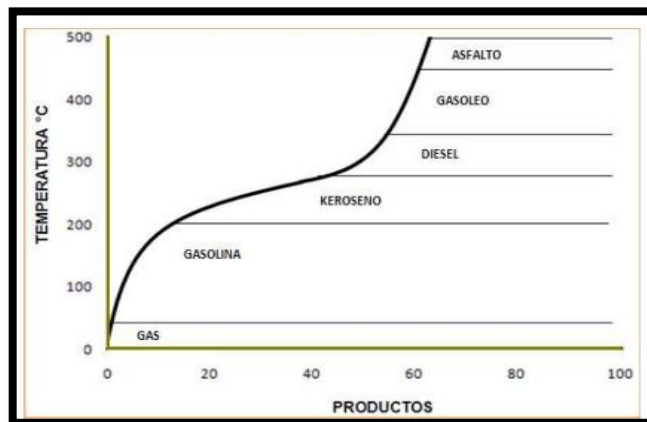


FIGURA 3.1 Productos y temperaturas Típicas de destilación

FUENTE: Trabajo de grado “Guía Básica para el Uso de Emulsiones Asfálticas en la Estabilización de Bases en Caminos de Baja Intensidad en El Salvador”.

3.1.2 Caracterización de los materiales asfálticos.

Las propiedades y características de los materiales asfálticos dependen de su estructura y composición química, además de ensayos empíricos para valorar las propiedades que tiene que poseer para emplearse como ligantes en obra de carreteras. A continuación se define los asfaltos a través de estos parámetros.¹⁴

- **Composición química**

En su constitución química el asfalto básicamente está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrogeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxigeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es diluido en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos. Para una mayor comprensión de lo establecido se presenta la figura 3.2, donde se muestra una clasificación en forma esquemática de la composición química del asfalto.

¹⁴MailaPaucar, tesis Universidad Central del Ecuador

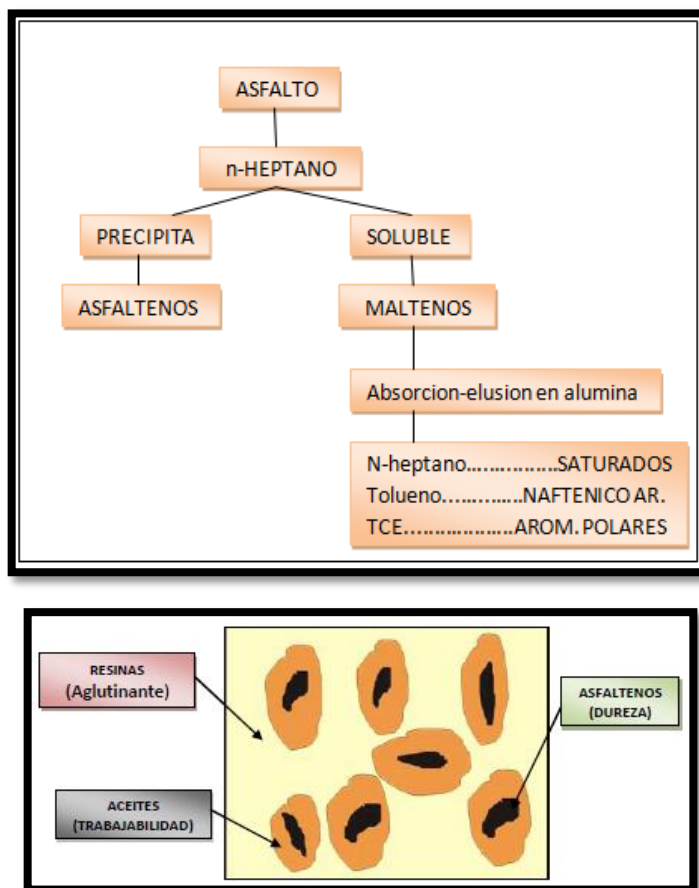


FIGURA 3.2 Composición química del ASFALTO

Asfáltenos	Máltenos	
No se disuelven en el heptano	Se disuelven en el heptano	
Son de color negro o pardo oscuro	Son líquidos viscosos	
Parece polvo grueso como el grafito	Resinas	Aceites
Le dan color y dureza al asfalto	Líquidos pesados	Color más claro
	Color ámbar o pardo oscuro	Medio de Transporte para asfáltenos y resinas
	Adhesividad del asfalto	

TABLA 3.1 Descripción de los Asfáltenos y Máltenos.

FUENTE: Instituto del Asfalto, MS-22

- **Propiedades fundamentales que tiene que poseer los asfaltos para su empleo en carretera.**

Las propiedades fundamentales que deben poseer los asfaltos para emplearse en carreteras son: adhesividad a los áridos, buen comportamiento reológico y resistencia al envejecimiento.

- ✓ **Carácter termoplástico:** por acción de la temperatura su consistencia debe disminuir de manera que sean capaces de "mojar" y envolver los áridos. Al enfriarse debe adquirir la consistencia primitiva y dar cohesión a la mezcla.
- ✓ **Buen comportamiento mecánico y reológico** para resistir las tensiones impuestas por el tráfico y poder mantener a las temperaturas de servicio, la estructura de la mezcla asfáltica. Los asfaltos presentan un comportamiento reológico muy complejo que depende de la temperatura, de la carga y tiempo de aplicación. A bajas temperaturas y durante intervalos pequeños de tiempo el asfalto tiene carácter elástico, mientras que a temperaturas moderadamente elevadas o tiempos de aplicación muy largos, la elasticidad prácticamente desaparece, y el asfalto se deforma permanentemente y fluye.
- ✓ **Resistir al envejecimiento** frente a los agentes atmosféricos y condiciones ambientales para conservar sus propiedades con el tiempo. Los asfaltos presentan una gran resistencia al envejecimiento como consecuencia de su naturaleza fundamentalmente hidrocarbonado de baja reactividad; pero durante su manipulación y periodo de servicio están sometidos a una serie de factores y agentes externos que originan cambios en su composición y repercuten negativamente sobre sus propiedades.¹⁵

¹⁵ Mayor información consúltese Maila Paucar, tesis Universidad Central del Ecuador

3.1.3 Clasificación de asfaltos para pavimentación.

Los asfaltos para pavimentación son los empleados en la fabricación de mezclas asfálticas usados básicamente en construcción y mantenimiento de pavimentos. Los asfaltos para pavimentación pueden clasificarse como: cemento asfáltico, asfaltos diluidos, asfaltos emulsificados, asfaltos modificados y asfaltos grado de desempeño.

3.1.3.1 Cementos asfálticos.

Son asfaltos obtenidos a través del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se diluyen, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.¹⁶ Los cementos asfálticos se clasifican bajo los siguientes sistemas:

- Viscosidad.
- Viscosidad después de envejecimiento.
- Penetración.
- Grado de Desempeño.

¹⁶ Mayor información consúltese MailaPaucar, tesis Universidad Central del Ecuador

TABLA 3.2 Requisitos para Cemento Asfáltico Graduado por Viscosidad (AASHTO M 226-80) (2012) (Clasificación basada en Asfalto Original)

Ensayos	Grado de viscosidad					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C (140°F), Pa-s (Poises)	25 ±5	50 ±10	100 ±20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
	(250 ±50)	(500±100)	(1000±200)	(2000±400)	(3000 ±600)	(4000 ±800)
Viscosidad, 135°C (275°F), mm ² /s — mínimo	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C (77°F), 100 g, 5 s — mínimo	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, COC, °C (°F)— mínimo	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232 (450)	232 (450)
Solubilidad in tricloroetileno, en porcentaje — mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas sobre el residuo del ensayo de película delgada en horno:						
Perdida por calentamiento, en porcentaje-máximo (opcional) ^a		1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad, 60°C (140°F), Pa-s (Poises) — máximo	100 (1000)	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1200 (12000)	1600 (16000)
Ductilidad, 25°C (77°F), 5 cm/min, cm — mínimo	100 ^b	100	75	50	40	25
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) ^c con:						
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados					
Solvente de nafta-xileno, en porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados					
Solvente de heptano-xileno, en porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados					

FUENTE: Norma AASHTO M 226-80 (2012)

a) El requerimiento de pérdida por calentamiento es opcional.

b) Si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15.6 ° C (60 ° F) es 100 mínimo.

c) El uso de la prueba rápida es optativo. Cuando sea especificado, el ingeniero indicará si el solvente estándar de nafta, el solvente de xileno - nafta, el solvente de xileno - heptano será usado para la determinación de conformidad con lo requerido, y también, en el caso de solventes del xileno, que porcentaje de xileno será usado.

TABLA 3.3 Requisitos para cemento asfáltico clasificado por su viscosidad a 60 ° C (140 ° F) (Clasificación basada para residuos de ensayos de película delgada en horno rotatorio)

Ensayos en residuos del método de ensayo AASHTO T 240 ^a	Grado de viscosidad				
	AR-10	AR-20	AR-40	AR-80	AR-160
Viscosidad, 60°C (140°F), Pa·S (Poises)	100 ±25	200 ± 50	400 ± 100	800 ± 200	1600 ±400
	(1000 ± 250)	(2000 ± 500)	(4000 ± 1000)	(8000 ±2000)	(16000±4000)
Viscosidad, 135°C (275°F), mm ² /s — mínimo	140	200	275	400	550
Penetración, 25°C (77°F), 100 g, 5 s— mínimo	65	40	25	20	20
Porcentaje de penetración original, 25°C (77°F) — mínimo	—	40	45	50	52
Ductility, 25°C (77°F), 5 cm/min, cm — mínimo	100 ^b	100 ^b	75	75	75
Pruebas en asfalto original:					
Punto de inflamación, COC, °C (°F)— mínimo	205(400)	219 (425)	227 (440)	232 (450)	238 (460)
Solubilidad de tricloroetileno, en porcentaje — mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

FUENTE: Norma AASHTO designación M226-80 (2012)

a) AASHTO T-179-05 (2009) (Prueba de película delgada en horno) puede ser usado, pero AASHTO T 240-09 será el método de referencia.

b) Si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15.6 ° C (60 ° F) tiene un valor mínimo de 100.

TABLA 3.4 Requisitos específicos para cemento asfáltico clasificado por penetración.

Pruebas	Grado de penetración									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Penetración a 25°C (77°F), 100g, 5 seg.	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, Ensayo Cleveland, °C (°F)	232 (450)	—	232 (450)	—	232 (450)	—	218 (425)	—	177 (350)	—
Ductilidad a 25°C (77°F), 5cm/min, cm	100	—	100	—	100	—	100	—	—	—
Solubilidad en tricloroetileno, porcentaje	99	—	99	—	99	—	99	—	99	—
Prueba en horno de película delgada(TFO), 3.2mm(1/8in.), 163°C (325°F), 5 horas										
Perdida por calentamiento, porcentaje	—	0.8	—	0.8	—	1.0	—	1.3	—	1.5
Penetración del residuo, porcentaje del original	58		54	—	50	—	46	—	40	—
Ductilidad de residuo a 25°C(77°F), 5cm/min, cm	—	—	50	—	75	—	100	—	100	—
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) (ver nota) con:										
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados									
Solvente de nafta-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados									
Solvente de heptano-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados									

FUENTE: Norma AASHTO designación M 20-70 (2004).

Nota: El uso de la prueba de mancha es optativo. Cuando sea especificado, el ingeniero deberá indicar si será utilizado el solvente normal de nafta, el solvente de nafta-xileno, o el solvente de heptano-xileno para determinar en conformidad con los requisitos, y también, en el caso de los solventes de xileno, el porcentaje de xileno a ser usado.

TABLA 3.5 Requisitos específicos para cemento asfáltico clasificado por Grado de Desempeño.

Grado de Desempeño	PG 52							PG 58					PG 64					PG 70			
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28
temperatura de diseño máxima del Pavimento, °C (a)	>52							>58					>64					>70			
Temperatura de diseño del Pavimento Mínimo, °C	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28
Ligante Original																					
Temperatura del punto de flama, AASHTO T 48-06 (10); Mínimo °C	230																				
Maximo, 3 Pa's (3000 cP), Temperatura de ensayo, °C.	135																				
Corte Dinamico, TP5; (c) G*/sindelta, Mínimo, 1.00 kPa Temperatura de ensayo @ 10 rad/s, °C	52							58					64					70			
Residuo de Película delgada rotatoria al horno (AASHTO T 240-09) o Película delgada al horno (AASHTO T 179-05(2009))																					
Perdida de masa, Máximo (%)	1.00																				
Mínimo, 2.20 kPa Temperatura de ensayo @ 10 rad/s. °C	52							58					64					70			
Residuos del contenedor de presión de emvejecimiento (PPI)																					
PAV Temperatura de envejecimiento, °C (d)	90							100					100					100(110)			
Corte Dinamico, TP5; (c) G*sindelta, Mínimo, 5000 kPa Temperatura de ensayo @ 10 rad/s, °C	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	28	25	22	19	16	34	31	28	25
Endurecimiento fisico																					
Reporte																					
Rigidez de fluencia, TP1; (f) S, Máximo, 300 Mpa m-valor, Mínimo, 0.300 Temperatura de ensayo, @ 60 segundos, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30	0	-6	-12	-18
Tensión directa, TP3; (f) Esfuerzo de falla, Mínimo, 1.0%, Temperatura de ensayo @ 1mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30	0	-6	-12	-18

- a) Temperaturas del pavimento pueden estimarse a partir temperaturas del aire utilizando un algoritmo que figura en el programa de software SUPERPAVE o pueden ser proporcionados por la agencia de especificar, o siguiendo los procedimientos como se indica en PPX.
- b) Este requisito no es obligatorio a discreción de la Agencia, si el proveedor garantiza que el ligante asfáltico se bombea y se mezcla adecuadamente a temperaturas que cumplan con todas las normas de seguridad aplicables.
- c) Para el control de calidad de la producción de cemento de asfalto sin modificar, la medición de la viscosidad del cemento de asfalto original puede ser sustituido por medida de corte dinámico de $T \Delta^* / \text{sen}$ a temperaturas de ensayo en el que el asfalto es un fluido newtoniano. Cualquier medio estándar adecuados de medición de la viscosidad se pueden utilizar, incluyendo capilar o viscosimetría de rotación (AASHTO T 201-03 (2007) o T 202-03).
- d) La temperatura de envejecimiento PAV se basa en las condiciones climáticas simuladas y es una de las tres temperaturas de 90 ° C, 100 ° C o 110 ° C. La temperatura de envejecimiento PAV es 100 ° C para PG 58 - y por encima, excepto en los climas del desierto, donde se es de 110 ° C.
- e) Endurecimiento físico - TP 1 se lleva a cabo en una serie de vigas de asfalto de acuerdo con el punto 13.1, excepto el tiempo de acondicionamiento se extiende a 24 horas + / - 10 minutos a 10 ° C por encima de la temperatura mínima de rendimiento. La rigidez de 24 horas y m- valor se reportan únicamente con fines informativos.
- f) Si la rigidez de fluencia está por debajo de 300 MPa, no se requiere la prueba de tensión directa. Si la rigidez de fluencia entre 300 y 600 MPa el requisito directa deformación a rotura tensión puede ser usado en lugar del requisito de rigidez a la fluencia. El requisito de m- valor debe ser satisfecho en ambos casos.

3.1.3.2 Asfaltos diluidos

Los asfaltos diluidos también son conocidos como asfaltos líquidos, asfaltos fluidificados, asfaltos rebajados. Son materiales asfálticos de consistencia fluida. Se obtienen por disolución de los mismos en un aceite o fluidificante, teniendo por lo tanto una viscosidad baja, se desarrollaron para facilitar el empleo de los asfaltos cuando las temperaturas o el tipo de tratamiento exigen viscosidades de aplicación menores a la que presentan los asfaltos normalmente calentándolos fuertemente.

En nuestro país los asfaltos fluidificados tienen un escaso empleo y un consumo muy limitado. Estos pueden ser de tres tipos:

Curado Rápido (RC)	Curado Medio (MC)	Curado Lento (SC)
Viscosidad Cinemática Medida en Centistokes (Cst)		
AASHTO M 81-92(2012)	AASHTO M 82-75 (2012)	ASTM D 2026-97(2010)

TABLA 3.6. Tipo de asfaltos fluidificados.

3.1.3.3 Emulsiones asfálticas

Una emulsión es una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante o emulgente.

Las emulsiones son sistemas formados por dos fases una llamada fase continua y la otra la fase dispersa. La fase dispersa está conformada por asfalto y la continua por agua o una solución acuosa. Los emulsificantes son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado; tienen una parte hidrofóbica, que es soluble en el medio orgánico (en nuestro caso en el asfalto) y una parte, soluble en el medio acuoso.¹⁷

¹⁷ "Emulsiones Asfálticas". Instituto mexicano del Transporte. Quintana Roo, 2001.

Aniónicas	Catiónicas		
AASHTO M 140-03	AASHTO M 208-01 (2009)		
	Rotura Rápida (CRS-1)	Rotura Media (CMS-2)	Rotura Lenta (CSS-1)

TABLA 3.7 Clasificación de Emulsiones.

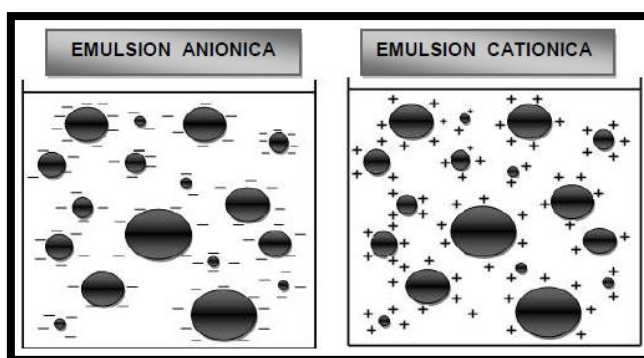


FIGURA 3.3 Representación esquemática de una emulsión aniónica y de una catiónica
FUENTE: Doc. Técnico No. 23. "Emulsiones Asfálticas". Instituto mexicano del Transporte. Qro, 2001.

3.1.3.4 Asfaltos modificados.

Es un asfalto al cual se le ha añadido de manera homogénea y estable, cierto porcentaje previamente analizado de algún tipo de aditivo, para mejorar sus propiedades reológicas. El asfalto es un material muy susceptible a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento, es afectado por la oxidación y la foto degradación. Sus propiedades mecánicas son muy pobres: es quebradizo a bajas temperaturas y fluye un poco arriba a la temperatura del medioambiente, además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita ampliamente su rango de utilidad. Por estas razones el material asfáltico en ocasiones tiene que ser modificado mediante la adición de un agente químico que mejore sus propiedades

3.2 RESUMEN DE ENSAYOS QUE SE LE REALIZAN AL ASFALTO PARA DETERMINAR SUS PROPIEDADES.

3.2.1 Muestreo de materiales bituminosos.

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

La única manera de saber si el cemento asfáltico entregado en la planta cumple con las especificaciones, es tomar muestras del material y hacerlas ensayar en el laboratorio.

3.2.2 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).

Este ensayo mide de forma indirecta la consistencia y equivale a una temperatura de equiviscosidad en las condiciones de ensayo. Junto a la penetración a 25º C, permite calcular el índice de penetración y estimar mediante su valor la susceptibilidad de los asfaltos. En este ensayo se anota la temperatura indicada en el termómetro en la cual una muestra de asfalto rodeando la bola, toca el fondo del baño maría, al aumentar su temperatura a una razón de 5°C por minuto.



FIGURA 3.4 Punto de Reblandecimiento (Método “Anillo y Bola”).

3.2.3 Gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos.

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

Se entiende como peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C. Este ensayo nos da una identificación de la calidad y origen del material, el peso específico es útil para determinar el peso por unidad de volumen de un ligante calentado a la temperatura de aplicación. El proceso se da calibrando el picnómetro, pesándolo tanto sólo como lleno de agua. Luego se pesa el picnómetro casi lleno en su totalidad con asfalto. Y por último, se pesa el picnómetro lleno con asfalto y agua.



FIGURA 3.5 Baño de agua a 25°C conjunto Picnómetro + asfalto + agua.

3.2.4 Penetración de materiales bituminosos.

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

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g.



FIGURA 3.6 Penetración en las Muestras.

3.2.5 Punto de flama y llama por la copa abierta de Cleveland.

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

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.



FIGURA 3.7 Ejecución del Ensayo.

3.2.6 Solubilidad de materiales bituminosos.

Basado en norma AASHTO: T 44-03 (2011) (ASTM: D 2042-01).

El ensayo de solubilidad es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como las sales, el carbono libre, y los contaminantes orgánicos, no se disuelven sino que se depositan en forma de partícula. Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de la muestra original.

3.2.7 Ductilidad de materiales bituminosos.

Basado en norma AASHTO: T 51-08 (ASTM: D 113-99).

El ensayo de ductilidad, da la distancia en centímetros que una muestra normalizada de ligante asfáltico puede alargarse antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida en un equipo denominado “ductilómetro” mediante una prueba de “extensión” en donde una probeta de ligante asfáltico es extendida o estirada a una velocidad de 5 Cm/minuto, en un baño de agua de igual densidad y una temperatura $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.



FIGURA 3.8 Muestras Estiradas Antes de que se rompan.

3.2.8 Viscosidad cinemática de asfaltos (betunes).

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

Se mide el tiempo para un volumen fijo de líquido que fluye a través de una vena capilar de un viscosímetro de vidrio, calibrado bajo una altura de carga exactamente reproducible y a una temperatura estrictamente controlada. El método se usa para determinar la consistencia del betún, como un elemento para establecer la uniformidad de embarques o fuentes de suministro.

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60 °C y 135 °C. La viscosidad a 60°C es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135°C corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. Con este se puede determinar la temperatura de mezcla y de compactación hasta la cual se debe llevar el asfalto para conformar la mezcla.

3.2.9 Procedimiento para cartas de viscosidad-temperatura de productos de petróleo líquido.

(ASTM D 341-93. Reaprobada en 1998)

Es una gráfica que se elabora para conocer el rango de temperaturas para la compactación y el mezclado de los especímenes, donde se toma la viscosidad a 2 o más temperaturas y luego se grafican dichos puntos, conociéndose los rangos de viscosidad para la compactación y el mezclado de la mezcla asfáltica.

3.2.10 Efecto del calor y el aire en materiales asfálticos.

Basado en norma AASHTO T 179-05 (2009) (ASTM D 1754-97 (2002))

Una película de material asfáltico es calentada en un horno por cinco horas a 163 °C (325 °F). Los efectos del calor y el aire son determinados por cambios ocurridos en las propiedades físicas medidas antes de y después del tratamiento en el horno. Un procedimiento opcional puede determinar el cambio de masa de la muestra.

Este método indica los cambios aproximados en las propiedades del asfalto durante un mezclado convencional en caliente a temperaturas cercanas a los 150 °C (300 °F), indicadas por la viscosidad, penetración, o medidas de ductilidad. Si la temperatura de mezclado difiere apreciablemente de 150 °C (300 °F), ocurrirán mayores o menores efectos en las propiedades.

Los ensayos de viscosidad y penetración, efectuadas sobre las muestras obtenidas después de los ensayos de TFO o RTFO, son usadas para medir el endurecimiento anticipado, del material, durante la construcción y el servicio del pavimento.

3.3 MEZCLA ASFÁLTICA

3.3.1 Definición de mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica, está formada por una combinación de agregados pétreos, ligante hidrocarbonado, y aditivo en algunos casos; de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados

anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento de la carpeta de rodadura y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto.¹⁸

3.3.2 Clasificación de mezcla asfáltica.

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y estas pueden ser diversas:

a) Por la Temperatura de puesta en obra.

La primera de estas clasificaciones se basa en los diferentes rangos de temperatura a la que se produce la mezcla. Así pues, recogiendo la amplia gama de mezclas que pueden producirse, la clasificación tendría la forma siguiente:

Mezclas frías (Cold Mixes): se trata de aquellas mezclas asfálticas producidas a temperatura ambiente (hasta los 40 °C), y que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan bien emulsiones, o bien betún espumado.

Mezclas templadas (Half Warm Mix Asphalt): este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100 °C), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos.

Mezclas semicalientes (Warm Mix Asphalt): se mueven en un rango de producción que varía desde temperaturas poco superiores a los 100 °C, hasta cerca de los 150 °C. Será este tipo de mezclas en las que nos centremos, y las diferentes tecnologías que se utilizan para conseguir esta reducción serán comentadas posteriormente.

Mezclas calientes (Hot Mix Asphalt): las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 160 °C. Como se ha comentado

¹⁸ Instituto del Asfalto Series del manual N 22, MS22

anteriormente, son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como la mejor envuelta de los áridos.

En el gráfico que se incorpora a continuación es posible visualizar los rangos anteriormente mencionados, con su correspondiente gasto de combustible (aproximado) por tonelada de producción.

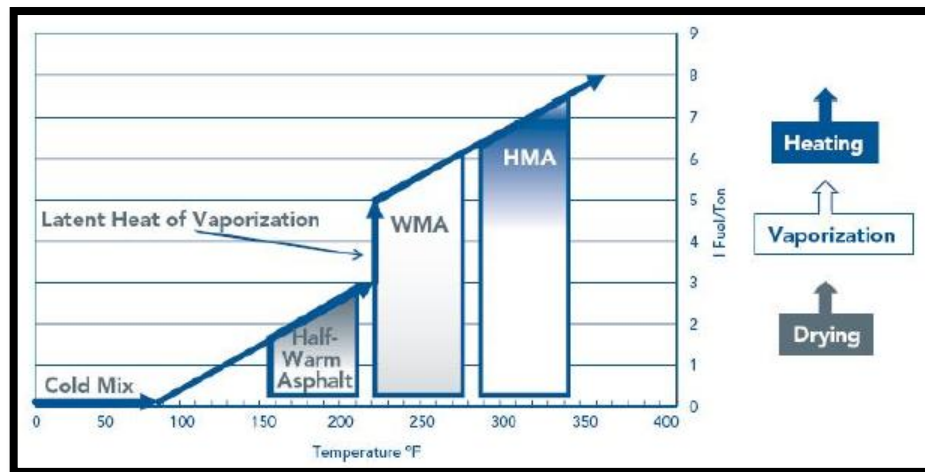


FIGURA 3.9 Gráfico que esquematiza una posible clasificación de las mezclas asfálticas, de acuerdo a su temperatura.

FUENTE: Laboratorio ingeniería de la construcción Investigación de Nuevas Mezclas de Baja Energía para la Rehabilitación Superficial.

b) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- ✓ Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.

- ✓ Mezclas Semi – cerradas o Semi – densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- ✓ Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- ✓ Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20%.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- ✓ Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- ✓ Mezclas Finas: Son mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

e) Por la Estructura del agregado pétreo.

- ✓ Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos.
- ✓ Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

f) Por la Granulometría.

- ✓ Mezclas Continuas: Se presenta una granulometría con una distribución adecuada de cada uno de los tamaños de los agregados pétreos.
- ✓ Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en la banda granulométrica.

3.3.3 Características de la mezcla asfáltica.

La mezcla asfáltica preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así,

características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación:

- ✓ **Densidad.**
- ✓ **Vacíos de aire.**
- ✓ **Vacíos en el Agregado Mineral (VMA).**
- ✓ **Contenido de asfalto.**
- ✓ **Vacíos Llenos de Asfalto (VFA).**

3.3.4 Propiedades de mezcla asfáltica.

Para obtener una mezcla de calidad, esta debe poseer las propiedades siguientes: Estabilidad, Durabilidad, Flexibilidad, Resistencia a la Fatiga, Resistencia al Deslizamiento, Impermeabilidad y Trabajabilidad.¹⁹

Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otros efectos que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

¹⁹ Instituto del Asfalto Series del manual N 22, MS22

Durabilidad

Es la habilidad de una carpeta de asfalto, para resistir factores como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y la separación de las películas de asfalto. Esta propiedad se mejora de tres formas: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una gradación densa de agregado resistente a la separación y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

Impermeabilidad

Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento o a través de él. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos. Cierta grado de permeabilidad es aceptable, siempre y cuando, este dentro de los límites especificados.

Flexibilidad

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y sub-base. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes. Provocando daños visibles en la carpeta de rodadura.

Resistencia a la Fatiga

Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se conoce por medio de los estudios realizados a diferentes carpetas asfálticas, que los vacíos y la viscosidad del asfalto, tienen un efecto considerable en la resistencia a la fatiga.

Resistencia al deslizamiento Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada.

3.3.5 Mezcla Asfáltica Tibia

3.3.5.1 Definición de una mezcla asfáltica tibia.

Las mezclas asfálticas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.²⁰

El concepto de desarrollo sostenible abarca la reducción del consumo de materias primas (combustibles), la reducción de emisiones, y la posibilidad de un mayor reciclaje sin dejar de cumplir las necesidades de desarrollo. La Comisión de las Naciones Unidas Brundtland definió el desarrollo sostenible como "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". El desarrollo sostenible no se centra exclusivamente en el medio ambiente, sino que abarca tres áreas interdependientes; el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente, como se ilustra en la figura 3.10. La mezcla asfáltica tibia es consistente con los ideales descritos por el desarrollo sostenible y al mismo tiempo tiene el mismo desempeño que las mezclas asfálticas en caliente.

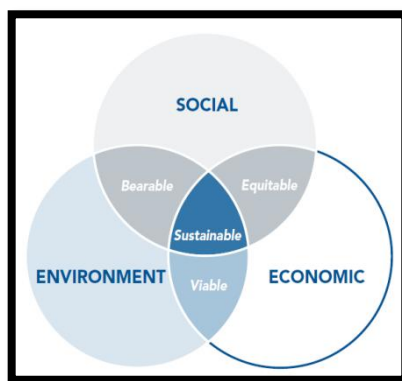


FIGURA 3.10 Desarrollo sostenible.

FUENTE: International Technology Scanning Program, "Warm Mix Asphalt: European Practice", 2008.

²⁰ International Technology Scanning Program, "Warm Mix Asphalt: European Practice", 2008.

3.3.5.2 Antecedentes de Mezclas asfálticas tibias.

El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto. A continuación se presentan un resumen de los antecedentes acerca de las mezclas asfálticas tibias.²¹

Año	Suceso
1995	Shell y KoloViedekke, iniciaron un programa para el desarrollo de un producto que fabrique las mezclas asfálticas a temperaturas más bajas, obteniendo mejores o equivalentes condiciones de desempeño que las HMA.
1999-2001	Reportes iniciales de WMA se expusieron en el Congreso Euroasphalt/Eurobitume, el Fórum Alemán del Bitumen y la Conferencia sobre Pavimentos Asfálticos en Sudáfrica.
2002	Directores de la NAPA hacen un recorrido por Dinamarca, Alemania y Noruega para examinar las tecnologías WMA, Aspha-min y Sasobit.
2003	En la convención anual de la NAPA, se presentan los estudios WMA. El NCAT investiga las WMA, Aspha-min y Sasobit, patrocinados por la NAPA, FHWA, Eurovia y Sasol.
2004	Se introduce el aditivo químico Evotherm ET, por Meadwestva Company, y su investigación es apoyada por NCAT Demostración WMA, presentada en el Mundo del Asfalto. Primeras pruebas de campo realizadas en Florida y Carolina del Norte.
2005	Formación del Grupo de Trabajo Técnico (TWG) de la WMA en un asocio de la NAPA con la FHWA. Su objetivo es la implementación adecuada través de la recolección de datos y análisis, de los métodos WMA. NCAT publica los primeros reportes sobre Sasobit y Aspha-min.
2006	Se presenta una sesión de medio día sobre WMA, durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto. El TWG, publica lineamientos sobre el funcionamiento y pruebas ambientales. Por la declaración de investigación de problemas, sometido a una evaluación de la AASHTO en 2005, se destinan fondos para investigar las WMA. NCAT pública reporte sobre Evotherm.

²¹ Alonzo R. Tesis Universidad de El Salvador

2007	<p>AASHTO y FHWA, realizan visitas a experiencias WMA, en Francia, Alemania y Noruega.</p> <p>Astec Industries introduce su tecnología de asfalto espumado.</p> <p>Meadwestva company, introduce el Evotherm DAT.</p> <p>PQ Corporation introduce una zeolita mejorada llamada Advera.</p> <p>30,000 ton de diferentes WMA, se colocaron en Yellowstone, en agosto.</p> <p>Se realizaron pruebas en Yellowstone para 3 secciones, una sección de control y otras 2 para Sasobit y Advera. Las densidades no fueron difíciles de alcanzar aún con las temperaturas bajas de las WMA. El porcentaje de humedad estaban por debajo del máximo permitido que es de 0.5%. Las pruebas demostraron que los agregados se secaron adecuadamente, aun cuando las temperaturas anduvieron entre 120 a 127 °C.</p>
2008	<p>El TWG desarrollo una guía de especificaciones para la Construcción de Carreteras con WMA en formato AASHTO.</p> <p>El Departamento de Transporte de Texas desarrollo especificaciones que permiten a los constructores de todos los estados usar las WMA.</p> <p>En Nashville se desarrolló la 1° Conferencia Internacional de las WMA.</p> <p>Pruebas documentadas WMA, se realizaron en 32 estados de USA.</p> <p>Se patentaron 30 nuevas tecnologías WMA en USA.</p>
2010	<p>Pruebas documentadas WMA en 45 estados de USA y 10 provincias canadienses.</p> <p>30 estados en USA y Canadá tienen especificaciones WMA.</p> <p>Cerca de 20 tecnologías WMA se patentaron en USA y se encuentran disponibles a nivel mundial.</p>
2011	<p>Se realizó la 2° Conferencia Internacional de las WMA, que atrajo a más de 550 personas de los 45 estados y 24 ciudades de St. Louis. Se hicieron revisiones prácticas en USA, Sur África y Europa. Más de 45 documentos técnicos fueron presentados.</p> <p>Un estudio conducido por FHWA, determino el incremento en el uso de WMA, de 17 millones de toneladas en 2009 a 47 millones de toneladas en 2010.</p>
	<p>En El Salvador, se introdujo el aditivo Evotherm, dando inicio a la construcción con WMA.</p> <p>Se hicieron 2 tramos de prueba, uno ubicado en Sonsonate donde se colocaron 428 toneladas y otro en San Vicente, frente al ingenio Jiboa, donde se colocaron 60 toneladas.</p>

TABLA 3.8 Antecedentes de las Mezclas Asfálticas Tibias.

FUENTE: Alonzo R. y otros. Tesis UES, Prowell B., WMA: Best Practices. Página Web: Asfalca.

3.3.5.3 Tecnologías que producen mezcla asfáltica tibia

Existen diferentes metodologías para volver tibia una mezcla asfáltica. Las cuales se presentan en el siguiente esquema:

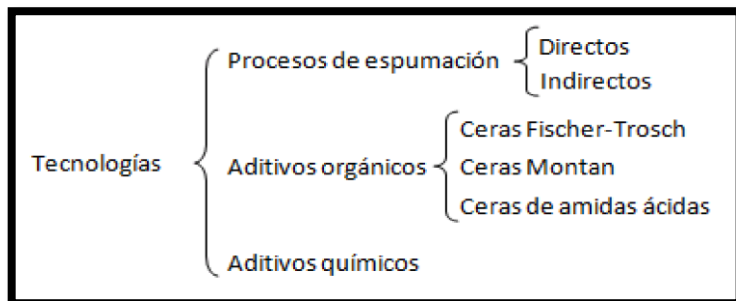


FIGURA 3.11 Esquema de las distintas tecnologías tibias.

FUENTE: Publicación realizada por España en su documento Investigación de Nuevas Mezclas de Baja Energía para la Rehabilitación Superficial

A continuación se va a explicar con mayor detenimiento el principio de funcionamiento en el que se basan cada una de las tecnologías que se pueden ver en la clasificación anterior, y tratar con mayor énfasis cada uno de los productos comerciales existentes, enmarcándolos dentro de alguno de los grupos establecidos en este apartado.

3.3.5.3.1 Procesos de espumación

El principio de funcionamiento de este tipo de tecnología WMA se basa en el uso de pequeñas cantidades de agua, ya sea bien inyectada directamente en el asfalto caliente o bien añadido con los agregados al tambor de mezclado. El proceso se puede observar en la figura 3.12.

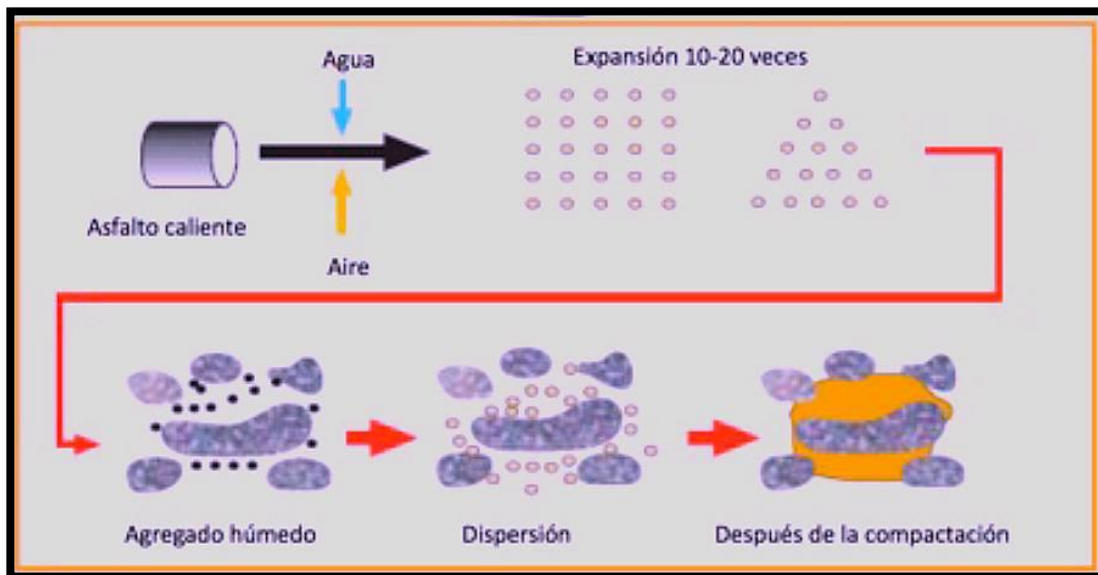


FIGURA 3.12 Proceso de mezcla de los procesos de espumación con los agregados
FUENTE: Ulloa A., "Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)". Boletín Técnico Vol. 2. N°13. Programa de Infraestructura del Transporte.

Estos métodos se han usado con ligantes de diferentes penetraciones, obteniéndose diversos resultados. Precauciones especiales tienen que tomarse para que la cantidad adicionada de agua sea la correcta, es decir, se debe añadir suficiente agua para asegurar el efecto de espumación, pero no demasiada de modo que se evite problemas de cohesión que se pudieran crear por la incorrecta evaporación de toda el agua.²²

Aunque el proceso principal es el mismo para un gran número de productos que usan este principio, el modo en el que el agua es añadida a la mezcla puede variar. Así pues, es posible distinguir entre dos tipos diferentes: basadas en agua o método directo y los que contienen agua o método indirecto.

Método indirecto

Este grupo se basa en el uso de zeolitas sintéticas para conseguir el proceso de espumación. Este material está compuesto de aluminosilicatos de metales alcalinos,

²²Advera WMA Zeolite. Smith A. 2007.

y ha sido hidrotérmicamente cristalizado. Contienen aproximadamente un 20% de agua de cristalización, la cual se libera de la estructura de la zeolita ante el aumento de temperatura provocado por la adición del asfalto, causando un efecto de micro espumación en la mezcla asfáltica.²³

La estructura de las zeolitas está formada por vacantes relativamente grandes respecto su tamaño, donde cationes e incluso moléculas o grupos de moléculas (en este caso agua) pueden ser almacenados. La habilidad de este material de poder absorber y perder agua sin dañar su estructura cristalina es una las principales características de estos silicatos.²⁴

Nombre	Zeolita
Apariencia	Las zeolitas que se usan son de tipo A. que se venden en forma de un polvo blanco y polvo con tinte amarillo
	La distribución del tamaño de las partículas y la densidad se usan como valores característicos
	Su distribución de tamaño de partículas provee información acerca de cómo manejarlas y usarlas en el proceso
	La densidad da información acerca de la porosidad del material
Estructura	Son silicatos de estructura tridimensional, altamente porosas, con grandes huecos o canales
	Su tamaño de poros va desde las 2 a las 5 Å (1Å=10 ⁻¹⁰ m)
	Las zeolitas conservan su forma y tamaño
Propiedades /efecto	Las zeolitas pueden absorber partículas ajenas dentro de su estructura y posteriormente liberarlas sin cambiar su forma
	No reaccionan a través de su superficie exterior por que todos los centros activos están situados dentro de los poros y los huecos.
	Las zeolitas naturales y sintéticas contienen de 6 a 12% y 25% de agua, respectivamente
	Esta agua se libera selectivamente en temperaturas que van desde los 70 hasta los 220 °C

TABLA 3.9. Características de la zeolita.

FUENTE: Norma Alemana German Asphalt Paving Association.(2009). Warm Mix Asphalts. Elke Schlüter communication agency, Alfter.

²³Evaluation of Aspha-Min® Zeolite for use in warm mix asphalt. 2005.

²⁴ Review of warm mix asphalt, 2008.

Algunas marcas comerciales se pueden mencionar:

Aspha-min.

- Producido por Eurovia Services GmbH.
- Cuando se mezcla con un aglomerante, el agua se libera a temperaturas crecientes, aproximadamente 185 a 360 °F.
- Provoca la formación de espuma en el asfalto que reduce la viscosidad y mejora la trabajabilidad de la mezcla.
- El agua se libera con el tiempo y puede hacer que la mezcla sea trabajable durante un máximo de 6 a 7 horas o hasta que la mezcla se enfría por debajo de 100 °C.
- La tasa de adición recomendado es 0,3% en peso de la mezcla.

Advera WMA.

- Producido por PQ Corporation.
- Nueva generación de la zeolita sintética Aspha-min.
- La humedad es liberada lentamente con el tiempo en el asfalto en forma de vapor para producir la formación de espuma.
- Se mejora la trabajabilidad.
- Este vapor se retira con la compactación del asfalto o absorbido de nuevo por la zeolita Advera después de la pavimentación de modo que ningún exceso de humedad está presente en el asfalto.
- Tiene una gradación que pasa por completo por el tamiz N° 200.
- Se sugiere una dosificación de 0,25% en peso de la mezcla total de asfalto.
- Se añade en la planta a través de una línea de fibra modificada.²⁵

²⁵ Mayor Información consúltese Laboratory Evaluation of Performance of Warm Mix Asphalt Washington 2011.

Método directo

Este apartado agrupa a aquellos productos que usan agua de un modo directo. Es decir, el agua que se necesita para crear el efecto de espumación es inyectada directamente al flujo de betún caliente, realizándose en la mayoría de los casos a través de boquillas. El agua añadida rápidamente se evapora, produciendo un largo volumen de vapor, el cual lentamente va desapareciendo.²⁶

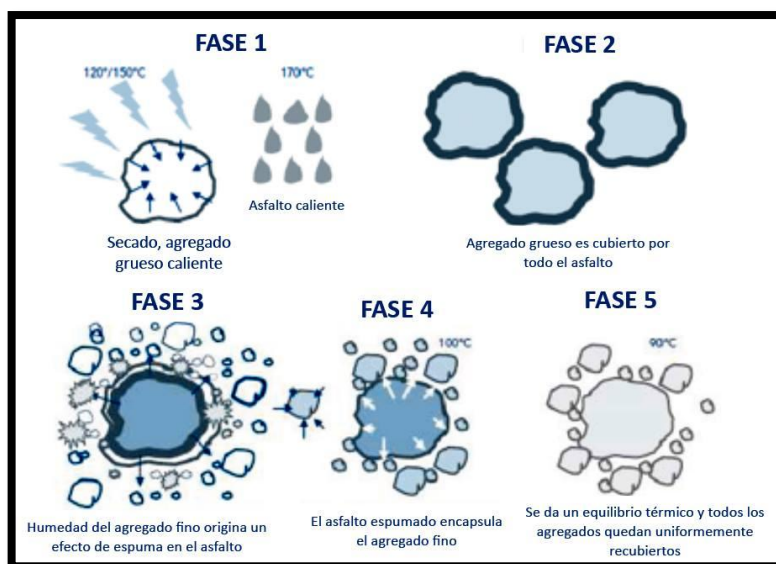


FIGURA. 3.13 Proceso De mezcla de los Procesos de espumación Con los agregados
FUENTE: Ulloa A., "Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)". Técnico Vol. 2. N°13. Programa de Infraestructura Del Transporte.

Dentro de este grupo, se puede realizar una distinción aún mayor como sigue (basada en los productos comerciales):

LT Asphalt.

- Producido por Nynas.
- Combina entre 0.5 a 1% de filler hidrofílico, para ayudar a controlar la humedad del espumado.

²⁶ Warm-Mix Asphalt: European Practice. 2007.

Gencor, Ultrafoam GX.

- Producido por Gencor Industries, Inc.
- El sistema utiliza la energía suministrada por la bomba de asfalto para espumar el asfalto.
- El asfalto y el agua se incorporan a diferentes temperaturas, presiones y caudales.
- Se puede conectar a una variedad de plantas de tambor.

WAM Foam.

- Producido por el asocio de KoloVeidekke, Shell y BP.
- Conocido como el método de las dos fases.
- Los agregados son calentados a una temperatura aproximada de 130°C.
- Se mezclan los agregados con un ligante blando en una proporción del 20 al 30% del contenido de asfalto.
- Luego se le adiciona un ligante duro espumado, con una dosificación de agua del 2 al 5%.
- Bajar la viscosidad de la mezcla para dotarla de la trabajabilidad necesaria.²⁷

LEA (Low Emission Asphalt).

- Producido por McConnaughay Technologies.
- Se conoce como mezclado secuencial.
- El agregado grueso es calentado a una temperatura aproximada de 150°C.
- El agregado es mezclado con la cantidad total de asfalto.
- Se usa una dosificación aproximada de 0.5% del peso del asfalto en aditivos que mejoran el recubrimiento y la adhesión al asfalto.
- Después de que el agregado grueso es cubierto por el asfalto, se mezcla con agregado fino que tiene humedad.
- La dosificación de la humedad es aproximadamente del 3%.

²⁷Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. University of Washington, 2004.

- La humedad hace que la mezcla de asfalto y agregado grueso espume, encapsulando al agregado fino.²⁸

3.3.5.3.2 Aditivos orgánicos.

Estas tecnologías se basan en la adición a la mezcla de distintos tipos de cera. Por encima del punto de fusión de las ceras, se produce generalmente un decrecimiento en la viscosidad. Durante el periodo de enfriamiento de la mezcla extendida los aditivos fundidos se solidifican en partículas microscópicas y uniformemente distribuidas que incrementan la dureza del ligante.²⁹

Si el punto de fusión de las ceras es más bajo que las temperaturas que se prevén en servicio del asfalto, pueden aparecer complicaciones, convirtiéndose entonces el asfalto en un material frágil a bajas temperaturas; por tanto, es necesario elegir cuidadosamente el tipo de cera a utilizar.

Las ceras usadas por estos productos son moléculas formadas por cadenas hidrocarbonadas que se funden a temperaturas entre los 80 y los 120°C, modificando las propiedades originales del ligante. El punto de fusión depende en gran medida de la longitud de la cadena de carbonos (C45 o más).³⁰

Los procesos de producción de cera se han desarrollado desde los 80, existiendo 3 tipos diferentes tecnologías, que se diferencian en el tipo de cera que usan para reducir la viscosidad. Las ceras son: Fischer-Tropsch, ámidas ácidas fatty y ceras de Montana.³¹

²⁸Low Energy Asphalt. Página web del producto.

²⁹Warm Asphalt Mix – Technologies.

³⁰Warm Asphalt Bituminous Mixtures with regards to energy, emissions and performance.

³¹Warm Mix Asphalts. German Asphalt Paving Association, 2009.

		Sustancia		
Nombre		Ceras Fischer-Trpsch	Amidas ácidas grasas	Ceras de Montana
Apariencia		Polvo blanco o gránulos		Polvo marrón o gránulos
Estructura		Larga cadenas de hidrocarbonados asfálticos	Diamidas ácidas grasas	Ester ácido montánico
Propiedades	Punto de fusión (°C)	114-120	140-145	10-140
	Punto de congelación (°C)	100-105	135-142	100-130
	Viscosidad Dinámica en Mpa	130 °C	nov-15	No medible
		140 °C	sep-13	sep-13
		150 °C	08-dic	3
Efecto en betún de carretera 50/70	Aditivo (% en peso)	3	3	2.5-3
	Incremento del punto de ablandamiento R&B (°C)	25-35	40-55	Información del producto
	Decrecimiento de la penetración (1/10 mm)	15-25	oct-15	Información del productor

TABLA 3.10 Distintos tipos de ceras usado en las mezclas tibias y características.

FUENTE: Norma Alemana German Asphalt Paving Association.(2009). Warm Mix Asphalts. Elke Schlüter communication agency, Alfter.

Algunos tipos de marcas comerciales de aditivos orgánicos que se encuentran en el mercado y de los que se puede dar una descripción detallada son:

Sasobit.

- Producido por Sasol Wax Corporation.
- Es una cera realizada por la síntesis Fisher Tropsch.

- Tiene cadenas de hidrocarburos con alrededor de 100 átomos de carbono que incrementa el punto de fusión de la cera, permitiendo que sea soluble en el asfalto a temperaturas mayores de 115°C.
- Reduce la viscosidad del asfalto a temperaturas más altas que el punto de fusión de la cera.
- Aumenta la resistencia a la deformación permanente del asfalto cuando se enfría por debajo del punto de fusión de la cera.
- Se recomienda dosificaciones del 0.8 a 3% de cera en peso del aglutinante.

TLA-X.

- Producido por Trinidad y Tobago Limited.
- Se extrae del lago de asfalto de Trinidad en forma sólida, y está compuesto de materia mineral, ligantes solubles, agua y otros componentes menores.
- Tiene alta resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente.
- Es fácilmente mezclado con asfalto tradicional.
- Mantiene un alto nivel de estabilidad y buena adherencia a los agregados.
- Se produce en forma granulada y se añade directamente al aglutinante o soplado en la mezcla de asfalto cerca de donde se añade el aglutinante de asfalto.
- Se evita que los gránulos se peguen entre sí durante el transporte o almacenamiento, recubriendo con una pequeña cantidad de arcilla que se toma en cuenta en el diseño de mezcla.³²

3.3.5.3.3 Aditivos químicos.

Son productos que generalmente incluyen una combinación de agentes emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar la envuelta, la trabajabilidad de la mezcla, y la compactación, así como promotores de adhesión (agentes cohesivos). La cantidad añadida y la reducción de temperatura conseguida

³² Laboratory Evaluation Of Performance Of Warm Mix Asphalt. Washington, 2011.

por estas tecnologías dependen del producto específico utilizado. Los aditivos generalmente se mezclan con el ligante antes de que éste sea introducido en el tambor de mezclado. Como se puede observar en la figura 3.14.

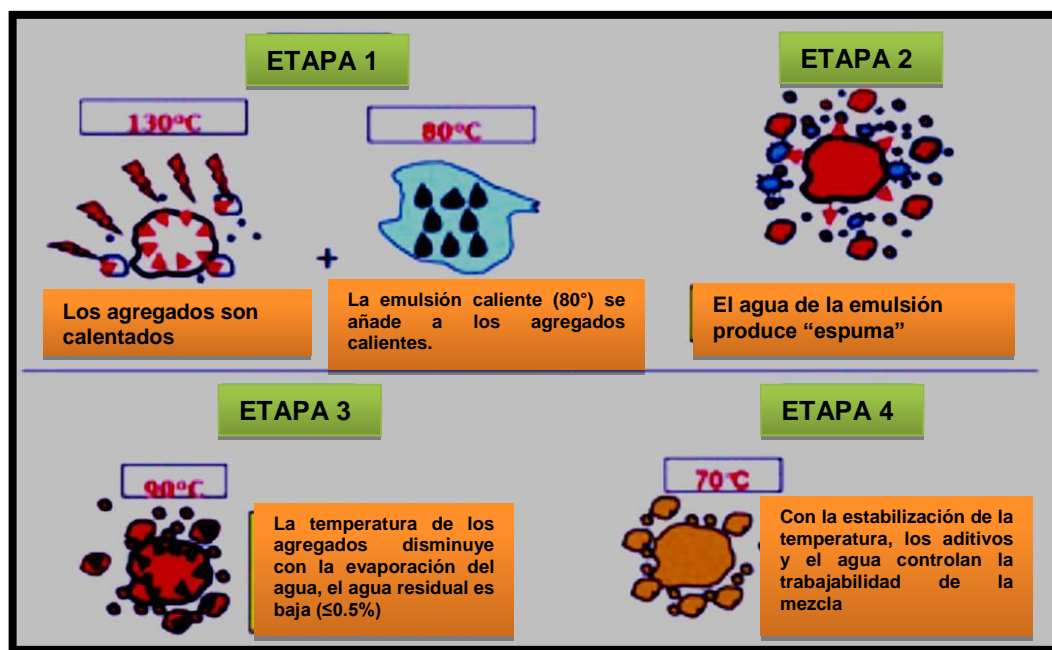


FIGURA. 3.14. Proceso de Mezclado Utilizando Emulsiones.

FUENTE: Ulloa A., "Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)". Boletín Técnico Vol. 2. N°13. Programa de Infraestructura Del Transporte.

Tecnologías frecuentemente usadas:

Evotherm ET.

- Producida por Meadwestvaco.
- Es una emulsión asfáltica que combina diferentes productos químicos que permiten al agua estar presente en el aglutinante para reducir la fricción entre el aglutinante y agregado.
- Mejora la trabajabilidad de la mezcla.
- El agua se evapora de la mezcla en forma de vapor y sólo el asfalto y los agregados se quedan.
- Tiene las mismas propiedades de color y recubrimiento que la HMA.

- Reduce temperaturas entre 50-75°C.

Evotherm Dispersed Asphalt Technology (DAT).

- Producida por Meadwestvaco.
- No se introduce como una emulsión.
- Tiene el mismo paquete químico que se diluye con una pequeña cantidad de agua.
- Se inyecta en la línea de asfalto directamente, justo antes de ser incorporado en el tambor de mezcla o en la amasadora para las plantas por batchadas.

Evotherm 3G (REVIX).

- Producida por Mathy Technology and Engineering Service y Paragon Technical Services.
- Es una versión libre del agua de la tecnología DAT Evotherm.
- Reduce temperaturas entre 15-30°C.³³

3.4 MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA CON LA TECNOLOGÍA ASTEC GREEN DE ASFALTO ESPUMADO.

3.4.1 Historia de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado

El profesor Ladis Csanyi, de la estación experimental de ingeniería de la Universidad Estatal de Iowa en el año de 1956, fue la primera persona en descubrir el proceso de inyección de vapor para formar la espuma en una mezcla asfáltica. Las primeras aplicaciones de asfalto espumado se produjeron en el año 1957 en una carretera estatal de Iowa, Estados Unidos. En años siguientes se hicieron reportes de varias aplicaciones, como en Arizona (USA) en el año de 1960 y en Nipawin (Canadá) en el año de 1962. La compañía Mobil Oil en 1968, mejoró la tecnología al adquirir los derechos de la patente de invención por parte del

³³ Laboratory Evaluation Of Performance Of Warm Mix Asphalt. Washington, 2011.

Profesor Ladis Csanyi y desarrolló la primera cámara de expansión que mezcla agua fría con asfalto para formar la espuma, convirtiéndose de esta manera en un proceso más práctico, económico y aplicable.

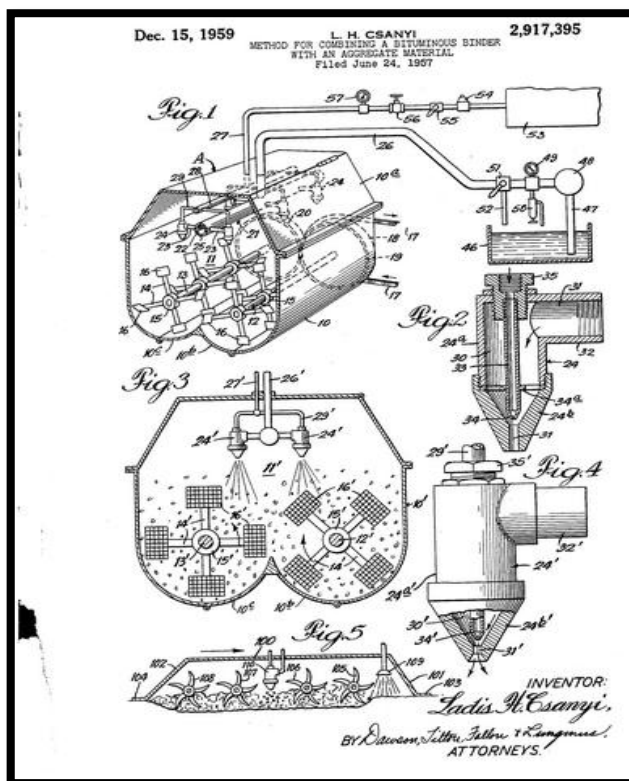


FIGURA. 3.15 Esquema de la patente del invento realizado por Ladis Csanyi.

FUENTE: Csanyi L., Method for Combining a Bituminous Binder with an Aggregate Material (Sistema de Patentes).

Desde 1970 la tecnología para espumar asfalto de Mobil Oil se ha usado en diferentes proyectos alrededor del mundo como en Australia, Sudáfrica, Inglaterra, Alemania, Francia, Egipto y muchos más países. De forma simultánea, la empresa estadounidense Continental Oil Company en 1970, obtuvo los derechos de comercialización para Estados Unidos y desarrolló el primer laboratorio de asfalto espumado para realizar investigaciones acerca de esta nueva tecnología. Desde entonces se ha usado en varios estados al Norte del país como Colorado, Dakota del Norte, Virginia, Pensilvania, Michigan y Oklahoma. Luego de que la patente de

Mobil Oil para asfalto espumado expirará en 1991, se han desarrollado muchos nuevos sistemas para espumar asfalto.³⁴

3.4.2 Asfalto espumado.

El asfalto espumado es producido mediante un proceso mecánico en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua (entre 1% y 2% sobre el peso del asfalto) al asfalto caliente (160 °C a 180° C) dentro de una cámara de expansión, lo que resulta en la producción instantánea de espuma en el asfalto.

El efecto de espuma se produce en el momento que las pequeñas gotas de agua fría entran en contacto con el asfalto caliente, lo que ocasiona transferencia de energía entre el asfalto y el agua. Esto produce un aumento en la temperatura del agua a más de 100 °C, la cual se evapora instantáneamente creando burbujas de vapor que se encapsulan dentro del asfalto. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición, cambia de estado, y al hacerlo, crea una burbuja cubierta por una película delgada de asfalto llena con vapor de agua.³⁵

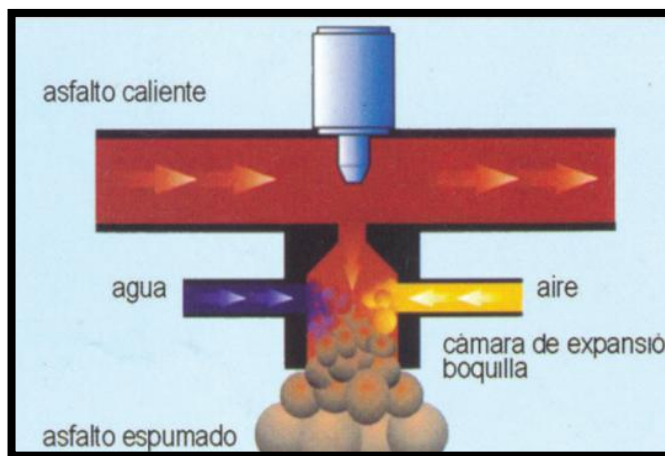


FIGURA 3.16 Producción de asfalto espumado.

FUENTE: Orellana R., Instituto Chileno del Asfalto. "Asfalto Espumado, Tecnología y Aplicaciones".

³⁴ Consúltese Thenoux G. y Jamet A., Tecnología de Asfalto Espumado, 2002.

³⁵ Evaluación de desempeño de bases estabilizadas con asfaltos espumados en tramos de prueba, Costa Rica, 2011.

Esta mezcla se libera a través de una boquilla y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto que aumentan en volumen (de 10 a 12 veces) hasta alcanzar el equilibrio por tensión superficial. Sin embargo, el equilibrio dura menos de 1 minuto debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua. Una vez que el asfalto espumado llega a temperatura ambiente las burbujas de vapor colapsan por condensación y se desintegran la espuma. El asfalto recupera su volumen inicial.³⁶

3.4.3 Propiedades del asfalto espumado

3.4.3.1 Razón de expansión

Razón de expansión, es una medida de la viscosidad de la espuma y determina que tan bien se dispersa el asfalto en la mezcla. Se calcula como la razón del volumen de asfalto espumado entre el volumen del asfalto original.

3.4.3.2 Vida Media

Vida media, mide la estabilidad de la espuma y provee una indicación de la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo, en segundos, que tarda el asfalto en hacer una reducción de su volumen a la mitad del volumen expandido.³⁷

3.4.3.3 Características de la razón de expansión y la vida media.

Las dos propiedades previas se ven afectadas principalmente por:

- 1) la temperatura del asfalto: a mayor temperatura mayor cantidad de espuma es obtenida.
- 2) La cantidad de agua adicionada: al aumentar la cantidad de agua incrementa el volumen de espuma hasta 1500 veces. Sin embargo, la vida media se reduce, por lo que estas dos características están inversamente relacionadas a la cantidad de agua añadida.

³⁶Thenoux y Jamet, 2002.

³⁷ Evaluación de desempeño de bases estabilizadas con asfaltos espumados en tramos de prueba, Costa Rica, 2011.

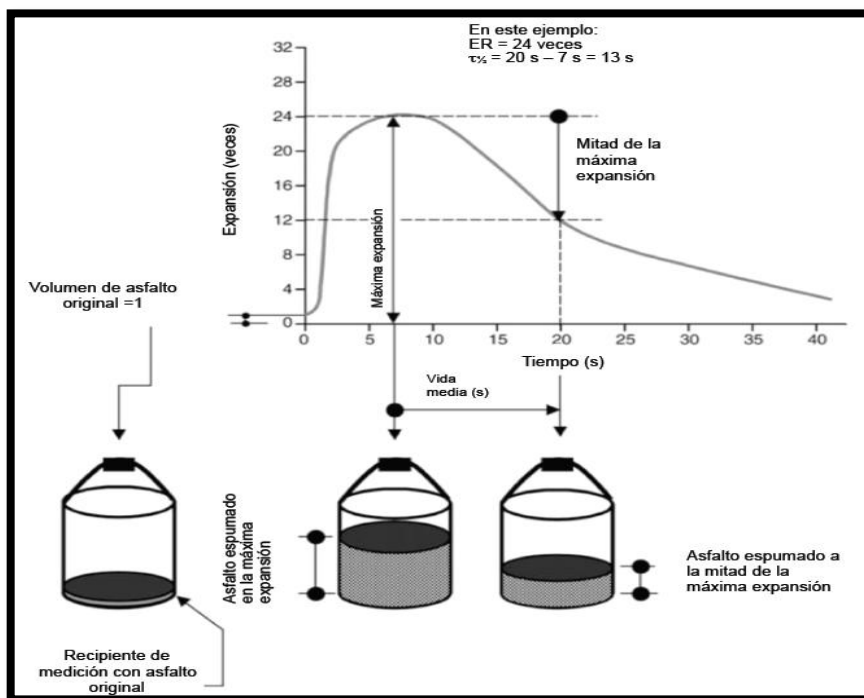


FIGURA. 3.17 Caracterización de Razón de Expansión y Vida Media

FUENTE: Jiménez M., "Qué es el Asfalto Espumado, se puede utilizar en Costa Rica". Boletín Técnico Vol. 2. N°13. Programa de Infraestructura del Transporte.

Las especificaciones mínimas aceptables para una estabilidad afectiva del espumado son:

- Razón de expansión de 8 veces
- Vida media de 6 segundos.

Si estas no se cumplen, se tiene que descartar el asfalto pues no es adecuado para ser espumado.³⁸

3.4.4 Definición de mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.

Las mezclas tibias con asfalto espumado se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores, es decir entre 100°C y 140°C o temperaturas iguales que las mezclas en caliente, su producción involucra una nueva tecnología, que consiste en la inyección de una pequeña cantidad de agua fría, de entre 1.5 al 5

³⁸ Manual de Reciclado en Frío. 2° edición. Wirtgen, 2004.

por ciento del peso de asfalto, a una masa de asfalto caliente dentro de una cámara de expansión generando espontáneamente espuma; a partir de lo cual es posible colocar y compactar las mezclas asfálticas a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

La mezcla asfáltica tibia (WMA) es en definición como una mezcla asfáltica en caliente (HMA), a excepción que se produce y coloca a temperaturas entre un 28°C a 56°C menores. El diseño de la mezcla no se ve afectado con el uso del sistema Astec Green de asfalto espumado, por tal razón el mismo diseño de mezcla usado para mezcla asfáltica en caliente puede ser utilizado para la mezcla asfáltica tibia, debido a que solo un pequeño remanente de agua queda en la mezcla compactada, el cual está muy por debajo de valores de humedad permitidos en una mezcla asfáltica.

3.4.5 Características de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.

Algunas características de la mezcla asfáltica tibia producida por el sistema Astec Green son:

- La mezcla asfáltica tibia con el sistema Astec Green puede producirse a las mismas temperaturas que la mezcla asfáltica en caliente, teniendo estas trabajabilidad por tiempos más prolongados.
- No se produce caídas significativas de temperaturas en la mezcla cuando se le agrega agua. Las caídas significativas son producidas por la humedad interna, que se evidencia, por el vapor y el agua que sale en la parte inferior de los depósitos. En la mezcla tibia espumada solo un remanente de humedad del 0.0012% queda en la mezcla compactada, el cual está por debajo del valor aceptado en diversos estados de Estados Unidos, el cual permita hasta un 0.5%.
- No existen requerimientos especiales para el manejo.
- Las muestras no necesitan ser envejecidas o condicionadas para realizar pruebas volumétricas. Sin embargo es imprescindible que las muestras

mantengan su temperatura, de manera de no permitir su enfriamiento, esto se puede realizar colocándolas en un horno.

- La mezcla retorna a actuar como una mezcla convencional abajo de los 100°C.
- Las temperaturas de compactación en laboratorio deben coincidir con la temperatura de compactación en campo en más o menos 5°F para alcanzar similitudes en la compactación con la mezcla colocada. Sin embargo, por consistencia y conveniencia, poner un diferencial de temperatura de producción puede también ser usado.
- Todas las mezclas lucen exactamente igual a la mezcla asfáltica en caliente, a excepción que no se produce humo ni olor. En algunas ocasiones, la mezcla se ve ligeramente más rica en asfalto con el mismo contenido de asfalto que la mezcla asfáltica en caliente, especialmente en mezclas vírgenes. La mezcla luce ligeramente más rica en asfalto debido a la expansión del espesor de la película gracias a la presencia burbujas de espuma microscópicas o a la presencia de los productos finales ligeros al escapar el humo y los gases que se han formado en la mezcla a grandes temperaturas.
- Las pérdidas de espesores para alcanzar el espesor especificado luego de la compactación, es el mismo esperado en las mezclas en caliente.
- La temperatura a la cual la mezcla asfáltica tibia debe compactarse depende del diseño de la mezcla. Se considera que la mezcla tibia tendrá el mismo diferencial de temperatura de compactación que la mezcla en caliente, para las mismas condiciones ambientales y logísticas.³⁹

³⁹Performance Experience with Mechanically Foamed WMA. Varner M, 2012.

3.4.6 Ventajas de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.

Entre las ventajas que nos brinda la reducción de la temperatura en las mezclas asfálticas, podemos mencionar:

- Facilita la colocación y compactación del pavimento asfáltico, al aumentarse de forma significativa la trabajabilidad.
- Reducción en el uso de combustibles para la producción de mezclas asfálticas.
- Mejora el confort y ambiente laboral para la mano de obra en el sitio.
- Elimina el envejecimiento prematuro del ligante asfáltico. Este factor vinculado a que el envejecimiento depende de dos factores que son notablemente disminuidos en la mezcla tibia, ellos son la pérdida de volátiles y la oxidación.
- Permite una apertura al tráfico más rápida, ya que la temperatura a la cual se terminó la puesta en obra es menor.
- Reduce la segregación térmica en la mezcla, debido a que se producen menores diferenciales térmicos que afectan la homogeneidad de la mezcla.⁴⁰

3.4.7 Aspectos comparativos entre Mezcla asfáltica en caliente MAC y Mezcla asfáltica tibia MAT.

- En la mezcla asfáltica tibia se reduce las emisiones de compuestos orgánicos volátiles.
- Se tienen menores velocidades de enfriamiento, que permiten mantener las temperaturas por un periodo más largo de tiempo y así permitir distancias más largas de transporte.
- Se obtienen resistencias al daño por humedad similares. Es importante mencionar que el daño que la mezcla tibia puede sufrir a causa del agua es mayor que el de una mezcla asfáltica en caliente.

⁴⁰ Manual de mantenimiento de vías urbanas, utilizando mezcla asfáltica en caliente, tibia y en frío, Tesis Universidad de El Salvador, 2012.

- Reduce las temperaturas de colocación y compactación en comparación con las mezclas convencionales.
- La viscosidad se mantiene constante en un rango mayor de temperatura para una mezcla asfáltica tibia en comparación con la mezcla asfáltica en caliente.

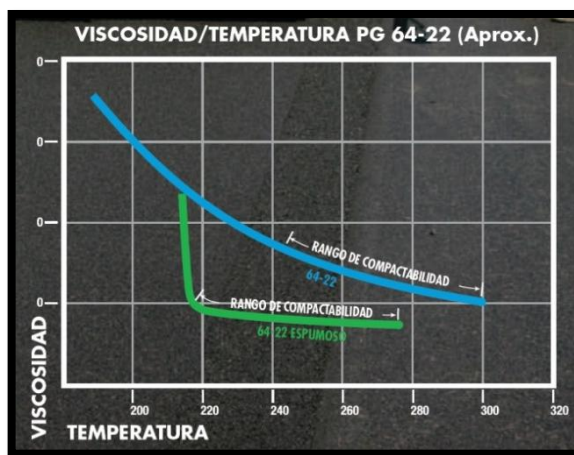


FIGURA. 3.18 Curva de Viscosidad-Temperatura.

FUENTE: Sistema Double Barrel Green, “Sistema de Mezcla de Asfalto Tibio”.

- Se reducen grandemente los gases y olores en la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.



FIGURA. 3.19 Comparación de la Emisión de gases entre HMA y WMA

FUENTE: Ulloa A., “Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)”. Boletín Técnico Vol. 2. N°13. Programa de Infraestructura del Transporte.

- Existe una mayor flexibilidad en compactación y colocación para la mezcla asfáltica tibia.
- La mezcla asfáltica tibia pueden colocarse en climas fríos o en las noches donde baja considerablemente la temperatura ambiente.
- Presenta una mayor resistencia al fisuramiento por temperatura que la mezcla asfáltica en caliente.
- Un mejor ambiente laboral para los obreros que trabajan colocando y compactando la mezcla asfáltica en campo.⁴¹

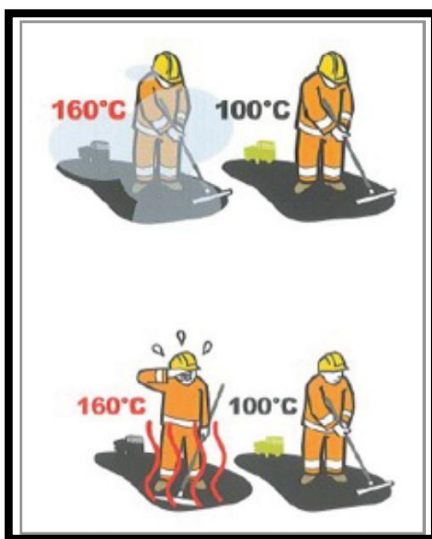


FIGURA. 3.20 Comparación en el nivel de Confort En la mano de obra entre HMA y WMA.
FUENTE: Ulloa A., “Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)”. Boletín Técnico Vol. 2. N°13. Programa De Infraestructura del Transporte.

3.4.8 Producción de asfalto espumado

3.4.8.1 Sistema ASTEC GREEN para asfalto espumado.

El sistema Astec Green está diseñado para trabajar en todos los tipos de plantas de asfalto para todos los productores. Las unidades pueden ser instaladas tanto en equipos nuevos como en equipos usados. Consta básicamente de un inyector

⁴¹ Manual de mantenimiento de vías urbanas, utilizando mezcla asfáltica en caliente, tibia y en frío. Tesis Universidad de El Salvador, 2012.

múltiple de agua, tuberías de espumación y un suministro de boquillas que integran al cemento asfáltico líquido y colectores de agua.⁴²



FIGURA. 3.21 Sistema de Asfalto Espumado Integrado a una Planta de Mezcla Asfáltica.

FUENTE: Sistema Double Barrel Green, “Sistema de Mezcla de Asfalto Tibio”.

El sistema cuenta con los siguientes elementos:

1. **El colector Green Pac.** El colector incluye todas las válvulas, aceite caliente, secciones de tuberías y piezas embobinadas, bridas, piezas compensatorias y otras piezas necesarias que se integran apropiadamente con el equipo existente.
2. **La Rampa Green Pac.** La rampa es un metal deslizante que viene en dos tamaños estandarizados:
 - a) Largo para acomodar 550 galones (2080 litros) en un tanque de agua opaca.
 - b) Pequeño para acomodar 165 galones (624 litros) en un tanque de agua opaca.

La rampa sirve como una plataforma de montaje para:

- a) **La Cabina de control** contiene:
 - i. Switch de apagado externo.

⁴² Mayor Información consúltese Performance Experiencewith Mechanically Foamed WMA System Varner M, 2012.

- ii. Variador de frecuencia para la bomba de agua (VFD interface remota montada en una puerta de control para mejorar el cumplimiento del arco eléctrico).
- iii. Control de señales para condicionar equipo (I/O)
- iv. Protección de circuitos.
- v. 480 VAC a 120 VAC. Un transformador que provee energía a una banda resistente a la intemperie suministrando energía a un opcional paquete de climas fríos.
- vi. Si la planta es equipada con un paquete de medidores de tubería a tubería AC.

b) Tanque de agua.

- i. Válvula de llenado y flotación para conectar el tanque a un suministro de agua continuo.
- ii. Sensor del nivel de agua para avisar al operador si el nivel del agua se encuentra bajo.
- iii. Drenaje.
- iv. Puerto de inspección.

c) Pistón de accionamiento directo de las tuberías de agua y motor incluido.

- i. Filtro de entrada.
- ii. Medidor del caudal del agua.
- iii. Tuberías externas incluidas las líneas de calibración y válvulas.
- iv. Presión de desviación del agua alivia las válvulas y el interruptor de desviación.

3. Panel de control Green Pac.

4. La energía necesaria, cables de comunicación y software.

5. Líneas de agua de alta presión entre la bomba de agua montadas en la rampa y el sistema de colectores Green Pac.

Descripción de operación de tecnología Astec Green para producción de mezcla

a) Agua

Para la producción de la mezcla asfáltica tibia espumada, el agua se distribuye en el sistema por medio de una bomba pistón de caudal positivo, capaz de dosificar con precisión el agua en el sistema. A través de los controles de retroalimentación se inspecciona la velocidad de la bomba para mantener un flujo de agua apropiado según el flujo de asfalto. El flujo de agua debe ser constante y sin complicaciones a medida que los niveles de producción aumentan o disminuyen.

El agua se inyecta al asfalto líquido por medio de una serie de inyectores de acero inoxidable ubicados sobre las cámaras espumantes correspondientes.

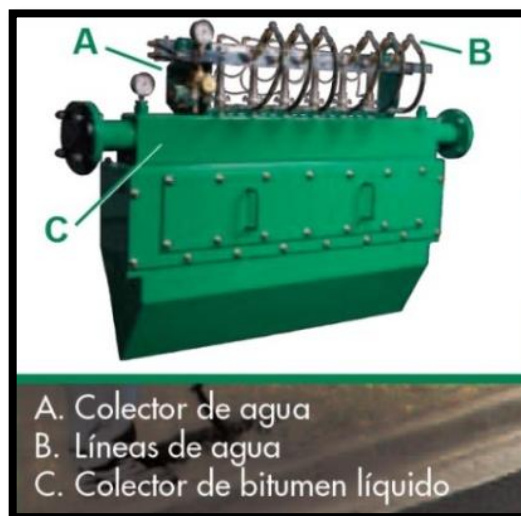


FIGURA. 3.22 Sistema de Inyección de Espuma del Sistema Astec Green.
FUENTE: Sistema Double Barrel Green, "Sistema de Mezcla de Asfalto Tibio".

Se provee un depósito de agua libre de corrosión montado en una base con una válvula de llenado automático. Si no ingresa agua, una alarma que se activa por el

nivel de agua bajo alerta al personal de la planta para que el problema se solucione con rapidez sin malgastar mezcla.⁴³

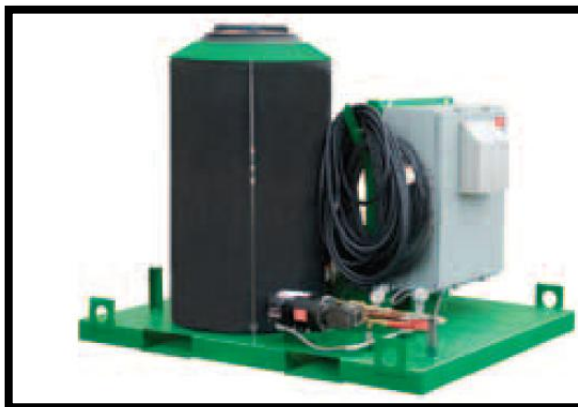


FIGURA. 3.23 Tanque de Almacenamiento de Agua del Sistema Astec Green.
FUENTE: Sistema Double Barrel Green, “Sistema de Mezcla de Asfalto Tibio”.

Tasa de dosificación.

El dosificador de agua Green Pac es controlado en base a:

1. La entrada del operador, en la cual el operador puede escoger la tasa de dosificación de agua a inyectar a través de la pantalla táctil o en una pantalla de control integrada.
2. Por medio del Caudalímetro. El controlador lógico programable de Green Pac usa el caudal del cemento asfáltico con la tasa de dosificación deseada para calcular el caudal de agua objetivo.

Normalmente la dosificación del agua puede ser manualmente variada entre el **1.5% al 5%** del caudal virgen, siendo las más comunes las que varían de **2% al 3.5%** y una dosificación del **2%** la más adoptada. La dosificación a inyectar está en proporción al cemento asfáltico.

⁴³ Sistema Double Barrel Green, “Sistema de Mezcla de Asfalto Tibio”.

Podemos entonces representar, de acuerdo a lo considerado en el párrafo anterior, que para un contenido de asfalto del 5% en una mezcla virgen, el porcentaje de agua a inyectar será de 0.1%.

Cantidad de agua a inyectar: Dosificación x contenido de asfalto = 2 % x 5% = 0.1% de la mezcla.

De acuerdo a los estudios que presenta la tecnología Astec Green, de la cantidad de agua inyectada por tonelada solamente un **0.0012%** permanece en la mezcla asfáltica tibia, como un porcentaje de la masa de la mezcla. Lo anterior se demuestra a continuación.⁴⁴

Se consideran las siguientes propiedades en la mezcla

Contenido de asfalto: 5%

Porcentaje de Vacíos: 5% (luego de compactar)

Densidad de la Mezcla: 110 lb/ ft³ (antes de compactar)

Densidad de la Mezcla: 140 lb/ ft³ (después de compactar).

Cantidad de mezcla: 2000 lb.

Antes de la compactación la mezcla está formada por un volumen de 75% de agregados y asfalto y un 25% de vacíos de aire.

1. Volumen de mezcla no compactada (MNC)

$$MNC = \text{pesomezcla} / \text{densidadmezcla sin com.} = \frac{2000 \text{ lb/ton}}{110 \text{ lb/ft}^3} = 18.2 \frac{\text{ft}^3}{\text{ton}}$$

Estos 18.2 ft³/ton representan el 100% de la mezcla, del cual un 25% es de vacíos de aire por tanto se tiene 4.54 Ft³/ton de volumen de vacíos. Considerando la densidad del asfalto de 65 lb/ft³, se determina el volumen de asfalto en una tonelada de mezcla.

⁴⁴Performance Experience with Mechanically Foamed WMA System. Varner M, 2012.

2. Volumen de asfalto en una tonelada de mezcla (VA)

$$VA = \frac{\text{contenidodeasfalto} * \text{peso}}{\text{Densidaddeasfalto}} = \frac{5\% \times 2000 \text{ lb/ton}}{65 \text{ lb/ft}^3} = 1.54 \frac{\text{ft}^3}{\text{ton}}$$

El volumen total que está disponible para el desarrollo de asfalto espumado es la suma de los vacíos de aire no compactados y el volumen del asfalto líquido.

3. volumen total disponible para el asfalto espumado

$$VE = \text{vaciosdeaire sin compactar} + VA = 4.54 + 1.54 = 6.08 \frac{\text{ft}^3}{\text{ton}}$$

4. Masa de agua inyectada por tonelada (MI)

$$VE = \% \text{ asfalto} * \% \text{ agua} * \text{pesomezcla} = 0.05 \times 0.02 \times 2000 = 2 \text{ lb/ton.}$$

Asumiendo que el asfalto líquido llega a las boquillas de espumación a una temperatura cercana a los 150° C, el agua inyectada se expandirá desde 0.016 ft³/lb (volumen específico agua líquido) a 30.53 ft³/lb (volumen específico agua vapor).

5. Masa de agua remanente en la mezcla no compactada. (MANC)

$$\begin{aligned} MANC &= \text{Volumendevacios sin compactar} / \text{volumenespecificoaguavapor} \\ &= \frac{4.54 \text{ ft}^3/\text{ton}}{30.53 \text{ ft}^3/\text{lb}} = 0.149 \text{ lb/ton} \end{aligned}$$

Expresada en porcentaje

$$MANC \% = MANC * 100\% / \text{pesomezcla} = \frac{0.149 * 100}{2000} = 0.0075\%$$

Queda pequeño porcentaje de humedad remanente comparado con el contenido de asfalto y el potencial de la humedad interna en cualquier proceso de secado. Sin embargo, la compactación reduce más allá la masa en porcentaje del agua remanente. Cuando la mezcla es compactada, los vacíos son reducidos a 5% del volumen de la mezcla.

6. Volumen de una tonelada de mezcla compactada (MC)

$$MC = \text{pesomezcla} / \text{densidadmezclacompactada} = \frac{2000 \text{ lb/ton}}{140 \text{ lb/ft}^3} = 14.3 \text{ ft}^3/\text{ton}$$

El volumen de vacíos en una tonelada de mezcla compactada, se considera 5% del volumen total de la mezcla por lo cual se tiene 0.715 ft³/ ton, proveniente del 5% de 14.3 ft³/ton.

7. Masa de agua remanente en la mezcla compactada (MAC)

$$MAC = \text{Volumendevacioscompactado} / \text{volumenespecificoaguavapor}$$

$$= \frac{0.715 \frac{\text{ft}^3}{\text{ton}}}{30.53 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}} = 0.0234 \text{ lb/ton}$$

Expresada en porcentaje

$$MAC \% = MAC * 100\% / \text{pesomezcla} = \frac{0.0234 * 100}{2000} = 0.0012\%$$

Se puede concluir que el agua retenida en la mezcla final, constituye solamente 0.0012% de la cantidad de agua inyectada.

TABLA RESUMEN DE RESULTADOS

Volumen mezcla no compactada		Volumen especifico agua		Cantidad de gua mezcla sin compactar		Volumen mezcla compactada		Cantidad de gua mezcla compactada	
Volumen total (ft3)	Volumen de vacíos (ft3)	Liquido ft3/lb	Vapor ft3/lb	Masa (lb)	Porcentaje (%)	Volumen total (ft3)	Volumen de vacíos (ft3)	Masa (lb)	Porcentaje (%)
18.18	4.55	0.016	30.53	0.149	0.0074	14.29	0.714	0.023	0.0012

TABLA 3.11 Determinación del porcentaje de agua que permanece en la mezcla luego de la compactación.

FUENTE: Varner M., Performance Experience with Mechanically Foamed WMA System, 2012.

b) Producción de mezcla.

Cuando el sistema se activa, la bomba de agua se enciende y comienza a controlar el caudal. Una vez la unidad alcanza el caudal objetivo dentro de la tolerancia mínima, la boquilla con agua se abre permitiendo que el agua y el asfalto se mezclen dentro de la unidad. Antes de deshabilitar el sistema o accionando la detención en pleno uso, la unidad cesa de esparcir el agua dentro del tanque de espumación cerrando los inyectores de agua y deteniendo la bomba de agua.⁴⁵ De esta manera se produce el asfalto espumado el cual es posteriormente mezclado con los agregados altamente calentados. Así es como se da origen a la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.

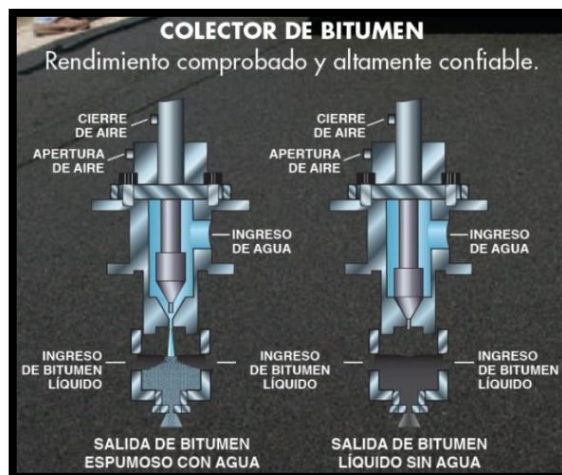


FIGURA. 3.24 Colector de Asfalto.

FUENTE: Sistema Double Barrel Green, "Sistema de Mezcla de Asfalto Tibio".

⁴⁵Performance Experience with Mechanically Foamed WMA. System.Varner M, 2012.

3.4.9 Aplicaciones de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.

Además de la aplicación de mezcla asfáltica tibia, existen otros tipos de aplicaciones para el asfalto espumado, entre las cuales se encuentran:

3.4.9.1 Reciclado de pavimentos asfálticos.

Consiste en la recuperación de material de un pavimento asfáltico ya existente, el cual es mezclado con asfalto espumado, adiciones de cemento o cal, o agregados nuevos si es necesario, para formar lo que es una base asfáltica que se colocará en el mismo lugar o en otro lugar distinto. La recuperación puede realizarse por medio de un equipo fresador capaz de disgregar el material o por métodos convencionales donde el proceso de disgregación ocurre posteriormente a la recuperación. En general el material recuperado está formado no sólo por concreto asfáltico disgregado, sino también por agregados aportados por la base y sub-base granular existente.⁴⁶

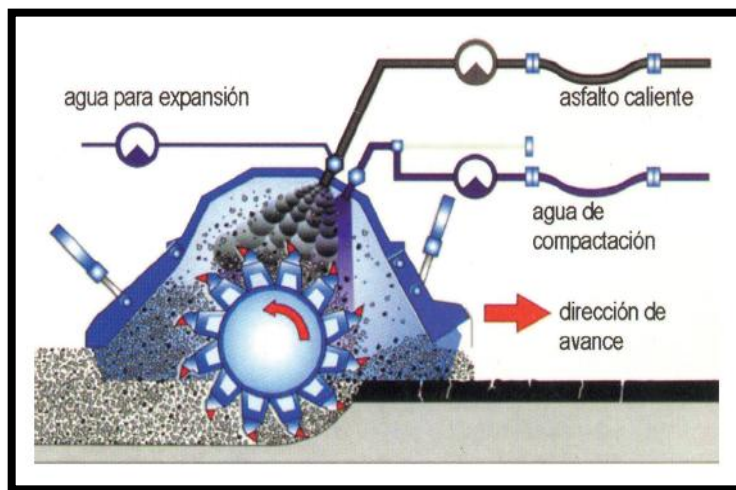


FIGURA. 3.25 Proceso de Reciclado en Frío con Asfalto Espumado en Sitio.

FUENTE: Orellana R., "Asfalto Espumado. Tecnología y Aplicaciones".

⁴⁶ Guillermo Thenoux Z. y Andrés Jamet A., Universidad Católica de Chile.

3.4.9.2 Estabilización de suelos

Consiste en estabilizar suelos de relativa baja plasticidad ($IP < 16$) con asfalto espumado, en donde los suelos provienen de la recuperación de áridos de un camino sin pavimentar o de nuevos pozos. Fundamentalmente se emplean agregados recuperados cuya granulometría es mejorada por medio de agregados nuevos (si es necesario), ya que uno de los objetivos de esta aplicación es obtener mezclas a bajo costo. El proceso de recuperación de los agregados es similar al descrito para el reciclado en frío de pavimentos asfálticos.⁴⁷

Ambas aplicaciones pueden ejecutarse mediante tecnología en sitio y en planta:

- La tecnología en sitio requiere de un equipo de fresado-mezclado, en el cual el material es removido desde la superficie, triturado, mezclado con el asfalto espumado y extendido.



FIGURA. 3.26 Estabilización en sitio con asfalto espumado.

FUENTE: Orellana R., “Asfalto Espumado. Tecnología y Aplicaciones”.

- En la tecnología en planta el material es fresado, retirado y transportado hasta una planta donde se incorpora el asfalto espumado y se homogeniza la mezcla. Luego la mezcla se transporta a la obra donde es extendida para luego ser compactada.

⁴⁷ Guillermo Thenoux Z. y Andrés Jamet A., Universidad Católica de Chile.

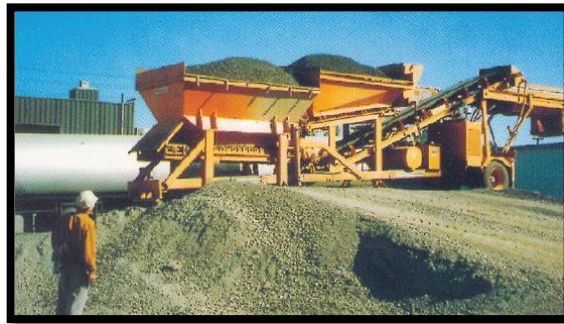


FIGURA. 3.27 Reciclado en Planta Con Asfalto Espumado
FUENTE: Orellana R., “Asfalto Espumado. Tecnología y Aplicaciones”.

3.4.10 Evaluación de desempeño a nivel teórico de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.

3.4.10.1 Susceptibilidad a la humedad.

La susceptibilidad a la humedad es preocupante debido a que la mezcla asfáltica tibia se produce a bajas temperaturas; pudiendo generar un secado incompleto de los agregados, afectando de esta manera que el cemento asfáltico se enlace adecuadamente con la superficie de los agregados, provocando así que la carretera falle prematuramente.

Según resultados obtenidos la mezcla asfáltica tibia producida con el sistema Astec Green cumple con los requerimientos de susceptibilidad a la humedad, igualmente que la mezcla asfáltica en caliente, según pruebas realizadas en diversos estados en Estados Unidos.

Las pruebas realizadas para obtener la susceptibilidad a la humedad de la mezcla se realiza a través del método de ensayo AASHTO T 283-99 “Método Estándar de Prueba para la Resistencia de Mezclas Bituminosas Compactadas por Daño por Humedad Inducido”. Según este ensayo, las muestras deben cumplir con un TSR mínimo de 80% para cumplir la especificación. Es común mencionar que la mezcla asfáltica tibia mostrara valores de TSR ligeramente menores que la mezcla asfáltica

en caliente, debido a las diferencias en la temperatura de calentamiento de los agregados.

Esta condición puede ser mejorada con la incorporación de aditivos Anti-Desprendimiento (ASA) para mejorar la adición del asfalto con el agregado., del cual podemos mencionar el apartado siguiente.⁴⁸

Aditivo Anti-Desprendimiento.

El Aditivo Anti-Desprendimiento es un aditivo líquido que se le agrega al asfalto para incrementar la presencia y fuerza de la adherencia entre el agregado y el asfalto, de manera que no se produzca desprendimiento prematuro.

El desprendimiento contribuye a ocasionar problemas en el pavimento como ahuellamiento, baches y peladura. Mitigar el desprendimiento contribuye significativamente a prolongar el ciclo de vida del pavimento y la calidad de la red de carreteras.⁴⁹ Como se puede ver en la figura 3.28.

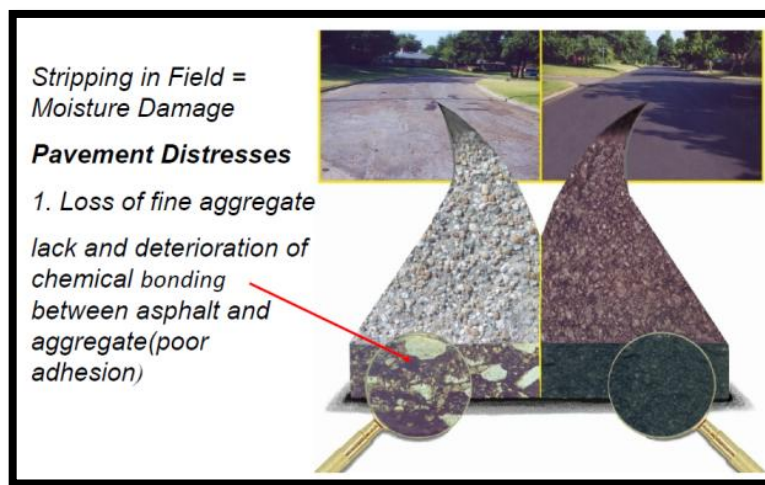


FIGURA. 3.28 Comparación entre Una Mezcla Asfáltica Sin Daños y Otra con Problemas de Susceptibilidad a la Humedad.

FUENTE: Harnish I., Liquid Anti-Strip Technology & Best Practices

⁴⁸Performance Experience with Mechanically Foamed WMA System. Varner M, 2012.

⁴⁹Liquid Anti-Strip Technology & Best Practices, Harnish I.

3.4.10.2 Resistencia al ahuellamiento

La resistencia al ahuellamiento es también una preocupación para las mezclas asfálticas tibias, ya que estas tecnologías, decrecen la viscosidad del asfalto a bajas temperaturas de servicio. Las bajas temperaturas de mezclado y compactación causa que el asfalto en la mezcla asfáltica tibia se envejezca menos que la mezcla en caliente, lo cual implica que el asfalto será menos rígido haciendo que esta sea más propensa a sufrir ahuellamiento luego de pavimentar la carretera.⁵⁰

En la mayoría de estudios existentes tanto la mezcla asfáltica tibia como la mezcla asfáltica en caliente comparada, cumplen adecuadamente estando por debajo de los límites de huella permitido por el ensayo para el tipo de carretera construida.

La prueba se realiza con un Analizador del Pavimento Asfáltico (APA), basado en la norma AASHTO TP 63-03, la cual es una prueba que utiliza una rueda cargada multifuncional para aplicar una carga repetitiva a través de una manguera de goma de presión. Normalmente, se aplican cargas de 8,000 repeticiones a los especímenes, llevados a cabo a una temperatura de 64°C para cada muestra de núcleo.

3.4.10.3 Baja temperatura de agrietamiento

La baja temperatura al agrietamiento es otro problema de desempeño que necesita ser examinado para las mezclas asfálticas tibias. Se ha encontrado que la mezcla asfáltica tibia al no requerir ser calentada a grandes temperaturas como la caliente, ocurre un menor envejecimiento del asfalto volviéndolo más flexible a menores temperaturas. La mejora en la ductilidad desencadena una temperatura al agrietamiento menor comparado con la HMA.

Para la medición de este posible daño en la mezcla se utilizan muestras acondicionadas y ensayadas de acuerdo con AASHTO T 322-07 "Determinación del

⁵⁰ Laboratory Evaluation Of Performance Of Warm Mix Asphalt In Washington State. Bower N, 2011.

Cumplimiento de la fluencia y Fuerza de la mezcla asfáltica en caliente. Uso del dispositivo de Ensayo directo de tracción".⁵¹

3.4.10.4 Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga es la menor preocupación para una mezcla asfáltica tibia, debido a que esa tecnología reduce el efecto de envejecimiento del asfalto. Un asfalto más dúctil tiene una mayor resistencia a los agrietamientos por fatiga.⁵²

A menores temperaturas de producción de la planta, la reología del asfalto de la mezcla asfáltica tibia, muestra menor rigidez a temperaturas altas y bajas que el asfalto recuperado de la mezcla convencional.

La evaluación de los asfaltos recuperados de las mezclas asfálticas se hace de acuerdo al método de ensayo AASHTO M 320-10 que trata sobre el "Grado de Desempeño del Ligante Asfáltico". Para la evaluación del asfalto se hace uso de una prueba de flexión con el Reómetro de Corte Dinámico (DSR).⁵³

3.4.10.5 Rigidez de la mezcla.

En la mayoría de ensayos realizados para determinar la rigidez inicial de las mezclas asfálticas, se determinó que la mezcla asfáltica tibia tiene menor rigidez que la mezcla en caliente, esto debido a que existe una menor oxidación en el asfalto. Según observaciones realizadas por el NCAT, la rigidez de la mezcla asfáltica tibia aumenta con el tiempo.

La rigidez de la mezcla asfáltica se estima mediante el uso del módulo resiliente a diferentes temperaturas con los núcleos obtenidos a partir de la sección de carretera. El módulo resiliente para la mezcla asfáltica tibia y las mezclas convencionales se determina mediante el uso de una máquina universal de ensayos

⁵¹Performance Experience with Mechanically Foamed WMA System. Varner M., 2012.

⁵²Laboratory Evaluation Of Performance Of Warm Mix Asphalt In Washington State. Bower N, 2011.

⁵³Performance Experience with Mechanically Foamed WMA System. Varner M., 2012.

UTM-100 (FPC Global). La Resistencia a la tracción y ensayos del Módulo Resiliente se realizaron de acuerdo con AASHTO TP 31-96 que trata sobre el "Método de prueba estándar para determinar el módulo resiliente de mezclas bituminosas de Tensión indirecta".⁵⁴

3.4.11 Beneficios del asfalto espumado como factor constructor de pavimentos.

Consumo de energía. La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias siendo uno de los dos principales beneficios de ella.

Los estudios demuestran que la reducción del consumo de energía es de alrededor del 30% y se logra mediante la disminución de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía disminuye a su vez el costo de la producción de la mezcla.

Otro beneficio adicional de la reducción de las temperaturas de producción es el menor desgaste de la planta de asfalto.

Emisiones. Otra de las ventajas de la mezcla tibia es la reducción de las emisiones contaminantes al ambiente debido a la reducida temperatura de producción. La mezcla tibia reduce significativamente las emisiones de gas carbónico y los olores, en comparación con la producción de mezclas en caliente.

Las mezclas asfálticas tibias presentan reducciones importantes con respecto a las mezclas asfálticas en caliente en cuanto a las emisiones, así por ejemplo, con las mezclas WMA se pueden lograr reducciones entre el 25 y 55% en las partículas de polvo, entre 30% y 40% en las emisiones de gas carbónico, entre 60% y 70% en las de óxido de nitrógeno, 50% en compuestos orgánicos volátiles y 35% en las emisiones de dióxido de azufre.

⁵⁴Performance Experience with Mechanically Foamed WMA System. Varner M., 2012.

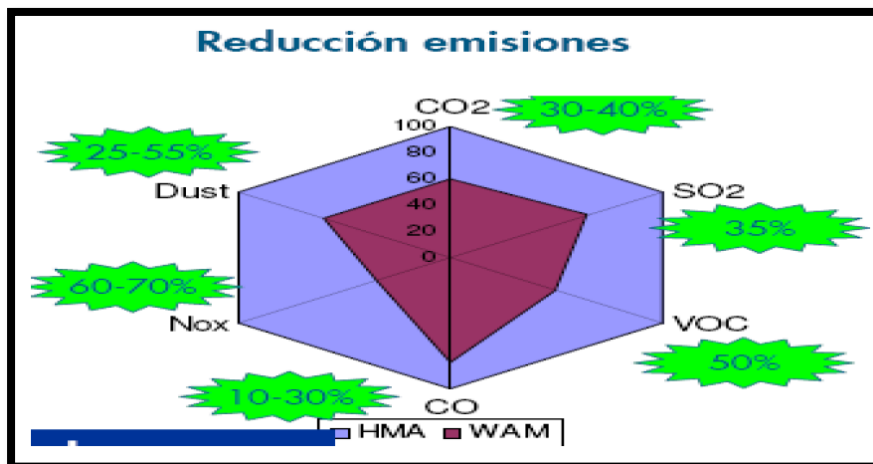


FIGURA. 3.29 Grafica Comparativa De Reducción de Emisiones entre HMA y WMA.

FUENTE: Conrado H. Lopera, "Diseño Y Producción De Mezclas Asfálticas Tibias, A Partir De La Mezcla De Asfalto Y Aceite Crudo De Palma".

Viscosidad. El asfalto con una viscosidad reducida permite que el agregado sea totalmente recubierto a una temperatura inferior a lo que tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente.

Debido a la viscosidad reducida, los procesos de mezcla tibia pueden funcionar con menores temperaturas durante la producción y en el tendido de la mezcla asfáltica.

Técnicos. Producción, colocación y compactación a temperaturas más frías, lo cual genera un control de densidades más eficaz.

Aumento en las distancias de transporte, dado que por la menor temperatura de producción hay una mayor conservación de la energía de compactación de los equipos, por tanto se requiere menos esfuerzo para obtener las densidades requeridas, en otras palabras, los menores requerimientos de temperatura para la compactación de la mezcla, agilizan el trabajo aumentando las distancias de cobertura de la mezcla asfáltica lo que se traduce en una disminución de los costos.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE MEZCLA

ASFÁLTICA TIBIA

CON ASFALTO

ESPUMADO.

4.1 MÉTODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA CON ASFALTO ESPUMADO.

4.1.1 Metodología.

Este método realizado por el Ing. Bruce Marshall del Mississippi State Highway Department, siendo posteriormente mejorado por el Army Corps of Engineering de los Estados Unidos, quien añadió ciertas características al procedimiento Marshall para ensayar mezclas asfálticas mediante diversas investigaciones para el desarrollo de muchos de sus criterios y procedimientos de prueba.

Es ampliamente utilizado para mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que usan cemento asfáltico y agregados de granulometrías cerradas, que deben tener como máximo un tamaño máximo nominal de 25 mm (1 pulgada).

Se puede usar tanto para realizar el diseño en laboratorio de la mezcla como para hacer el respectivo control de calidad durante la pavimentación. Los aspectos principales del ensayo son: el análisis densidad-vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo, en muestras de mezclas asfálticas compactadas.

4.1.2 Descripción de la metodología.

Para la aplicación del método Marshall, lo principal es la fabricación de las briquetas de ensayo, siendo las pautas preliminares las siguientes:

- Los materiales a utilizar deben cumplir los requerimientos de las especificaciones.
- Determinar la gravedad específica de los agregados a combinar y del cemento asfáltico, para su uso en el cálculo de densidad y análisis de vacíos.

En el método Marshall se usan briquetas normalizadas con una altura de 2.5 pulgadas (6.35 cm) y un diámetro de 4 pulgadas (10.16 cm). Las briquetas a usar en el diseño son preparadas siguiendo procedimientos especificados como lo son:

gradación, calentamiento, mezclado y compactado de la mezcla entre asfalto y agregado.

El método Marshall tiene como propósito determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación de agregados. Además, provee información sobre las propiedades de la mezcla en caliente, y se obtienen densidades y contenidos de vacíos, que deben de cumplirse durante la elaboración de la mezcla.

4.1.3 Especificaciones de la metodología.

Para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente, se debe escoger el porcentaje de contenido de asfalto que se le adiciona a la mezcla para un promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es de 4%. El rango de vacíos de aire debe de andar entre 3% y 5%. Todos los criterios que se evalúan con la determinación del contenido de asfalto deben de cumplir con lo especificado en las Tabla 4.1 y 4.2. En caso de no cumplir, el diseño con esas especificaciones, se tendrá que realizar ajustes o rediseñar la mezcla.⁵⁵

⁵⁵Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS-22, Asphalt Institute.

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRANSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO PESADO CARPETA Y BASE	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver Tabla 4.7					
% VFA	70	80	65	78	65	75

NOTAS

1 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 OC, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38 OC, 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 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.

² Clasificaciones del Transito

Liviano Condiciones de tránsito que resultan en un ESAL de diseño <104

Mediano Condiciones de tránsito que resultan en un ESAL de diseño entre 104 y 106

Pesado Condiciones de tránsito que resultan en un ESAL de diseño > 106

3 Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el tránsito.

4 Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

5 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.

6 El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.

TABLA 4.1 Criterios del Instituto del Asfalto para el Diseño Marshall.

FUENTE: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS-22, Asphalt Institute.

TAMAÑO MÁXIMO EN MM PORCENTAJE		VMA MÍNIMO, POR CIENTO		
		Vacíos de Diseño, por ciento ³		
mm	pulg	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	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	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

¹ Especificación Normal para Tamaño de Tamices usados en Pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

² El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del material.

³ Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están listados.

TABLA 4.2 Criterios para Vacíos del Agregado Mineral

FUENTE: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS-22, Asphalt Institute.

4.1.4 Evaluación y ajuste de la mezcla de diseño.

Al desarrollarse la mezcla de diseño, se necesitan realizar muchas mezclas de pruebas para corroborar que esta cumpla con todos los criterios de diseño. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer una fórmula de trabajo y verificar que la graduación del agregado se encuentre dentro de los límites especificados, pudiéndose reproducir en una planta asfáltica.

Al fallar las mezclas de prueba iniciales con los criterios de diseño, se hace necesaria la modificación o volver a rediseñar la mezcla. Lo más común, para corregir la deficiencia, es cambiar la graduación de los agregados ajustando sus porcentajes.

4.1.5 Ensayos realizados a la Mezcla Asfáltica Compactada.

En el método Marshall se realizan tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas

4.1.5.1 Gravedad Específica Teórica Máxima y Densidad de Mezclas Bituminosas para Pavimentación.

Este ensayo determina la densidad de la mezcla de acuerdo a la norma AASHTO T 209-12, con la mezcla asfáltica en estado suelto, de preferencia en un rango donde se estime que podrá encontrarse el contenido óptimo de asfalto, para ello se emplean las fórmulas obtenidas del manual del Instituto del Asfalto.⁵⁶

4.1.5.2 Determinación de la Gravedad Específica Bulk.

Este ensayo se realiza para mezclas asfálticas compactadas usando especímenes saturados superficialmente secos, pudiendo desarrollarse al momento en que el espécimen se halla enfriado. Existen dos normas para determinar la gravedad específica Bulk las cuales son respectivamente, la AASHTO T 166-10 y la AASHTO T 275-91 (2005), esta última utiliza parafina para cubrir los especímenes. Si la absorción es mayor al 2% se usa la AASHTO T 166-10, en caso contrario, se utiliza la AASHTO T 275-91 (2005).

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

Se rige por la norma AASHTO T 245-97 (2008). El ensayo de estabilidad mide la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo la carga, que ocurre en la mezcla.

Para esto, se sumergen los especímenes en baño María a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ por un tiempo de 30 a 40 minutos antes de la prueba, para posteriormente, centrarse correctamente en el aparato de carga. Se aplicará una carga a cada uno de los especímenes de 50.8 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. La estabilidad, dada en Newtons

⁵⁶ Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS-22, Asphalt Institute.

(lb) a la cual se da el punto de falla, definido por la lectura de carga máxima obtenida.

4.1.5.4 Análisis de Densidad y Vacíos.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).⁵⁷

4.1.5.5 Daño inducido por la humedad.

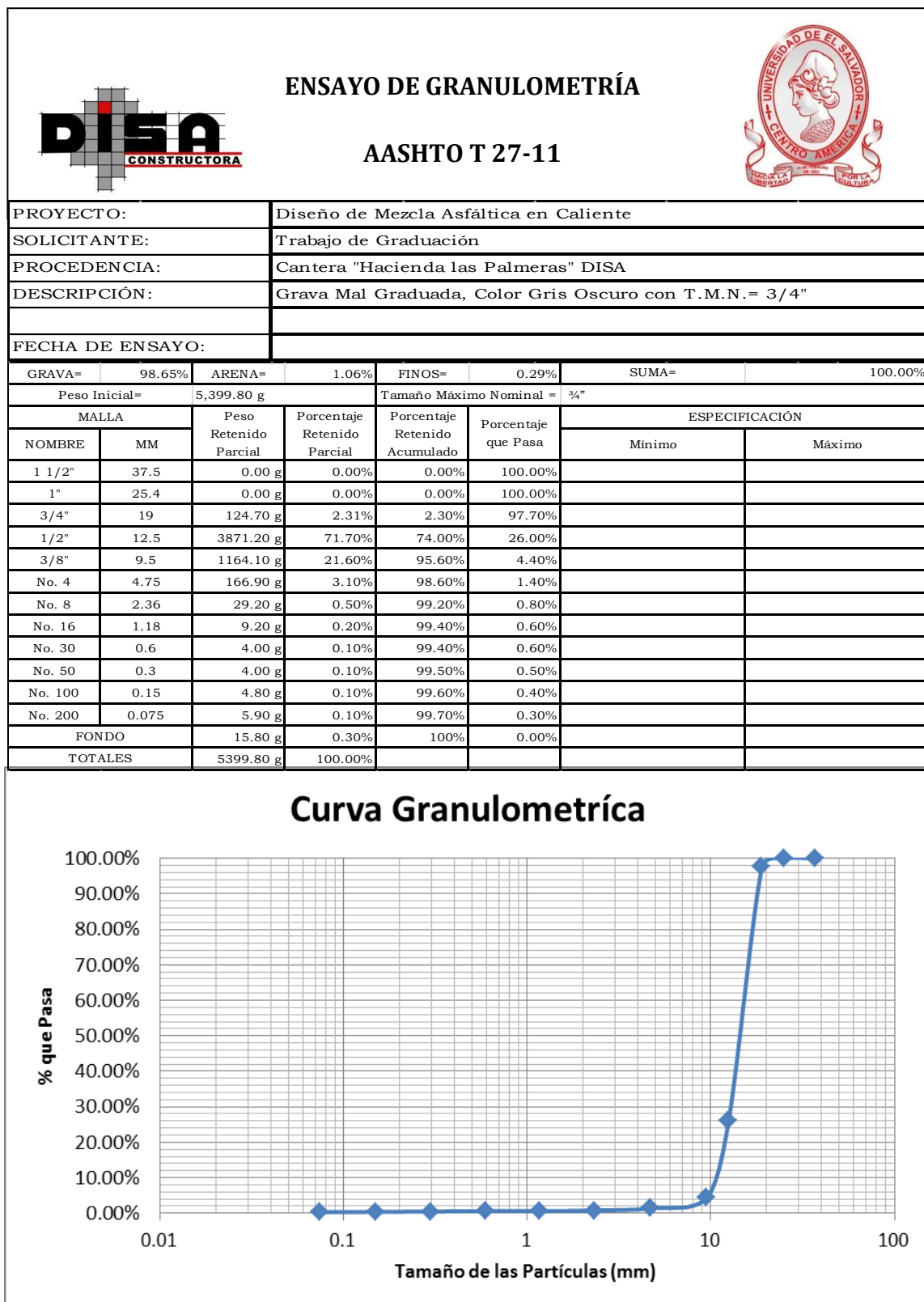
Independientemente de la causa del daño relacionado con la humedad, se necesitan métodos para identificar el comportamiento de la HMA en presencia de humedad. Uno de los ensayos con que se realiza este procedimiento es la normativa AASHTO T 283-99, que consiste en exponer una serie de especímenes al deterioro por humedad de acuerdo al ensayo, con el objeto de comparar sus respectivas estabildades con otros especímenes que no han sido degradados. ⁵⁸

⁵⁷Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS-22, Asphalt Institute.

⁵⁸Tomado de "Liang R., Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave, 2008"

4.2 ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PARA DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA

4.2.1 Análisis Granulométrico.





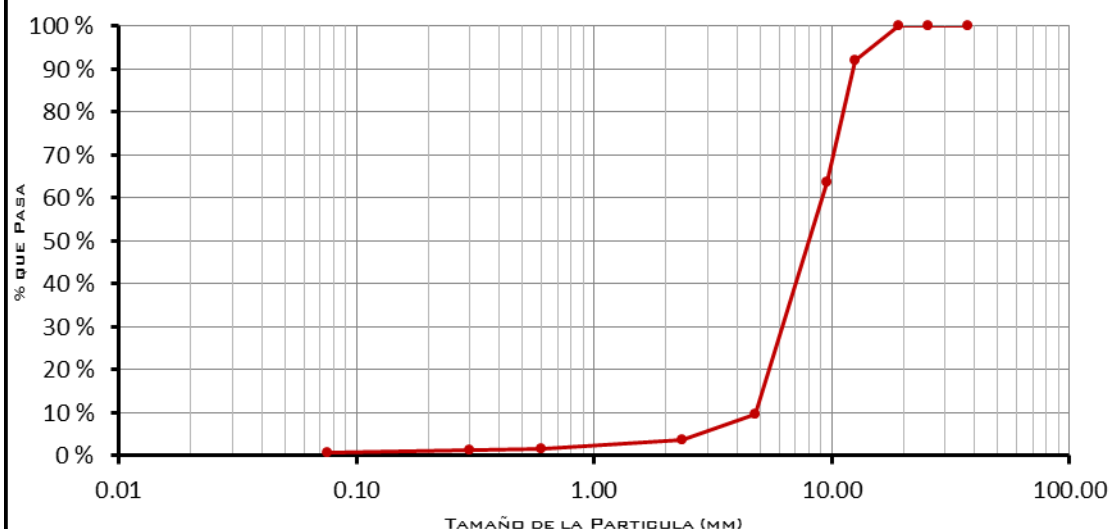
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA



AASHTO T 27-11

PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente						
SOLICITANTE:	Trabajo de Graduación						
PROCEDENCIA:	Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA						
DESCRIPCIÓN:	Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N. = 1/2"						
FECHA DE ENSAYO:							
Peso Inicial=	1,685.20 g			Tamaño Máximo Nominal =	1/2"		
GRAVA=	90.35%	ARENA=	9.06%	FINOS=	0.59%	SUMA=	100.00%
MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	ESPECIFICACIÓN	
NOMBRE	MM					Mínimo	Máximo
1 1/2"	37.5	0.00 g	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.4	0.00 g	0.00%	0.00%	100.00%		
3/4"	19	0.00 g	0.00%	0.00%	100.00%		
1/2"	12.5	131.20 g	7.79%	7.79%	92.21%		
3/8"	9.5	482.50 g	28.63%	36.42%	63.58%		
No. 4	4.75	908.90 g	53.93%	90.35%	9.65%		
No. 8	2.36	103.10 g	6.12%	96.47%	3.53%		
No. 30	0.6	33.10 g	1.96%	98.43%	1.57%		
No. 50	0.3	6.40 g	0.38%	98.81%	1.19%		
No. 200	0.075	10.10 g	0.60%	99.41%	0.59%		
FONDO		9.90 g	0.59%	100.00%	0.00%		
TOTALES		1685.2 g	100.00%				

Curva Granulométrica





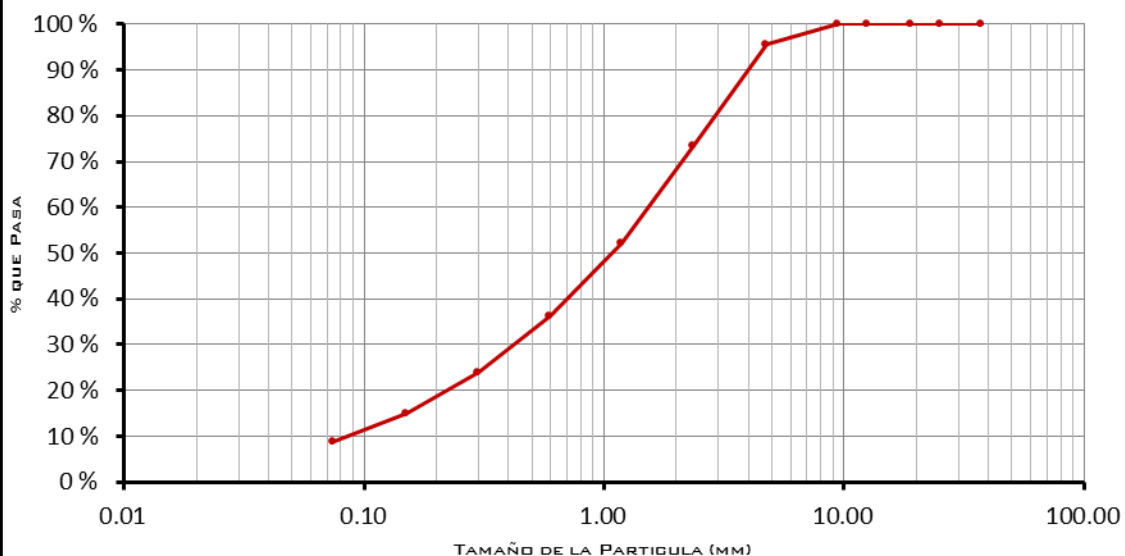
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

AASHTO T 27-11



PROYECTO:		Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente					
SOLICITANTE:		Trabajo de Graduación					
PROCEDENCIA:		Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA					
DESCRIPCIÓN:		Arena Mal Graduada, Color Gris Oscuro					
FECHA DE ENSAYO:							
Peso Inicial=		568.10 g		Tamaño Máximo Nominal =			
GRAVA=	4.44%	ARENA=	86.66%	FINOS=	8.91%	SUMA=	100.00%
MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	ESPECIFICACIÓN	
NOMBRE	MM					Mínimo	Máximo
1 1/2"	37.5	0.00 g	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.4	0.00 g	0.00%	0.00%	100.00%		
3/4"	19	0.00 g	0.00%	0.00%	100.00%		
1/2"	12.5	0.00 g	0.00%	0.00%	100.00%		
3/8"	9.5	0.00 g	0.00%	0.00%	100.00%		
No. 4	4.75	25.20 g	4.44%	4.44%	95.56%		
No. 8	2.36	126.00 g	22.18%	26.62%	73.38%		
No. 16	1.18	120.00 g	21.12%	47.74%	52.26%		
No. 30	0.6	91.10 g	16.04%	63.77%	36.23%		
No. 50	0.3	70.40 g	12.39%	76.17%	23.83%		
No. 100	0.15	50.40 g	8.87%	85.04%	14.96%		
No. 200	0.075	34.40 g	6.06%	91.09%	8.91%		
FONDO		50.60 g	8.91%	100.00%	0.00%		
TOTALES		568.10 g	100.00%				

Curva Granulométrica



4.2.2 Resumen de resultados.

A continuación, se presenta una tabla-resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los agregados utilizados para el diseño.

- **Agregado con tamaño máximo nominal de ¾" y ½"**

ENSAYO	NORMA ASTM	NORMA AASHTO	RESULTADO		PARAMETRO
			¾"	½"	
Resultados que sirven para el diseño de la Mezcla Asfáltica					
Gravedad Específica Seca	C 127-04	T 85-10	2.583	2.60	N/A
Absorción de Agua (%)	C 127-04	T 85-10	2.02	1.93	N/A
Resultados que determinan la calidad de los agregados					
Resistencia a la abrasión en la máquina de los ángeles (%)	C 131-06	T 96-02	22.3	22.7	35 %max.
Índice de durabilidad (%)	D 3744-94	T 210-91	94.0	93.0	35 % min.
Degradabilidad (Sanidad) en sulfato de sodio (%)	C 88-05	T 104-99 (2003)	1.87	1.88	12 % máx.
Ensayo de partículas de caras fracturadas (%)	D 5821-01	-	94.2	96.4	75 % min.
Ensayo de partículas planas y alargadas (%)	D 4791-10	-	5.57	1.83	10 % máx.
Peso volumétrico suelto (Kg/m ³)	C 29-97	-	1351	1368	N/A
Peso volumétrico varillado (Kg/m ³)	C 29-97	-	1373	1437	N/A


TABLA 4.3 Resumen de resultados de los diferentes ensayos realizados a la Grava de TMN de ¾" y ½".

- **Arena triturada**

ENSAYO	NORMA ASTM	NORMA AASHTO	RESULTADO	PARAMETRO
Resultados que sirven para el diseño de la Mezcla Asfáltica				
Gravedad Específica Seca	C 128-07	T 84-10	2.543	N/A
Absorción de Agua (%)	C 128-07	T 84-10	1.5	N/A
Resultados que determinan la calidad de los agregados				
Equivalente de arena (%)	D 2419-09	T 176-08	61.7	45 % min.
Índice de durabilidad (%)	D 3744-94	T 210-91	62.0	40 % min.
Peso volumétrico suelto (Kg/m ³)	C 29-97	-	1642	N/A
Peso volumétrico varillado (Kg/m ³)	C 29-97	-	1783	N/A

TABLA 4.4 Resumen de resultados de los diferentes ensayos realizados a la Arena Triturada

4.2.3 Granulometría Bailey para determinación de porcentajes de agregados.



Heritage Research Group
A Heritage Group Company

7341 W. North Street • Indianapolis, IN 46231 U.S.A.
317-243-8811 • 488-2885 (FAX)

Design Number: MEZCLA DISEÑADA SEGÚN SIECA 2010

Design Date: MEZCLA 3/4"

Mix Producer Name:

Mixture Name/Code: 05/2012

For Fine-Graded mixes:

NEW CA ratio = $\frac{\% \text{ NEW half sieve} - \% \text{ NEW PCS}}{\% \text{ ORIGINAL PCS} - \% \text{ NEW half sieve}}$

As the NEW CA ratio **INCREASES**, VMA and Voids **INCREASE**.

A change of 0.35 is \approx 1% change in VMA or Voids.

It should generally be in the range of 0.60-1.0.

Aggregate	#1-CA	#2-CA	#3-CA	#4-CA	#1-FA	#2-FA	#3-FA	#4-FA	MF	RAP	AC
Code	1	2			3	4					
Source Id	CANTERA	CANTERA			CANTERA						
Name	Grava 3/4"	Grava 1/2"			Arena Tril						
Location	P. ASFALTICA	P. ASFALTICA			P. ASFALTICA						
Virgin %'s	17.4	35.3	0.0	0.0	47.3	0.0	0.0	0.0	0.0		100.0
%'s with RAP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
Sieve, mm	#1-CA	#2-CA	#3-CA	#4-CA	#1-FA	#2-FA	#3-FA	#4-FA	MF	RAP	Virgin
37.5	100.0	100.0			100.0						100.0
25.0	100.0	100.0			100.0						100.0
19.0	99.1	100.0			100.0						99.8
12.5	20.5	92.2			100.0						83.4
9.5	5.8	63.6			100.0						70.7
4.75	1.6	9.7			95.6						48.9
2.36	1.0	3.5			73.4						36.1
1.18	0.7	1.5			52.3						25.4
0.600	0.6	1.5			36.2						17.8
0.300	0.5	1.1			23.8						11.7
0.150	0.3	1.0			14.9						7.5
0.075	0.2	0.6			8.9						4.5
% CA LUW	80.0				% FA RUW				100.0		

For Fine-Graded mixes:

NEW FA_c ratio = $\frac{\% \text{ NEW SCS}}{\% \text{ NEW PCS}}$

As the NEW FA_c ratio **INCREASES**, VMA and Voids **DECREASE**.

A change of 0.05 is \approx 1% change in VMA or Voids.

It should generally be in the range of 0.35-0.50.

	#1-CA	#2-CA	#3-CA	#4-CA	#1-FA	#2-FA	#3-FA	#4-FA	MF	RAP	AC
LUW	1351.0	1368.0			1642.0						
CHOSEN LW	1080.8	1094.4	0.0	0.0	1783.0	0.0	0.0	0.0			
RUW	1373.0	1437.0			1783.0						
Bulk Spec Gr	2.583	2.600			2.493						
Apparent Gr	2.725	2.735			2.624						
% Absptn.	2.0	1.9			2.0						
Loose Voids	47.7	47.4			34.1						
Rodded Voids	46.8	44.7			28.5						

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./ft³ or 1000 kg/m³)

1000.0

RAP AC → 3.9

RAP Gmm → 2.462

RAP Gb → 1.040

→ 2.607

RAP Gse ←

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

New	
CA	0.839
FA _c	0.462
FA _t	0.380

TABLA 4.5 Composición Granulométrica Bailey.

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 80%, y cumpliendo con los parámetros de CA ratio, FAC ratio y Faf ratio establecidos en la tabla 4.5.

Formula de trabajo (dosificación) resultante de la metodología Bailey

Grava ¾"	15 %
Grava ½"	35 %
Arena	50 %

Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados

$$G_{sb} = \frac{15 + 35 + 50}{\frac{15}{2.583} + \frac{35}{2.600} + \frac{50}{2.543}} = 2.569$$

4.2.4 Combinación granulométrica

Mezcla de agregados y formula de trabajo mediante el analisis volumétrico Bailey para un % CA LUW de 80 %, el cual nos otorga una mezcla de gradación fina, los resultados se presentan a continuacion.



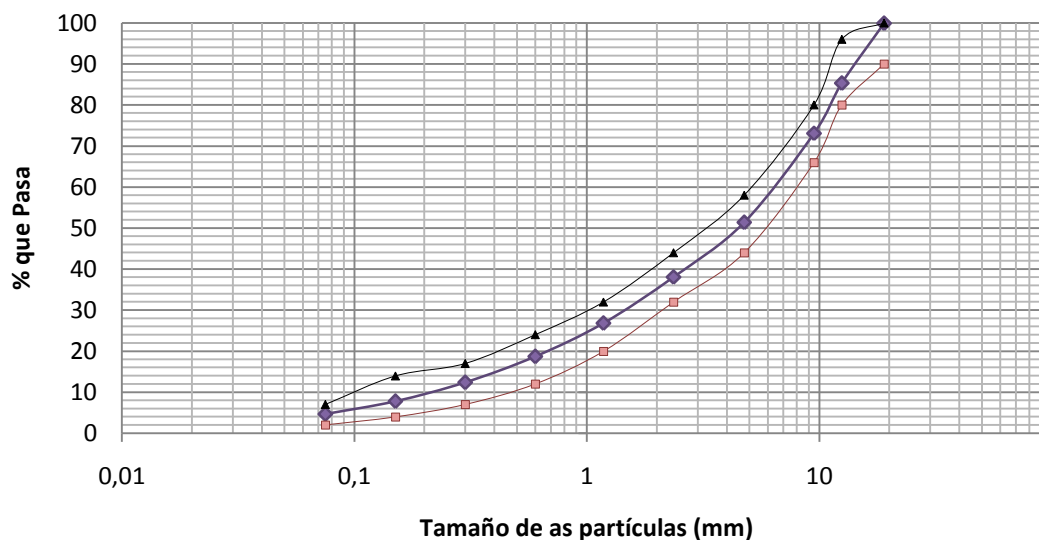
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

AASHTO T 27-11



PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente					
SOLICITANTE:	Trabajo de Graduación					
PROCEDENCIA:	Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA					
DESCRIPCIÓN:	Comprobación granulométrica					
FECHA DE ENSAYO:						
Malla	Grava ¾"	Grava ½"	Arena	Mezcla de agregados	Franja de control según SIECA	
	15%	35%	50%	100.00%	Mínimo	Máximo
37.5	100	100	100	100		
25	100	100	100	100		
19	99.1	100	100	99.9	90.0%	100.0%
12.5	20.5	92.2	100	85.3	80.0%	96.0%
9.5	5.6	63.6	100	73.1	66.0%	80.0%
4.75	1.6	9.7	95.6	51.4	44.0%	58.0%
2.36	1	3.5	73.4	38.1	32.0%	44.0%
1.18	0.7	1.5	52.3	26.8	20.0%	32.0%
0.6	0.6	1.5	36.2	18.7	12.0%	24.0%
0.3	0.5	0.15	23.8	12.4	7.0%	17.0%
0.15	0.3	1	14.9	7.8	4.0%	14.0%
0.075	0.2	0.6	8.9	4.7	2.0%	7.0%

Curva Granulométrica



4.2.5 Estimación de porcentaje óptimo teórico de asfalto.

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 #200.⁵⁹

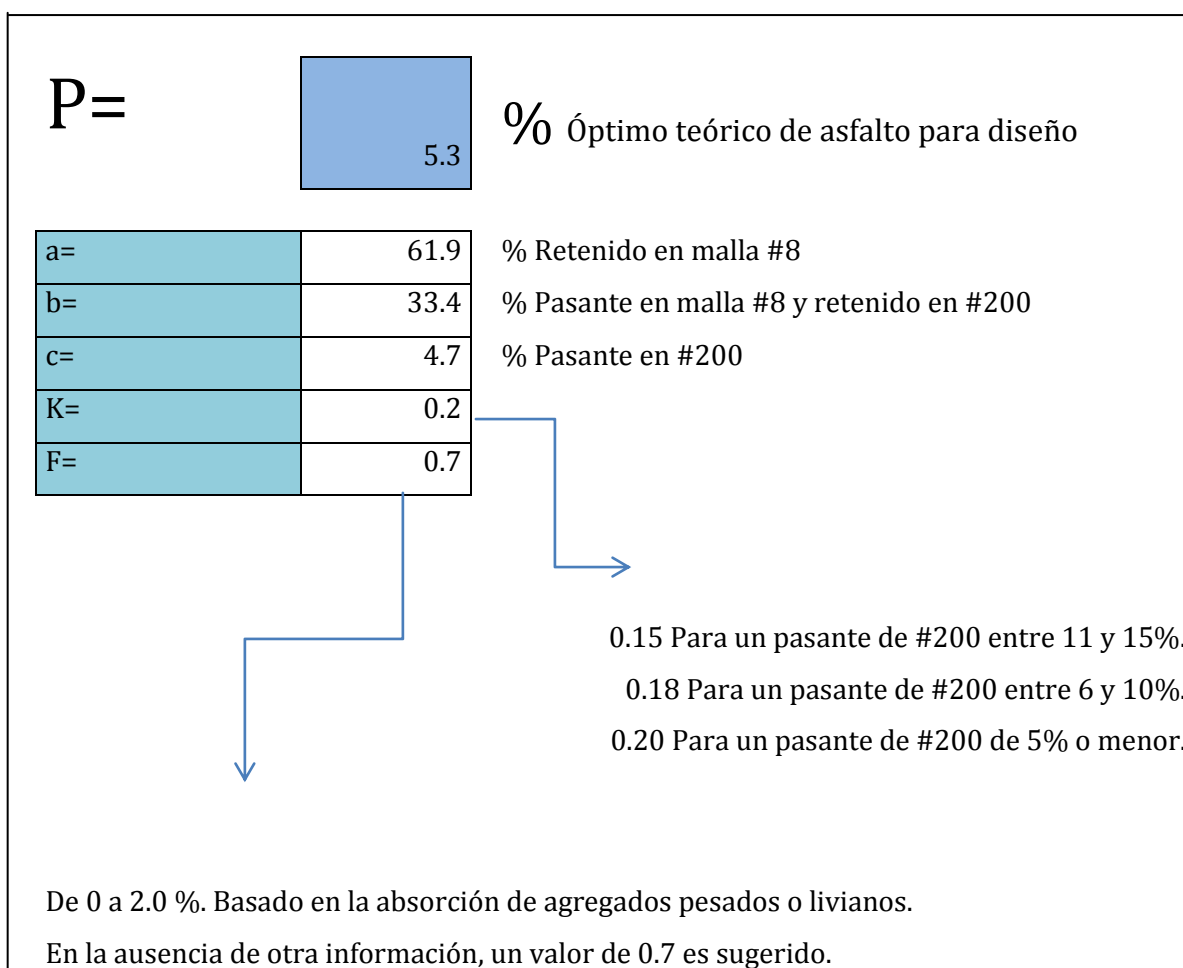


TABLA 4.6 Obtención del Porcentaje Optimo de Asfalto Teórico.

FUENTE: Instituto del Asfalto, MS-2, Sexta Edición.

⁵⁹ Consúltense sección de “Método de Diseño de Mezcla” MS-2 Sexta edición, Instituto del asfalto.

Fórmula para porcentaje de asfalto:

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

$$P = 0.035(61.9) + 0.045(33.4) + 0.2(4.7) + 0.7$$

$$P = 5.3 \%$$

Determinación de las cantidades para los diferentes puntos del diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

En la tabla 4.7, 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 1200 g., adicionando la masa de la mezcla utilizada en el ensayo de la Gravedad Especifica Teórica Máxima, el cual es de 2500 gr., haciendo una masa total de 7300 g.

Para efectos de repetición de algún ensayo se tomarán 2700 g. adicionales, totalizando así 10000 g. de materiales mezclados para la producción de la mezcla asfáltica correspondiente a cada porcentaje de cemento asfáltico.

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

$$\text{Cantidad de mezcla para briquetas} = 1200 \text{ g/ briketa} \times 4 \text{ briquetas} = 4800 \text{ g}$$

$$\text{Masa total a utilizar en cada porcentaje de cemento asfaltico}$$

$$= \text{Cantidad de mezcla para briquetas} + \text{Cantidad de Mezcla para G.E. Teórica Max.}$$

$$= 4800 \text{ g} + 2500 \text{ g} = 7300 \text{ g}$$

PUNTOS DE DISEÑO

CANTIDAD DE MATERIAL POR TMN DE AGREGADO							
GRAVA $\frac{3}{4}$	15.0%						
GRAVA $\frac{1}{2}$	35.0%						
ARENA TRITURADA	50.0%						
TOTAL	100%						
RESUMEN							
ASFALTO EN %	PESO TOTAL DE LA MUESTRA (gr)	ASFALTO (g)	PESO DEL AGREGADO (g)	TOTAL $\frac{3}{4}$ " (g)	TOTAL $\frac{1}{2}$ " (g)	ARENA (g)	PUNTO DE COMPROBACION (g)
4.0	10000.00	400.00	9600.00	1440.00	3360.00	4800.00	10000.00
4.5	10000.00	450.00	9550.00	1432.50	3342.50	4775.00	10000.00
5.0	10000.00	500.00	9500.00	1425.00	3325.00	4750.00	10000.00
5.5	10000.00	550.00	9450.00	1417.50	3307.50	4725.00	10000.00
6.0	10000.00	600.00	9400.00	1410.00	3290.00	4700.00	10000.00
6.5	10000.00	650.00	9350.00	1402.50	3272.50	4675.00	10000.00
		3150.00	56850.00	8527.50	19897.50	28425.00	

TABLA 4.7 Proporcionamiento de los agregados para el diseño.

Ejemplo de determinación de los pesos de los agregados y asfalto para un contenido de asfalto de 4%.

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

Asfalto = $10000 (0.4) = 400.00$ gr.

Peso del agregado de acuerdo al porcentaje presente en la mezcla para un 4 % de cemento asfáltico.

Peso del agregado total = $10000 (0.96) = 9600.00$ g.

Peso de grava $\frac{3}{4}$ " , $\frac{1}{2}$ " y arena para 4 % de cemento asfáltico

Peso de grava $\frac{3}{4}$ " = $9600.00 (0.15) = 1440.00$ g.

Peso de grava $\frac{1}{2}$ " = $9600.00 (0.35) = 3360.00$ g.

Peso de arena = $9600.00 (0.50) = 4800.00$ g.

4.3 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 $\frac{3}{4}$ " 15%, agregado intermedio $\frac{1}{2}$ " 35% y arena y filler 50%. 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 ± 20 centistoke (cSt), para el cemento asfáltico AC-30 que se ocupó, éste rango de viscosidades se logra con temperaturas de 155 a 160 °C; mientras que las viscosidades para compactación según AASHTO T 245-97(2008) serán de 280 ± 30 cSt, alcanzándolas en el cemento asfáltico utilizado en el rango de temperaturas de 145 a 150 °C, los cuales fueron obtenidos de la carta viscosidad-temperatura de la Figura 4.1.⁶⁰

⁶⁰ Tomado de la tesis "Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño".

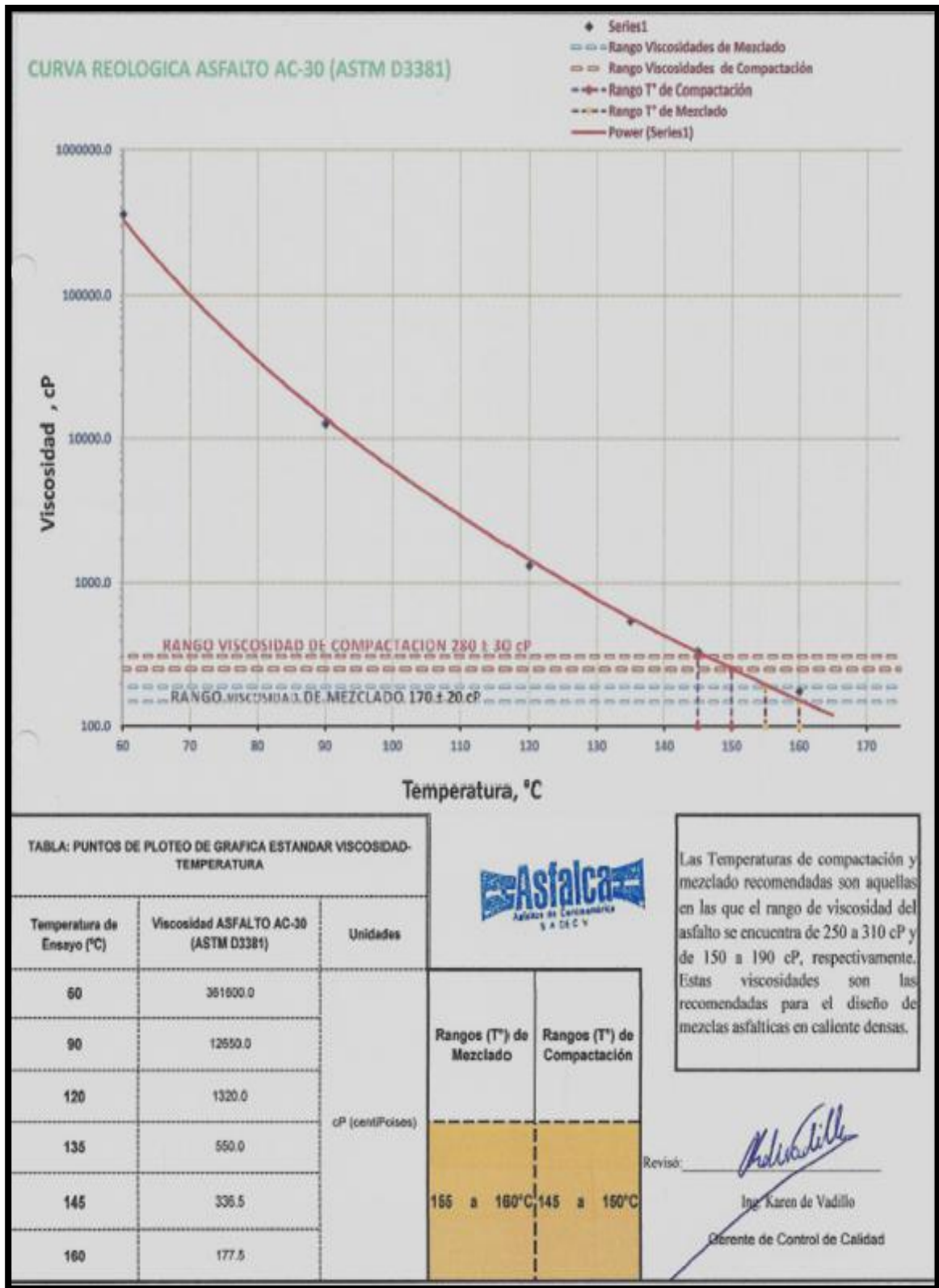


FIGURA 4.1 Carta de Viscosidad-Temperatura del cemento asfáltico AC-30 (AASHTO T 3381-09)
FUENTE: Laboratorio de Asfalto de Centroamérica (ASFALCA).

TRABAJO DE LABORATORIO PARA DOSIFICACION



FIGURA 4.2 Proceso de calentar tanto los agregados como el asfalto.
FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.



FIGURA 4.3 Proceso de mezclado de los agregados con el asfalto.
FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.



FIGURA 4.4 Cuarteo de la mezcla asfáltica.
FUENTE: Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.



FIGURA 4.5 Calentado de equipo de compactación

FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014

Compactación de especímenes.

- Se calientan tanto el molde limpio como el martillo de compactación, en el horno y la cocina, respectivamente.
- 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.



FIGURA 4.6 Apisonado de las briquetas.

FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.

- 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.



FIGURA 4.7 Proceso de compactación de las briquetas.

FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.



FIGURA 4.8 Proceso de curado de las briquetas.

FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.

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).

4.3.1 Gravedad Específica Bulk de Mezclas Asfálticas en Caliente Compactadas Utilizando Especímenes Saturados Superficialmente Secos.

Basado en norma: AASHTO T 166-10.

El procedimiento seguido para realizar este ensayo fue el siguiente:

- Luego de la compactación de las briquetas y posterior extracción, se dejaron curando a temperatura ambiente.
- Se registra el peso seco de cada briqueta.
- Se sumergen las briquetas en un recipiente con agua a una temperatura de 25°C por un tiempo aproximado de 10 minutos.
- Luego se remueven los especímenes y se colocan en la canastilla previamente tarada, registrando el peso sumergido de la briqueta.
- Inmediatamente se sacan los especímenes del agua, secando superficialmente con una toalla, y registrando el peso de la briqueta superficialmente seco.



FIGURA 4.9 Proceso de gravedad específica Bulk.

FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.

La gravedad específica Bulk de los especímenes presentan los resultados siguientes:

Gravedad Especifica Bulk						
Cemento Asfáltico (%)	4.0			4.5		
N° de Briqueta	1	2	3	1	2	3
W aire (g)	1,179.6	1,177.9	1,180.5	1,183.8	1,183.8	1,183.8
W sss (g)	1,184.4	1,184.1	1,187.0	1,189.5	1,189.5	1,193.4
W sumergido (g)	666.6	666.8	668.9	675.5	675.5	679.4
V briqueta (cm ³)	517.80	517.30	518.10	514.00	514.00	514.00
Densidad	2.278	2.277	2.279	2.303	2.303	2.303
Densidad prom.	2.278			2.303		
Cemento Asfáltico (%)	5.0			5.5		
N° de Briqueta	1	2	3	1	2	3
W aire (g)	1,178.5	1,181.2	1,181.4	1,184.4	1,186.1	1,184.1
W sss (g)	1,180.0	1,183.8	1,185.0	1,187.6	1,186.9	1,185.5
W sumergido (g)	671.0	673.9	674.1	679.7	678.1	677.3
V briqueta (cm ³)	509.0	509.9	510.9	507.9	508.8	508.2
Densidad	2.315	2.317	2.312	2.332	2.331	2.330
Densidad prom.	2.315			2.331		
Cemento Asfáltico (%)	6.0					
N° de Briqueta	1	2	3			
W aire (g)	1,179.6	1,180.0	1,180.1			
W sss (g)	1,180.6	1,180.8	1,182.0			
W sumergido (g)	679.0	678.8	680.5			
V briqueta (cm ³)	501.6	502.0	501.5			
Densidad	2.352	2.351	2.353			
Densidad prom.	2.352					

TABLA 4.8 Resultados de Gravedad Específica Bulk para el diseño de la mezcla en caliente.

El ejemplo de cálculo considerando los valores para un 4.0% de contenido de asfalto, es el siguiente:

$$G_{mb} = \frac{W_{muestra}}{W_{SSS} - W_{sumergido}}$$

$$G_{mb1} = \frac{1179.60}{1184.40 - 666.60} = 2.278$$

$$G_{mb2} = \frac{1177.90}{1184.10 - 666.80} = 2.277$$

$$G_{mb3} = \frac{1180.50}{1187.00 - 668.90} = 2.279$$

El Valor promedio de Gravedad Específica Bulk ha sido de 2.278.

4.3.2 Gravedad Específica Teórica Máxima y Densidad de Mezclas Bituminosas de Pavimentación.

Basado en norma: AASHTO T 209-12.

- Se coloca la mezcla de pavimentación en un contenedor de vacío tarado.
- Se adiciona suficiente agua para sumergir la mezcla a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- Se aplica vacío por un período de 15 ± 2 minutos para reducir la presión residual hasta 27.5 ± 2.5 Hg.



FIGURA 4.10 Proceso de Gravedad Específica Teórica Máxima.

FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.

- Se sumerge el contenedor de vacío en baño maría a 25°C en un tiempo aproximado de 10 minutos.
- El contenedor es pesado en el aire, luego de secar.

Se presentan los resultados siguientes:

Gravedad Específica Teórica Máxima					
Cemento Asfáltico (%)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
W inicial (g)	2,633.40	2,626.80	2,589.30	2,506.40	2,540.90
W picnómetro + agua (g)	11,755.00	11,755.00	11,755.00	11,755.00	11,755.00
W antes del ensayo (g)	14,388.40	14,381.80	14,344.30	14,261.40	14,295.90
W después del ensayo (g)	13,320.70	13,311.00	13,283.50	13,226.40	13,240.30
W antes - W después (g)	1,067.70	1,070.80	1,060.80	1,035.00	1,055.60
G.E. Teórica Máx.	2.466	2.453	2.441	2.422	2.407

TABLA 4.9 Resultados de Gravedad Específica Teórica Máxima para el diseño de la mezcla en caliente.

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

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

- Las briquetas se sumergen en baño maría a una temperatura de 60 °C durante 30 minutos.
- Luego se seca el espécimen, colocándose en la parte interna del cabezal inferior de ensayo e inmediatamente se coloca el segmento superior del cabezal de ensayo, poniendo el ensamble completo en posición en la máquina de ensayo.
- Se posiciona el medidor de flujo sobre la barra guía.
- Se aplica la carga a los especímenes y se anotan los valores de estabilidad y flujo.



FIGURA 4.11 Ensayo de Estabilidad y Flujo de briquetas.

FUENTE. Planta Asfáltica de constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, Enero 2014.

Ejemplo de cálculo de estabilidad y flujo para un 4.0% de contenido de Asfalto.

Ecuación del collarín para estabilidad:

$$Est. = [-4.78136 + 4.44655(L. Anillo) - 0.00015([EL. Anillo]) ^2] \\ * [F. corrección]$$

$$Est. = [-4.78136 + 4.44655(390) - 0.00015(390)^2] * [1.00] = 1.707 \text{ kg}$$

$$Est. = [-4.78136 + 4.44655(390) - 0.00015(390)^2] * [1.00] = 1.707 \text{ kg}$$

$$Est. = [-4.78136 + 4.44655(390) - 0.00015(390)^2] * [1.00] = 1.707 \text{ kg}$$

El promedio de estabilidad es de **1707 kg.**

Ecuación del collarín para flujo:

$$Flujo = 0.254 \times L. Anillo$$

$$Flujo = 0.254 \times 8 = 2.03 \text{ mm}$$

$$Flujo = 0.254 \times 8 = 2.03 \text{ mm}$$

$$Flujo = 0.254 \times 9 = 2.29 \text{ mm}$$

El promedio de flujo es de **2.12 mm.**

Los resultados de la estabilidad y flujo de los especímenes son los siguientes:

Estabilidad									
Cemento asfáltico (%)	4.0			4.5			5.0		
Nº Briqueta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
V briqueta (cm ³)	517.8	517.3	518.1	514	514	514	509	509.9	510.9
Lectura del anillo	390	390	390	424	420	428	470	490	470
Factor de Corrección	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Estabilidad (Kg)	1707	1707	1707	1854	1836	1871	2052	2138	2052
Estabilidad prom. Kg (Lb)	1707 (3763)			1854 (4087)			2081 (4587)		
Flujo									
Lectura del anillo	8	8	9	8	9	10	11	10	12
Flujo (mm)	2.03	2.03	2.29	2.03	2.29	2.54	2.79	2.54	3.05
Flujo prom. (mm)	2.12			2.29			2.79		
Estabilidad									
Cemento asfáltico (%)	5.5			6.0					
Nº Briqueta	1	2	3	1	2	3			
V briqueta (cm ³)	507.9	508.8	508.2	501.6	502	501.5			
Lectura del anillo	500	500	500	430	431	430			
Factor de Corrección	1.04	1	1.04	1.04	1.04	1.04			
Estabilidad (Kg)	2268	2181	2268	1955	1959	1955			
Estabilidad prom. Kg (Lb)	2239 (4936)			1956 (4312)					
Flujo									
Lectura del anillo	11	11	12	12	12	13			
Flujo (mm)	2.79	2.79	3.05	3.05	3.05	3.3			
Flujo prom. (mm)	2.88			3.13					

TABLA 4.10 Resultados de Estabilidad y Flujo de diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente.

4.3.4 Análisis e interpretación de resultados.

Después de realizarse todo el procedimiento Marshall para el diseño en laboratorio de la mezcla asfáltica, se continúa con el cálculo del contenido óptimo de asfalto partiendo de los diversos valores:

- Densidad.
- Vacíos de aire.
- Vacíos en el Agregado Mineral.
- Vacíos llenos de asfalto.

4.3.4.1 Densidad.

Se obtiene multiplicando la Gravedad Específica Bulk por la densidad del agua a 25°C, que por lo general es 1000 kg/m³.

Densidad					
Cemento Asfáltico (%)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Densidad Bulk.	2.278	2.303	2.315	2.331	2.352
Densidad (kg/m ³)	2278	2303	2315	2331	2352

TABLA 4.11 Resultado de densidades.

4.3.4.2 Porcentaje 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 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.

Análisis de Vacíos					
Cemento Asfáltico (%)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
G.E. Teórica Máx.	2.466	2.453	2.441	2.422	2.407
Densidad Bulk.	2.278	2.303	2.315	2.331	2.352
Vacíos (%)	7.64	6.11	5.17	3.74	2.30

TABLA 4.12 Resultado de los distintos porcentajes de vacíos.

Se considera un ejemplo analizando un 4.0% de contenido de asfalto:

$$P_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

$$P_a = 100\% \times \frac{2.466 - 2.278}{2.466} = 7.64 \%$$

4.3.4.3 Vacíos del Agregado Mineral (VMA).

Los Vacíos del Agregado Mineral que se obtuvieron del diseño fueron:

Vacíos del Agregado Mineral					
Cemento Asfáltico (%)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Cantidad de Agregado (%)	96.0	95.5	95.0	94.5	94.0
Densidad Bulk.	2.278	2.303	2.315	2.331	2.352
G.E. Agregados	2.569				
V.M.A. (%)	14.88	14.38	14.40	14.25	13.95

TABLA 4.13 Resultado de los distintos VMA.

Se considera un ejemplo analizando un 4.0% de contenido de asfalto:

$$VMA = 1 - \frac{\% \text{ Agregado} \times G.E. \text{ Bulk}}{G.E. \text{ Agregados}}$$

$$VMA = 1 - \frac{0.96 \times 2.278}{2.569} = 14.88\%$$

4.3.4.4 Vacíos Llenos de Asfalto (VFA).

Los Vacíos Llenos de Asfalto que se obtuvieron del diseño fueron:

Vacíos Llenos de Asfalto					
Cemento Asfáltico (%)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
V.M.A. (%)	14.88	14.38	14.40	14.25	13.95
Vacíos (%)	7.64	6.11	5.17	3.74	2.30
V.F.A. (%)	48.62	57.49	64.12	73.75	83.54

TABLA 4.14 Resultado de los distintos VFA.

Se considera un ejemplo analizando un 4.0% de contenido de asfalto:

$$VFA = \frac{VMA - Pa}{VMA}$$

$$VFA = \frac{14.88\% - 7.64\%}{14.88\%} \times 100 = 48.62\%$$

4.3.4.5 Determinación de contenido 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.

Porcentaje de Asfalto (%)	Golpes por capa	Porcentaje de Vacíos	V.M.A.	V.F.A.	Gravedad Especifica Bulk (Kg/m ³)	Gravedad Especifica Teórica Máxima (Kg/m ³)	Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
4.0	75	7.64%	14.88%	48.62%	2.278	2.466	1707	2.12
4.5	75	6.11%	14.38%	57.49%	2.303	2.453	1854	2.29
5.0	75	5.17%	14.40%	64.12%	2.315	2.441	2052	2.79
5.5	75	3.74%	14.25%	73.75%	2.331	2.422	2268	2.88
6.0	75	2.30%	13.95%	83.54%	2.352	2.407	1956	3.13

TABLA 4.15 Resumen de resultados de cada uno de los ensayos.

Ahora se procede a graficar cada uno de los resultados de los ensayos, que usualmente revelan tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezclas. Al observarse las gráficas, estas tendencias se pueden enunciar así:⁶¹

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.
- El VMA disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta al aumentar el contenido de asfalto.
- El VFA aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- La curva para la densidad de la mezcla es similar a la curva de estabilidad.

⁶¹Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS-22, Asphalt Institute.

PORCENTAJE DE VACÍOS.

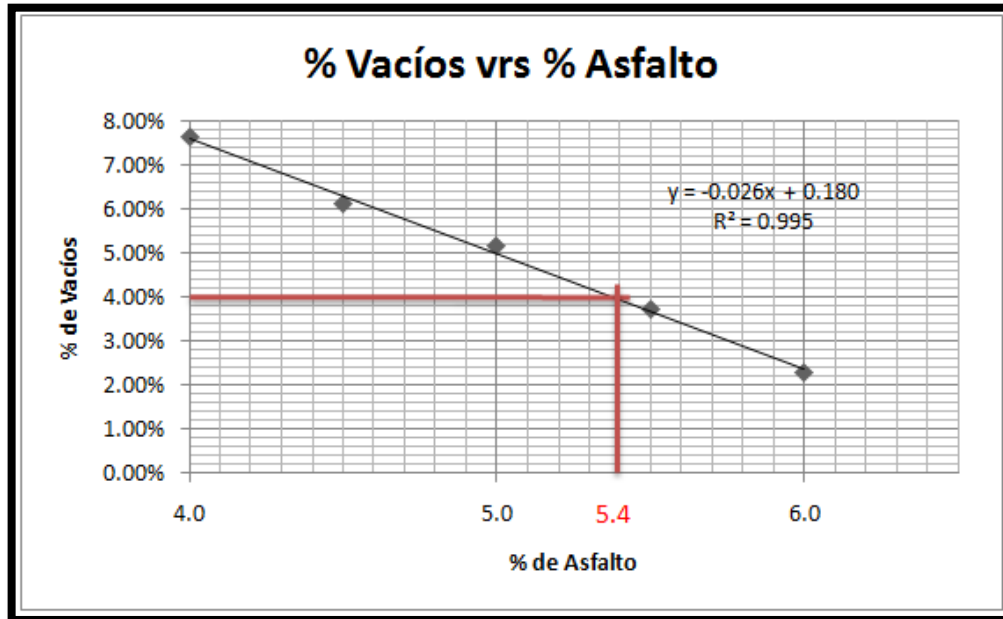


GRAFICO 4.1 Porcentaje de Vacíos versus porcentaje de asfalto.

V.M.A.

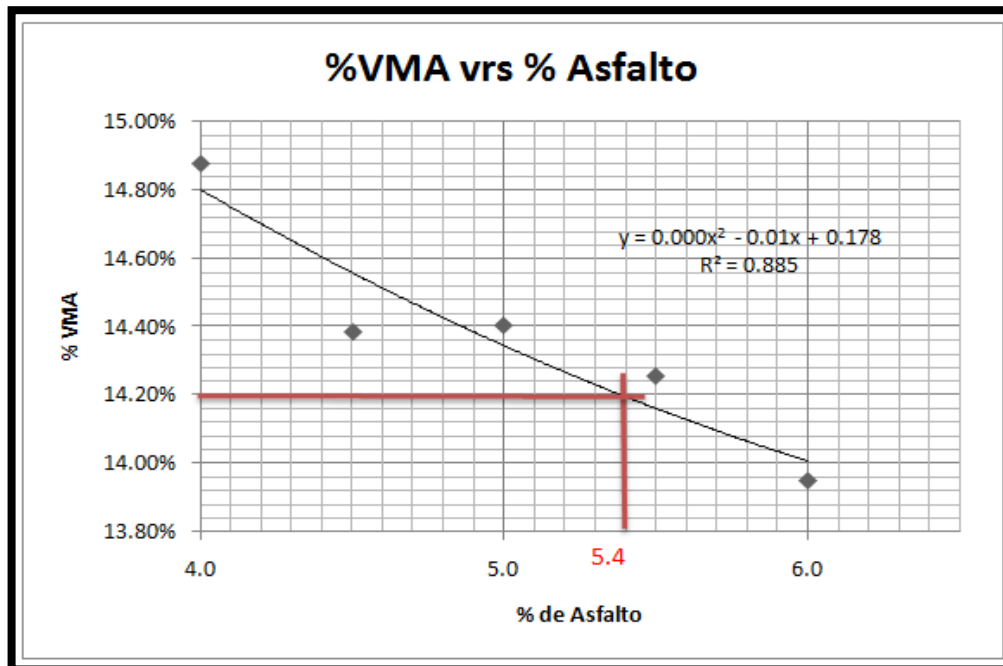


GRAFICO 4.2 Gráfico VMA versus porcentaje de asfalto.

V.F.A.

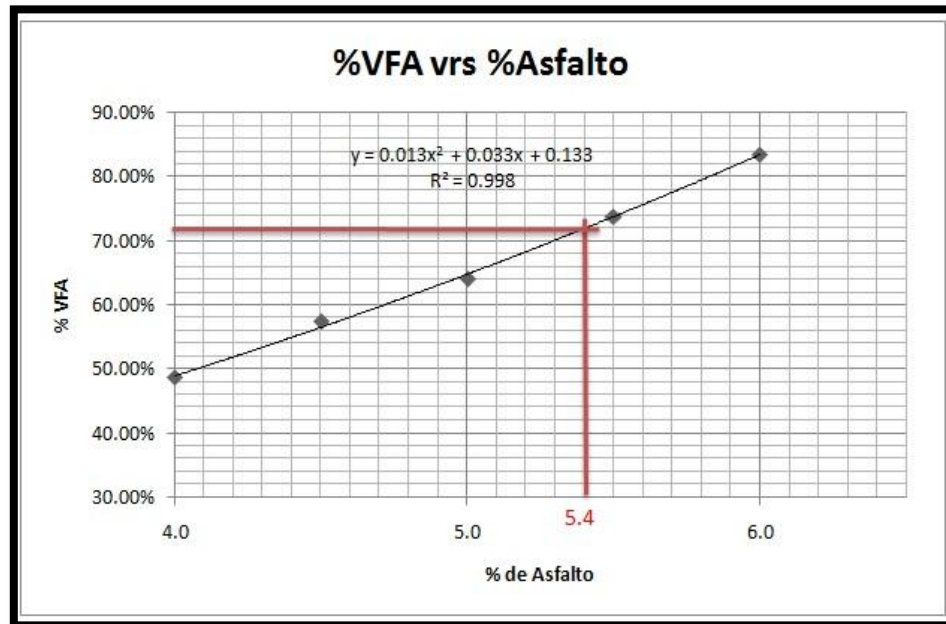


GRAFICO 4.3 Gráfico VFA versus porcentaje de asfalto.

ESTABILIDAD.

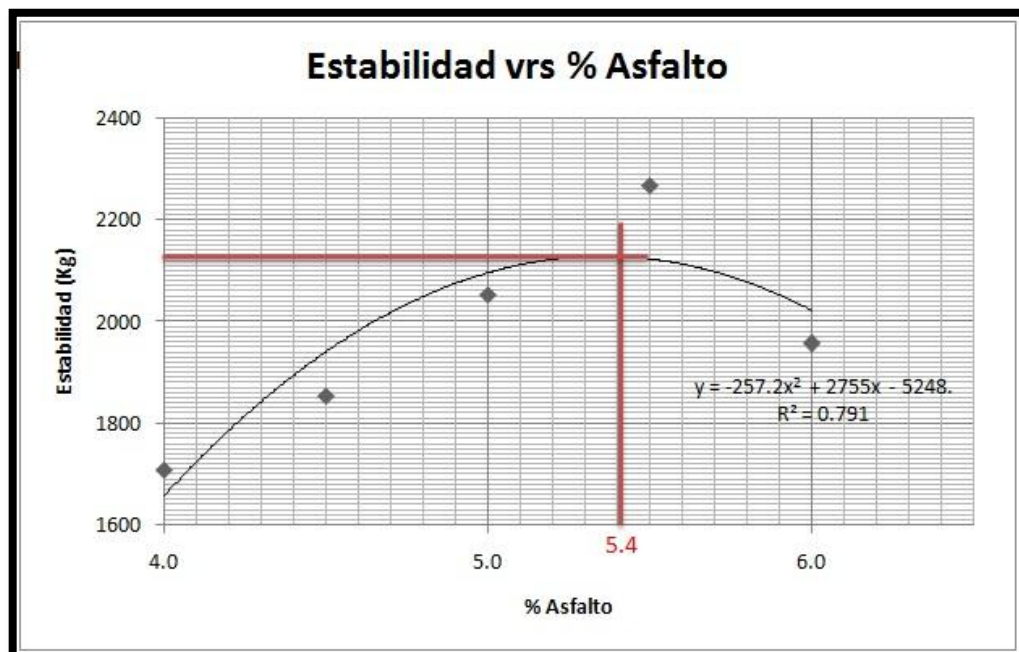


GRAFICO 4.4 Gráfico estabilidad versus porcentaje de asfalto.

FLUJO.

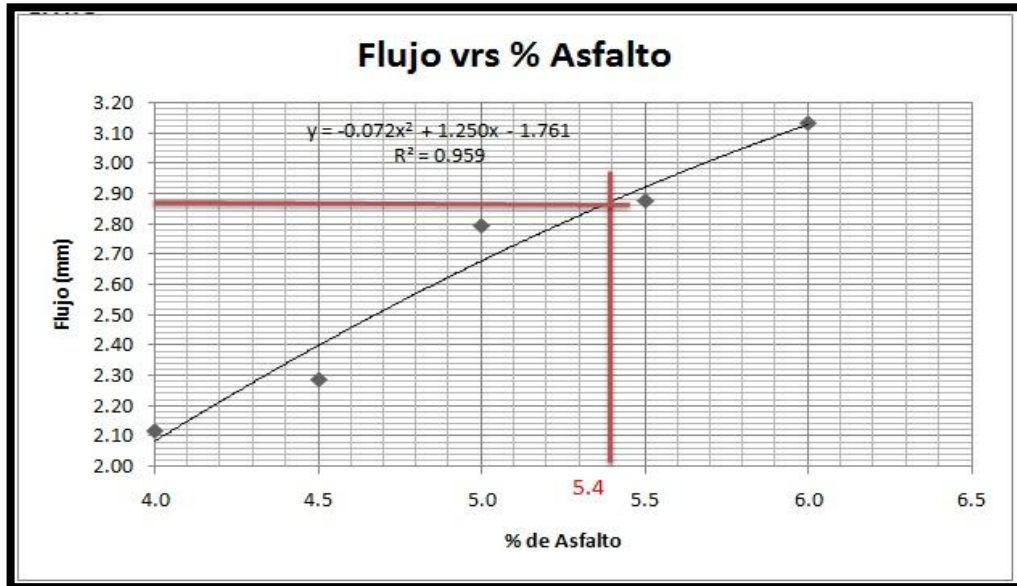


GRAFICO 4.5 Gráfico flujo versus porcentaje de asfalto.

GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA.

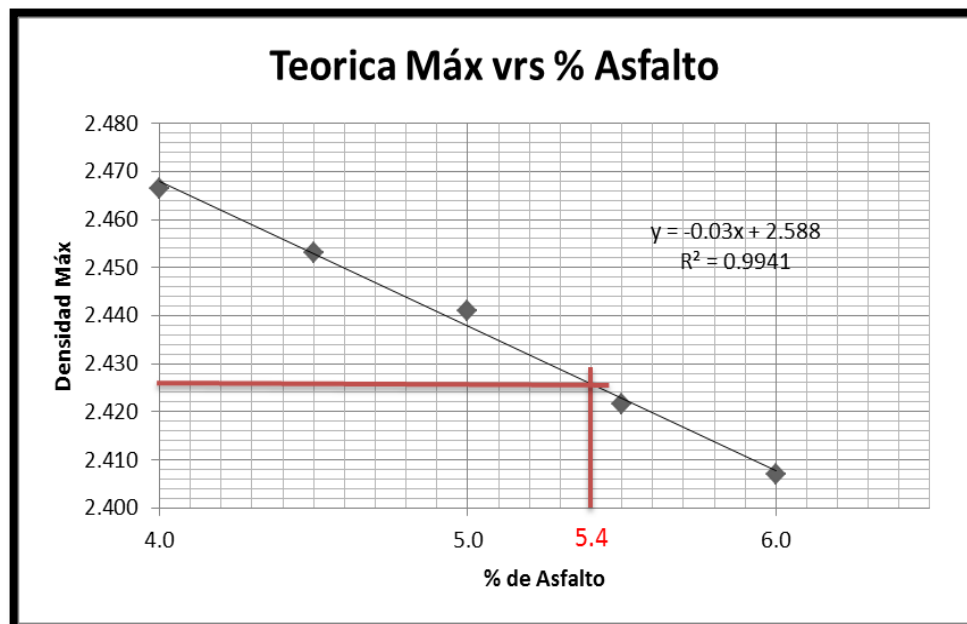


GRAFICO 4.6 Gráfico densidad teórica máxima versus porcentaje de asfalto.

DENSIDAD DE LA MEZCLA.

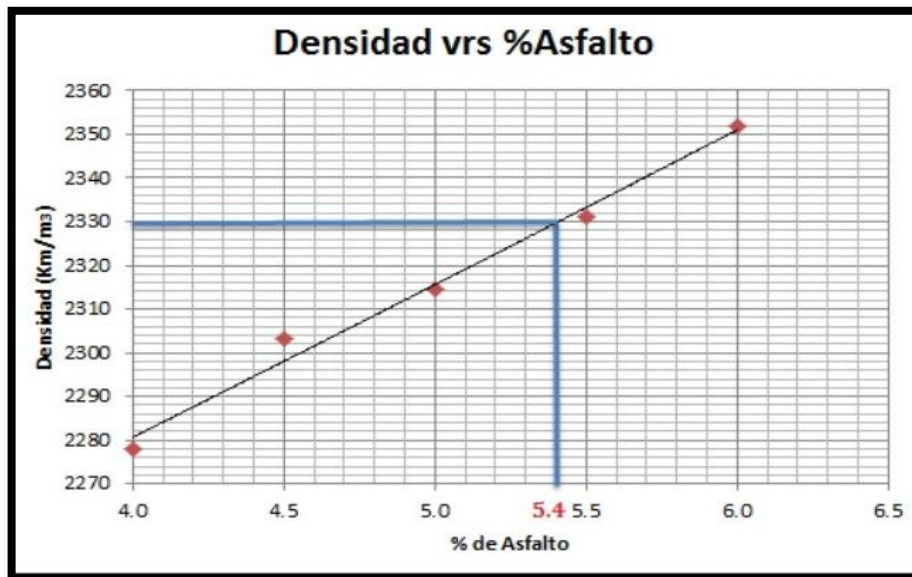


GRAFICO 4.7 Gráfico Densidad versus porcentaje de asfalto.

Los valores obtenidos de los gráficos fueron:

Resumen		
Contenido Asfalto (%)	5.40	Según Tabla 4.1
Vacíos (%)	4.0	3-5
V.M.A (%)	14.2	>13
V.F.A (%)	72.0	65-75
G.E. Bulk	2.331	
G.E.T. Máx.	2.426	
Estabilidad Kg (lb)	2,128(4691)	>816.4(1800)
Flujo (mm)	2.88	2-4

TABLA 4.16 Resumen de los valores obtenidos de los diferentes gráficos.

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.

4.4 PUNTO DE COMPROBACIÓN.

Estos datos nos sirven para comprobar que los valores especificados en el diseño de la mezcla asfáltica cumplen para todas las veces que se tiene que realizar, ya sea en el laboratorio o en la planta asfáltica, la mezcla que ha sido diseñada. Para este proceso se realizan otros ensayos tales como:

- La Extracción del Ligante Asfáltico (AASHTO T 164-08).
- Análisis Mecánico del Agregado Extraído (AASHTO T 30-10).
- La Resistencia de la Mezcla Bituminosa Compactada al Daño por humedad Inducido (AASHTO T 283-99).

4.4.1 Extracción Cuantitativa del Ligante Asfáltico de Mezclas Asfálticas en Caliente.

Basado en norma: AASHTO T 164-08.

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:

Contenido de Asfalto	
W inicial de la muestra (g)	2,275.3
Humedad (%)	2.5
W de la muestra seca (g)	2,272.8
PP.N EXT (g)	2,146.3
Finos Adheridos (g)	2.8
Ceniza (g)	1.6
P.A.T EXT (g)	2,150.7
Diferencia (g)	122.1
W materia mineral (g)	2.8
Contenido de Asfalto (%)	5.4

TABLA 4.17 Cuadro resumen de extracción de asfalto

4.4.2 Análisis Mecánico del Agregado Extraído.

Basado en norma: AASHTO T 30-10.

El análisis por tamizado determina la gradación o la distribución de las partículas de agregado dentro de una muestra dada con el fin de determinar el cumplimiento de las normas de diseño y producción. Los resultados de la granulometría del agregado extraído, se presenta a continuación.



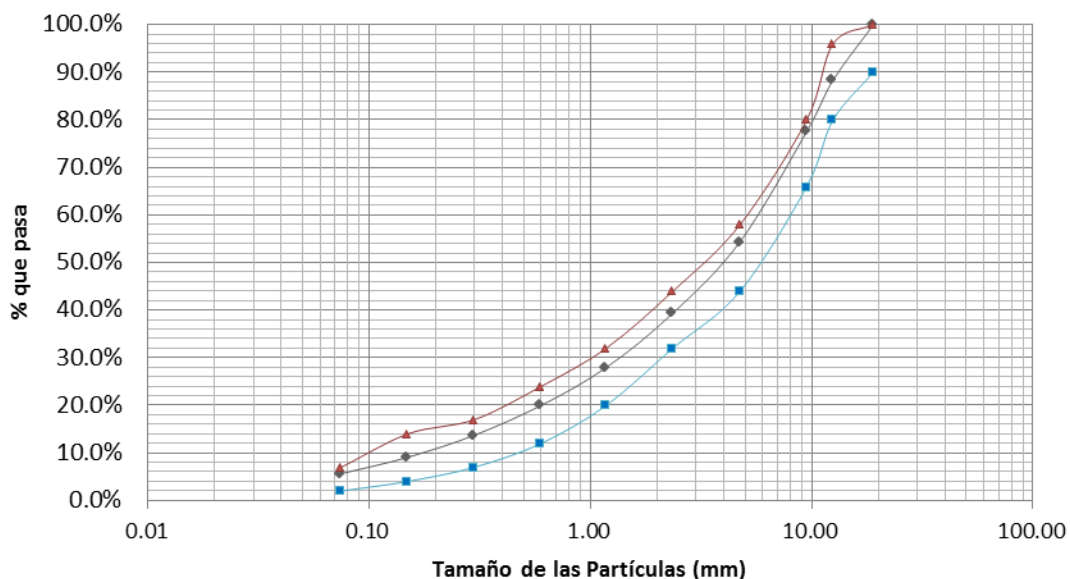
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA AASHTO T 30-10



PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente
SOLICITANTE:	Trabajo de Graduación
PROCEDENCIA:	Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA
DESCRIPCIÓN:	Comprobación Granulometrica luego de la extracción de la mezcla asfáltica.
FECHA DE ENSAYO:	

Ensayo Granulométrico							
W inicial	2,146.30	Grava (%) =	45.60%	Arena (%) =	48.80%	Finos (%) =	5.60%
Malla		W retenido parcial	% retenido parcial	% retenido acumulado	% que pasa	Franja de control según SIECA	
Nombre	mm						
1 1/2"	37.50		0.0%	0.0%	100.0%		
1"	25.40		0.0%	0.0%	100.0%		
3/4"	19.00	0.00	0.0%	0.0%	100.0%	90.0%	100.0%
1/2"	12.50	249.50	11.6%	11.6%	88.4%	80.0%	96.0%
3/8"	9.50	231.70	10.8%	22.4%	77.6%	66.0%	80.0%
N°4	4.75	497.10	23.2%	45.6%	54.4%	44.0%	58.0%
N°8	2.36	323.00	15.0%	60.6%	39.4%	32.0%	44.0%
N°16	1.18	245.30	11.4%	72.1%	27.9%	20.0%	32.0%
N°30	0.60	170.60	7.9%	80.0%	20.0%	12.0%	24.0%
N°50	0.30	134.20	6.3%	86.3%	13.7%	7.0%	17.0%
N°100	0.15	100.00	4.7%	90.9%	9.1%	4.0%	14.0%
N°200	0.075	73.70	3.4%	94.4%	5.6%	2.0%	7.0%
Fondo	0.00	121.20	5.6%	100.0%	0.0%		
Total		2146.30	100.0%				

Curva Granulométrica



Los resultados de los otros ensayos fueron los siguientes:

Resumen de Resultados	
Parámetro	Resultado
Contenido de Asfalto (%)	5.40
Estabilidad Marshall Kg (Lb)	1,805 (3979)
Flujo (mm)	2.71
Gravedad Específica Bulk	2.333
Gravedad Específica Teórica Máxima	2.424
Vacíos de Aire (%)	3.72
Vacíos en el Agregado Mineral (V.M.A.) (%)	14.07
Vacíos Llenos de Asfalto (V.F.A.) (%)	73.55



TABLA 4.18 Resumen de resultados obtenidos de la prueba Marshall al punto de comprobación.

4.4.3 La Resistencia de la Mezcla Bituminosa Compactada al Daño por Humedad Inducido. Basado en la norma: AASHTO T 283-99.

El procedimiento consiste en preparar 6 muestras de HMA utilizando el método de compactación de impacto propuesto por Marshall. Los vacíos de aire de las muestras preparadas tienen que andar entre 6 y 8%. El alto porcentaje de vacíos de aire requerido ayuda a acelerar el daño de la humedad de las muestras de HMA. 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 especímenes acondicionados se colocan entonces en un baño de agua a 140 ° F durante 24 horas. La resistencia a la tracción indirecta (St) es medido por la máquina MTS o una máquina más simple se determina la carga para todas las muestras con una tasa de 2 pulgadas/min. La resistencia a la tracción de la muestra "acondicionada", se compara con la resistencia a la tracción de la muestra "incondicionada" para determinar Relación de Resistencia a la tracción (TSR).⁶²

⁶²Tomado de "Liang R., Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave, 2008"

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR						
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA						
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
LABORATORIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.						
		ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS (AASHTO T 283-99) Mezcla Asfáltica en Caliente con asfalto AC-30 y Graduación B TMN 3/4"				
		Solicitante: Universidad de El Salvador		Fecha de Recepción: _____		
Proyecto: Trabajo de Graduación				Fecha de Ensayo: _____		
Muestras en condición Seca						
Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	61.97	62.79	62.22	62.20	62.42	62.19
Peso seco al aire A	1132.19	1142.93	1134.17	1130.15	1133.83	1132.70
Peso Saturado con Superficie Seca B	1141.62	1152.35	1142.89	1138.54	1143.04	1140.58
Peso sumergido C	639.25	643.28	638.51	634.26	637.03	636.44
Volumen (B-C) E	502.37	509.07	504.38	504.28	506.01	504.14
Gravedad Bulk (A/E) F	2.254	2.245	2.249	2.241	2.241	2.247
Teórica Máxima G	2.421	2.421	2.421	2.421	2.421	2.421
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6.91	7.26	7.12	7.43	7.45	7.20
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	34.72	36.98	35.91	37.47	37.68	36.28
Lectura	210	210	210			
Coeficiente	1.04	1.04	1.04			
Carga Kg P	943.04 Kg	943.04 Kg	943.04 Kg			
Carga lb P	2078.92 Lb	2078.92 Lb	2078.92 Lb			
Carga N P	9251.19 N	9251.19 N	9251.19 N			
Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg						
Peso Saturado con Superficie Seca B'				1152.18	1156.15	1153.71
Peso sumergido C'				642.96	643.08	642.11
Volumen (B'-C') E'				509.22	513.07	511.6
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				22.03	22.32	21.01
% Saturación (100J'/I)				58.80	59.24	57.92
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				0.98	1.40	1.48
Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C						
Espesor mm t''				63.41	63.75	63.65
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1160.70	1164.49	1162.78
Peso sumergido C''				646.66	647.68	646.78
Volumen (B''-C'') E''				514.04	516.81	516
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				30.55	30.66	30.08
% Saturación (100J''/I)				81.53	81.37	82.92
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				1.94	2.13	2.35
Lectura				190	190	197
Coeficiente				1	1	1
Carga, Kgf P''				820.68 Kg	820.68 Kg	850.82 Kg
Carga lb P''				1809.20 Lb	1809.20 Lb	1875.63 Lb
Carga N P''				8050.91 N	8050.91 N	8346.53 N
Tensión Seca 2000 P'/πtD S _{td}	941.01	928.62	937.26			
Tensión Seca Promedio	935.63					
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				800.3260743	796.0364839	826.5611401
Tensión Húmeda Promedio				807.64		
Grado de Tensión TSR 100(S _{tm} /S _{td})				86.32		
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. Mezcla Asfáltica en Caliente.						
Elaboró:			Revisó:			

4.5 GENERACIÓN CURVA DE COMPACTACIÓN A TEMPERATURA DE CAMPO.

Con el diseño obtenido se produjo la generación de una curva de compactación, de manera que nos permitiría obtener la temperatura que produce vacíos de 7%. Esta temperatura representa una alternativa para ser utilizada en la compactación del diseño de mezcla asfáltica en caliente.

Para la curva se utilizaron siete temperaturas desde 80-150°C, de las cuales se presentan a continuación los resultados obtenidos con cada una de ellas.

4.5.1 Gravedad Específica Teórica Máxima

Se muestra la determinación de la gravedad específica Teórica Máxima que se utilizó para las diferentes temperaturas de compactación.

$W_{\text{inicial de la muestra}}(\text{g})$	2592.5
$W_{\text{picnómetro + agua}}(\text{g})$	11,751.20
$W_{\text{Antes del ensayo}}(\text{g})$	14,343.70
$W_{\text{Despues del ensayo}}(\text{g})$	13,272.60
$W_{\text{antes}} - W_{\text{Después}}(\text{g})$	1,071.10
G.E. Teórica Máx.	2.420

4.5.2 Gravedad específica Bulk

Se ejemplifica el cálculo de la gravedad específica Bulk para una temperatura de compactación de 80°C. Luego se tabula los datos obtenidos de todas las temperaturas.

Temperatura de compactación	80 °C		
N° de Probeta	1	2	3
$W_{\text{Al Aire}}(\text{g})$	1124.06	1122.75	1136.12
$W_{\text{SSS}}(\text{g})$	1137.19	1134.87	1150.55
$W_{\text{Sumergido}}(\text{g})$	627.85	623.32	633.20

$$G_{mb} = \frac{W_{muestra}}{W_{sss} - W_{sumergido}}$$

$$G_{mb1} = \frac{1124.06}{1137.19 - 627.85} = 2.207$$

$$G_{mb2} = \frac{1122.75}{1134.87 - 623.32} = 2.195$$

$$G_{mb3} = \frac{1136.12}{1150.55 - 633.20} = 2.196$$

Valor promedio

$$G_{mb} = \frac{G_{mb1} + G_{mb2} + G_{mb3}}{3}$$

$$G_{mb} = \frac{2.207 + 2.195 + 2.196}{3} = 2.199$$

TEMPERATURA DE COMPACTACION (T°C)		80			90			110		
N° DE PROBETA		1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00
Gravedad Específica BULK	W _{Al Aire} (g)	1124.06	1122.75	1136.12	1136.75	1140.14	1122.31	1143.49	1133.34	1131.65
	W _{SSS} (g)	1137.19	1134.87	1150.55	1144.92	1150.10	1132.63	1147.15	1139.53	1136.57
	W _{sumergido} (g)	627.85	623.32	633.20	639.18	641.17	628.80	644.93	639.09	637.16
	Densidad Probeta	2.207	2.195	2.196	2.248	2.240	2.228	2.277	2.265	2.266
	Densidad Media	2.199			2.239			2.269		
TEMPERATURA DE COMPACTACION (T°C)										
		100			120			130		
N° DE PROBETA		1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00
Gravedad Específica BULK	W _{Al Aire} (g)	1145.11	1139.31	1040.42	1091.82	1134.86	1134.80	1125.64	1137.65	1133.22
	W _{SSS} (g)	1155.78	1147.86	1047.53	1094.24	1139.19	1137.11	1128.15	1140.61	1135.93
	W _{sumergido} (g)	650.07	643.55	583.16	620.20	642.08	639.23	635.48	645.52	646.72
	Densidad Probeta	2.264	2.259	2.240	2.303	2.283	2.279	2.285	2.298	2.316
	Densidad Media	2.255			2.281			2.291		
TEMPERATURA DE COMPACTACION(T°C)										
		140			150					
N° DE PROBETA		1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00			
Gravedad Específica BULK	W _{Al Aire} (g)	1132.92	1130.12	1131.59	1131.06	1120.19	1132.59			
	W _{SSS} (g)	1135.73	1133.29	1134.90	1133.45	1123.17	1135.49			
	W _{sumergido} (g)	642.75	640.53	643.78	645.37	633.76	643.69			
	Densidad Probeta	2.298	2.293	2.304	2.317	2.289	2.303			
	Densidad Media	2.299			2.310					

TABLA 4.19 Gravedad especifica Bulk a diferentes temperaturas de compactación para campo.

4.5.3 Determinación del porcentaje de vacíos

Se muestra a continuación el cálculo de vacíos con una temperatura de 80°C, luego se tabula todos los porcentajes de vacíos de las temperaturas restantes.

Temperatura de compactación	80°C
Grav. Esp. Teórica Máxima (G_{mm})	2.420
Grav. Esp. Bulk (G_{mb})	2.199

$$P_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

$$P_a = 100\% \times \frac{2.420 - 2.199}{2.420} = 9.1 \%$$

Temperatura de compactación °C	80	90	100	110
Grav. Esp. Teórica Máxima	2.420	2.420	2.420	2.420
Grav. Esp. Bulk	2.199	2.239	2.255	2.269
Vacíos (%)	9.1	7.5	6.8	6.2
Temperatura de compactación °C				
	120	130	140	150
Grav. Esp. Teórica Máxima	2.420	2.420	2.420	2.420
Grav. Esp. Bulk	2.281	2.291	2.299	2.31
Vacíos (%)	5.8	5.3	5.0	4.6

TABLA 4.21 Porcentaje de vacíos de las diferentes temperaturas de compactación para campo.

4.5.4 Curva de compactación

Para construir la gráfica vamos a utilizar las temperaturas que hemos considerado, que varíen de 120 a 140° C con sus respectivos porcentajes de vacíos.

Temperatura de compactación T° C	Porcentaje de vacíos %
80	9.1
90	7.5
100	6.8
110	6.2
120	5.8
130	5.3
140	5.0
150	4.6

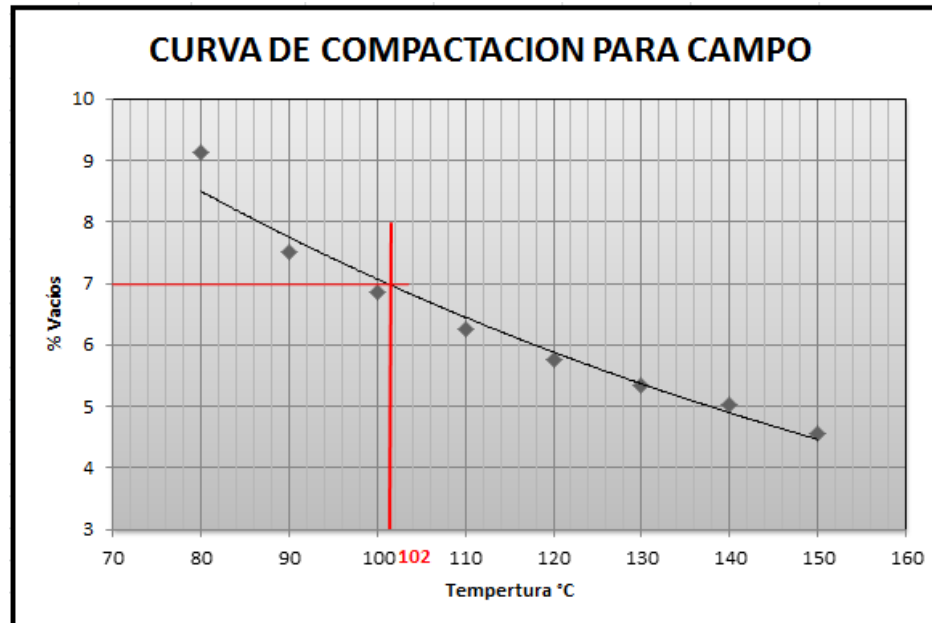


GRAFICO 4.8 Generación de curva de compactación con temperatura para laboratorio.

La temperatura que origina 7%, de acuerdo a la lectura del gráfico, es de **102° C**.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E

INTERPRETACION

DE RESULTADOS DE

LA MEZCLA

ASFALTICA TIBIA

5.1 TRABAJO DE LABORATORIO PARA ELABORACION DE ESPECIMENES. PRODUCCION DE MEZCLA ASFALTICA TIBIA

El diseño de mezcla asfáltica en caliente obtenido en el capítulo cuatro, generó una dosificación con las siguientes proporciones: Agregado grueso $\frac{3}{4}$ " 15%, Agregado intermedio $\frac{1}{2}$ " 35%, Arena triturada 50% y contenido óptimo de asfalto de 5.4%.

Este diseño fue el utilizado para la producción en planta de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, producida a una temperatura de 155°C, la cual será evaluada y sometida a ensayos que permitan medir sus propiedades. Para la evaluación del ensayo que mide la susceptibilidad a la humedad, a parte de la mezcla mencionada se produjo una mezcla a 145°C, de manera de comparar el desempeño de ambas mezclas.

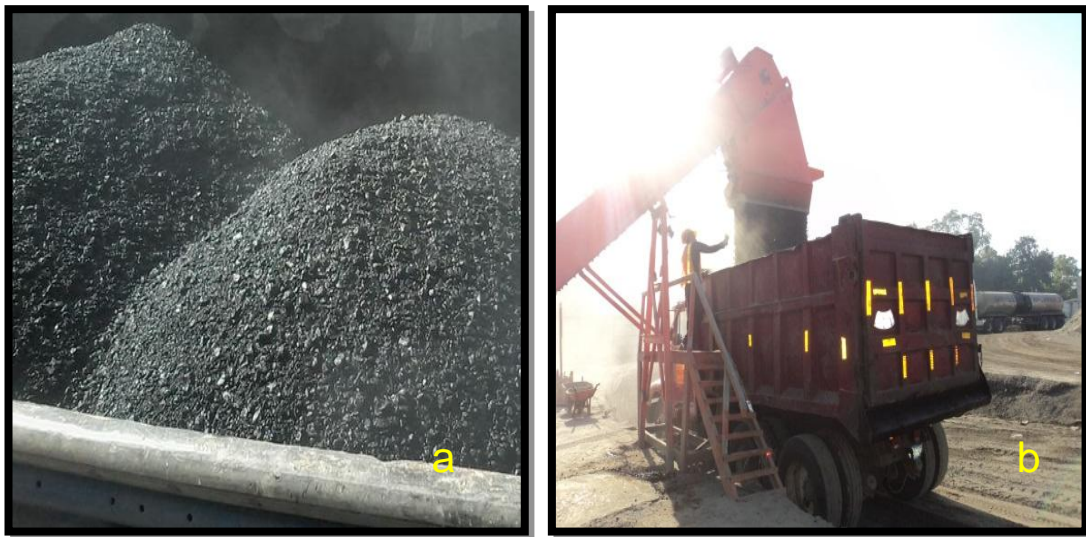


FIGURA 5.1 a) Mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.

b) Llenado de camión con mezcla asfáltica tibia.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.

Razón de expansión y vida media

Para la determinación de las propiedades de la espuma, hicimos un ensayo en el cual se midió el tiempo que duraba la expansión, la cual representa la vida media y

el volumen expandido que es la razón de expansión, utilizando tres diferentes dosificaciones de agua.

- **Mezcla tibia con dosificación de agua de 2%.**

Razón de expansión (RE)

Volumen de asfalto original (V_1) = 1

Volumen de asfalto expandido (V_2) = 13.5

$$RE = \frac{V_1}{V_2} = \frac{13.5}{1} = 13.5 \text{ veces}$$

Vida media (VM)

Tiempo de volumen de asfalto en máxima expansión (T_1) = 14 s

Tiempo de volumen a la mitad de máxima expansión (T_2) = 21 s

$$VM = T_2 - T_1 = 21 - 14 = 7 \text{ veces}$$

Temperatura de asfalto espumado: 80° C.

- **Mezcla tibia con dosificación de agua de 3%.**

Razón de expansión (RE)

Volumen de asfalto original (V_1) = 1

Volumen de asfalto expandido (V_2) = 12

$$RE = \frac{V_1}{V_2} = \frac{12}{1} = 12 \text{ veces}$$

Vida media (VM)

Tiempo de volumen de asfalto en máxima expansión (T_1) = 24 s

Tiempo de volumen a la mitad de máxima expansión (T_2) = 13 s

$$VM = T_2 - T_1 = 24 - 13 = 11 \text{ s}$$

Temperatura de asfalto espumado: 85° C.

- **Mezcla tibia con dosificación de agua de 4%.**

Razón de expansión (RE)

Volumen de asfalto original (V_1) = 1

Volumen de asfalto expandido (V_2) = 14

$$RE = \frac{V_1}{V_2} = \frac{14}{1} = 14 \text{ veces}$$

Vida media (VM)

Tiempo de volumen de asfalto en máxima expansión (T_1) = 61 s

Tiempo de volumen a la mitad de máxima expansión (T_2) = 53 s

$$VM = T_2 - T_1 = 61 - 53 = 8 \text{ s}$$

Temperatura de asfalto espumado: 92° C.

TRABAJO DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACION DE PROPIEDADES DE LA ESPUMA



FIGURA 5.2 a) Obtención del asfalto espumado.

b) Volumen máximo de asfalto expandido.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.



FIGURA 5.3 Toma de temperatura del asfalto espumado.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque



FIGURA 5.4 a) Medición de volumen inicial de asfalto espumado.
b) Lectura de volumen final de asfalto espumado.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque

Los valores de las propiedades con las que cuenta el asfalto espumado utilizado para la producción de la mezcla asfáltica tibia son: Vida media de **8 segundos** y una Razón de expansión de **14 veces**, con una dosificación de agua de **4%**.

MUESTREO DE MEZCLA ASFALTICA TIBIA

En la obtención de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, para realizar las muestras volumétricas, se realizó un muestreo de uno de los camiones que transporta mezcla asfáltica. El muestreo consistió en la toma de mezcla de diferentes puntos del camión, para que los resultados obtenidos fueran representativos de la mezcla; basado en la norma AASHTO T 168-03 (2011).



FIGURA 5.5 a) y b) Muestreo de mezcla asfáltica tibia.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.

CUARTEO Y COMPACTACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA

La mezcla asfáltica tibia debe preservar su temperatura de manera que no baje menos de 100°C, porque se vuelve una mezcla convencional, por ello se realizó un cuarteo rápido de la mezcla y se colocó en taras calientes para que pudieran ser pesadas, de manera que cada tara contara con los 1200 g necesarios para cada briqueta.



FIGURA 5.6 Cuarteo de mezcla asfáltica tibia.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.



FIGURA 5.7 Pesado de mezcla asfáltica tibia para una briqueta.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.

Las taras que contienen la mezcla fueron guardadas dentro de un horno, para que su temperatura fuera mantenida, para posteriormente llevar a cabo la compactación.



FIGURA 5.8 a) y b) Conservación de temperatura de la mezcla a través de un horno.
FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.

Una vez la mezcla tuviese la temperatura adecuada para ser compactada, se sacó del horno y se elaboraron las briquetas con diferentes temperaturas de compactación para generar la curvas, que permitió obtener la temperatura de diseño.



FIGURA 5.9 Compactación de mezcla asfáltica tibia.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.

5.2 ELABORACION Y RESULTADOS DE ENSAYOS

5.2.1 Gravedad específica Bulk

Posterior a la compactación de las briquetas elaboradas con la mezcla asfáltica tibia se procede a realizar el ensayo de la gravedad Bulk, de acuerdo a la AASHTO T 166-10. Puede obtenerse información más detallada en el capítulo cuatro del presente trabajo de graduación.

TRABAJO DE LABORATORIO DE ENSAYO

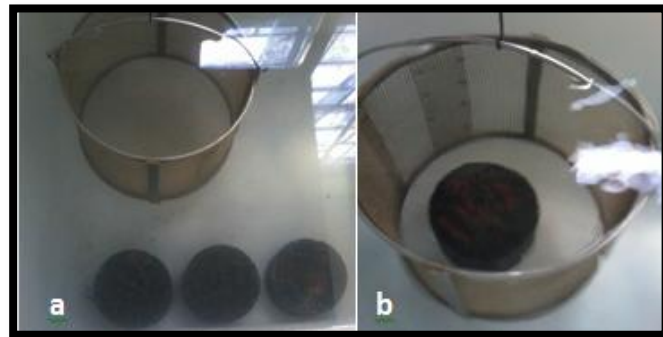


FIGURA 5.10 a) Saturación de especímenes
b) Obtención de peso sumergido

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque



FIGURA 5.11 Obtención de peso Saturado Superficialmente seco.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.

A continuación se ejemplifica el cálculo de la gravedad específica Bulk para una de las temperaturas de compactación. Luego se tabula los datos obtenidos de todas las temperaturas utilizadas para la compactación.

Temperatura de compactación °C	80° C		
	1	2	3
Numero de briqueta	1	2	3
Peso seco en aire (g)	1176.34	1164.80	1175.17
Peso superficialmente seco saturado (g)	1186.94	1175.24	1189.13
Peso en agua (g)	657.07	649.02	659.87

$$G_{mb} = \frac{W_{muestra}}{W_{sss} - W_{sumergido}}$$

$$G_{mb1} = \frac{1176.34}{1186.94 - 657.07} = 2.220$$

$$G_{mb2} = \frac{1164.80}{1175.24 - 649.02} = 2.213$$

$$G_{mb3} = \frac{1175.17}{1189.13 - 659.87} = 2.220$$

Valor promedio

$$G_{mb} = \frac{G_{mb1} + G_{mb2} + G_{mb3}}{3}$$

$$G_{mb} = \frac{2.220 + 2.213 + 2.220}{3} = 2.218$$

Temperatura de compactación °C	80			90			100			110		
Numero de briqueta	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso seco en Aire (g)	1176.34	1164.8	1175.17	1155.47	1156.76	1155	1149.06	1153.01	1149.8	1148.92	1147.32	1153.95
Peso superficialmente seco saturado (g)	1186.94	1175.24	1189.1	1158.32	1162.57	1159.84	1160.53	1166.48	1166.5	1154.86	1155.2	1159.67
Peso sumergido (g)	657.07	649.02	659.87	647.9	646.88	642.66	650.92	655.4	645.2	648.95	647.76	645.67
Gravedad especifica Bulk	2.22	2.213	2.22	2.263	2.243	2.233	2.255	2.256	2.206	2.271	2.261	2.245
Promedio	2.218			2.238			2.256			2.266		
Temperatura de compactación °C	120			125			125			130		
Numero de briqueta	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	C
Peso seco en Aire (g)	1140.18	1133.12	1143.9	1160.38	1149.3	1152.6	1160.38	1149.3	1152.6	1143.35	1140.05	1137.55
Peso superficialmente seco saturado (g)	1143.62	1138.4	1150.03	1163.02	1150.66	1155.38	1163.02	1150.66	1155.38	1146.76	1142.85	1142.54
Peso sumergido (g)	651.03	642.97	645.72	660.42	655.86	654.46	660.42	655.86	654.46	652.11	651.9	645.22
Gravedad especifica Bulk	2.314	2.287	2.268	2.308	2.322	2.3	2.308	2.322	2.3	2.311	2.322	2.287
Promedio	2.278			2.304			2.304			2.316		
Temperatura de compactación °C	140											
Numero de briqueta	1	2	3									
Peso seco en Aire (g)	1131.56	1151.61	1138.32									
Peso superficialmente seco saturado (g)	1133.05	1152.97	1139.81									
Peso sumergido (g)	649.86	659.62	653.41									
Gravedad especifica Bulk	2.341	2.336	2.34									
Promedio	2.339											

TABLA 5.1 Gravedad especifica Bulk a diferentes temperaturas de compactación para campo y laboratorio.

5.2.2 Gravedad Específica Teórica Máxima

La determinación de la gravedad específica teórica máxima es base complementaria de la gravedad específica Bulk, para poder determinar el porcentaje de vacíos, debido a que el cálculo de vacíos en los especímenes depende de las dos gravedades.

TRABAJO DE LABORATORIO DE ENSAYO



FIGURA 5.12 a) Llenado parcial del picnómetro.

b) Picnómetro con mezcla sometido a vacío

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.



FIGURA 5.13 a) Picnómetro+agua+mezcla sumergido.

b) Pesado en aire del picnómetro lleno con agua y le mezcla.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.

Se muestra la determinación de la gravedad específica Teórica Máxima con una temperatura de compactación de 80° C, luego se tabula los datos obtenidos de todas las temperaturas de compactación.

$W_{\text{inicial de la muestra (g)}}$	2,536.8
$W_{\text{picnómetro + agua (g)}}$	11,754.8
$W_{\text{Antes del ensayo (g)}}$	14,291.6
$W_{\text{Despues del ensayo (g)}}$	13,251.8
$W_{\text{antes - } W_{\text{Después (g)}}$	1,039.8
G.E. Teórica Máx.	2.440

$$G_{mm} = \frac{W_{\text{inicialmuestra}}}{W_{\text{Antes del ensayo}} - W_{\text{Despues del ensayo}}}$$

$$G_{mm} = \frac{2536.8}{14291.6 - 13251.8} = 2.44$$

Temperatura de Compactación °C	80	90	100	110	120
$W_{\text{inicial de la muestra}} \text{ (g)}$	2,536.8	2,507.5	2,571.2	2536.8	2605.6
$W_{\text{picnómetro + agua}} \text{ (g)}$	11,754.8	11,754.8	11,751.2	11754.8	11754.8
$W_{\text{Antes del ensayo}} \text{ (g)}$	14,291.6	14,262.3	14,322.4	14,291.6	14,360.4
$W_{\text{Despues del ensayo}} \text{ (g)}$	13,251.8	13,231.2	13,273.5	13251.8	13290.2
$W_{\text{antes}} - W_{\text{Después}} \text{ (g)}$	1,039.8	1,031.1	1,048.9	1,039.8	1,070.2
G.E. Teórica Máx.	2.440	2.432	2.451	2.440	2.435
Temperatura de Compactación°C	125	130	135	140	
$W_{\text{inicial de la muestra}} \text{ (g)}$	2606.9	2605.6	2551.7	2551.7	
$W_{\text{picnómetro + agua}} \text{ (g)}$	11754.8	11754.8	11754.8	11754.8	
$W_{\text{Antes del ensayo}} \text{ (g)}$	14,361.7	14,360.4	14,306.5	14,306.5	
$W_{\text{Despues del ensayo}} \text{ (g)}$	13287.5	13290.2	13246.8	13246.8	
$W_{\text{antes}} - W_{\text{Después}} \text{ (g)}$	1,074.2	1,070.2	1,059.7	1,059.7	
G.E. Teórica Máx.	2.427	2.435	2.408	2.408	

TABLA 5.2 Gravedad Especifica Teórica máxima de las diferentes temperaturas de compactación para campo y laboratorio.

5.2.3 Determinación de porcentaje de vacíos

El porcentaje de vacíos se obtiene a partir de la gravedad específica Teórica máxima y la gravedad específica Bulk de una temperatura de compactación, se muestra a continuación el cálculo de vacíos con una de 80°C, luego se tabula las temperaturas de compactación restantes.

Temperatura de compactación	80°C
Grav. Esp. Teorica Máxima(G_{mm})	2.440
Grav. Esp. Bulk(G_{mb})	2.218

$$P_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

$$P_a = 100\% \times \frac{2.440 - 2.218}{2.440} = 9.1 \%$$

Temperatura de compactación	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
Grav. Esp. Teórica Máxima	2.440	2.432	2.451	2.44	2.435
Grav. Esp. Bulk	2.218	2.238	2.256	2.266	2.278
% Vacíos	9.1%	8%	7.9%	7.1%	6.4%
Temperatura de compactación	125°C	130°C	135°C	140°C	
Grav. Esp. Teórica Máxima	2.427	2.435	2.408	2.408	
Grav. Esp. Bulk	2.304	2.316	2.341	2.339	
% Vacíos	5.1%	4.9%	2.8%	2.9%	

TABLA 5.3 Porcentaje de vacíos de las diferentes temperaturas de compactación para campo y laboratorio.

5.3 GERERACIÓN DE CURVA DE COMPACTACIÓN

La determinación de las propiedades y desempeño de las mezclas asfálticas se logra a partir de un conjunto de ensayos o pruebas establecidas, precisamente para comprobar que la mezcla está diseñada correctamente, de acuerdo a los rangos establecidos. Estos ensayos se basan en la realización de especímenes volumétricos de mezcla asfáltica, generados con una temperatura de compactación, que garanticen un porcentaje de vacíos aceptable de acuerdo a lo que especifica la metodología Marshall.

Por tanto se muestra la determinación de la temperatura de diseño para una compactación en laboratorio y una compactación en campo, de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado en estudio.

5.3.1 Compactación a temperatura de laboratorio

Para obtener la temperatura que genere vacíos entre 3-5%, que es lo especifica la metodología Marshall para muestras compactadas en laboratorio, se ha construido una curva utilizando diferentes temperaturas de compactación, de la cual hemos obtenido gráficamente la temperatura que me proporciona un promedio de 4% de vacíos y que podrá ser utilizada para la compactación en laboratorio de las especímenes de mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado.

Para la gráfica vamos a utilizar temperaturas que varíen de 120 a 140° C con su respectivo porcentaje de vacíos. Los cuales se presentan a continuación:

Temperatura de compactación ° C	Porcentaje de vacíos %
120	6.4
125	5.1
130	4.9
135	2.8
140	2.9

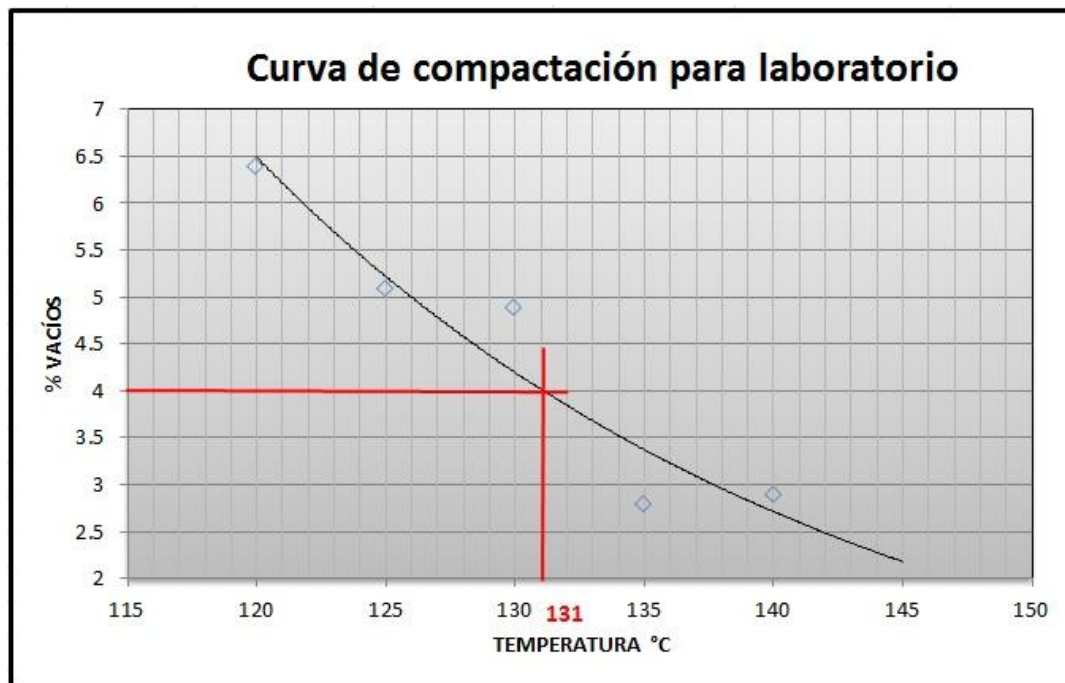


GRAFICO 5.1 Generación de curva de compactación con temperatura para laboratorio.

La temperatura que origina 4%, de acuerdo a la lectura del gráfico, es de **131°C**.

COMPROBACION

GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA		GRAVEDAD ESPECIFICA BULK			
$W_{\text{inicial de la muestra (g)}}$	2,654.8	Numero de briqueta	1	2	3
$W_{\text{picnómetro + agua (g)}}$	11,754.8	Peso seco en Aire (g)	1158.28	1155.9	1144.45
$W_{\text{ANTES DEL ENSAYO (g)}}$	14,409.6	Peso superficialmente seco saturado (g)	1161.47	1158.74	1145.19
$W_{\text{DESPUES DEL ENSAYO (g)}}$	13,316.6	Peso sumergido (g)	661.31	659.96	652.42
$W_{\text{antes}} - W_{\text{depués (g)}}$	1,093.0	Gravedad especifica bulk	2.316	2.317	2.322
G.E. Teórica Máx.	2.429	Promedio	2.318		
PORCENTAJE DE VACÍOS 4.5 %					

TABLA 5.4 Gravedad especifica Bulk y teórica máxima de temperatura de compactación en laboratorio a 131°C.

ESTABILIDAD y FLUJO

Estabilidad			
Temperatura de compactación °C	131		
N° Briqueta	1	2	3
V briqueta (cm ³)	500.16	498.78	492.77
Lectura del anillo	335.0	305.0	340.0
Factor de Corrección	1.04	1.04	1.09
Estabilidad (Kg)	1527	1391	1624
Estabilidad prom. Kg (Lb)	1514 (3337)		
Flujo			
Lectura del anillo	10	11	11
Flujo (mm)	2.54	2.79	2.79
Flujo prom. (mm)	2.71		

TABLA 5.5 Estabilidad y flujo de temperatura de compactación en laboratorio a 131°C.

5.3.2 Compactación a temperatura de campo.

Para la compactación en campo de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, se ha generado una curva utilizando temperaturas de compactación que varían de 80-130°C, de la cual vamos a obtener gráficamente la temperatura que me proporcione 7% de vacíos, parámetro de vacíos aceptable para la compactación en campo de mezclas.

Se muestra a continuación las temperaturas utilizadas con sus respectivos porcentajes de vacíos.

Temperatura de compactación °	Porcentaje de vacíos %
C	
80	9.1
90	8.0
100	7.9
110	7.1
120	6.4
130	4.9

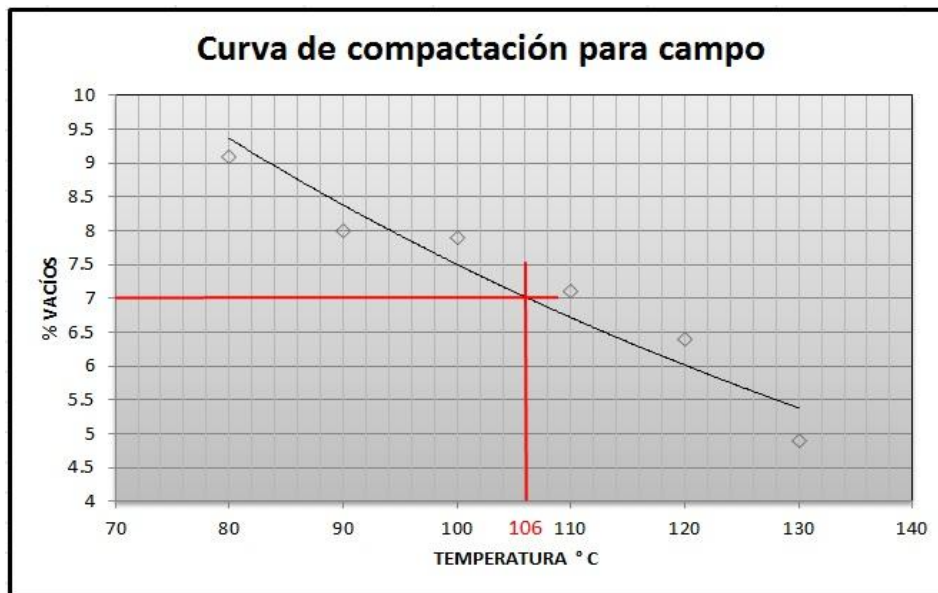


GRAFICO 5.2 Generación de curva de compactación con temperatura para campo.

La temperatura que origina 7%, de acuerdo a la lectura del gráfico, es de **106 °C**.

COMPROBACION

GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA		GRAVEDAD ESPECIFICA BULK			
$W_{\text{inicial de la muestra (g)}}$	2,654.8	Numero de briqueta	1	2	3
$W_{\text{picnómetro + agua (g)}}$	11,754.8	Peso seco en Aire (g)	1178.91	1172.86	1162.1
$W_{\text{ANTES DEL ENSAYO (g)}}$	14,409.6	Peso superficialmente seco saturado (g)	1181.79	1179.45	1167.17
$W_{\text{DESPUES DEL ENSAYO (g)}}$	13,316.6	Peso sumergido (g)	671.47	661.19	654.17
$W_{\text{antes}} - W_{\text{depués (g)}}$	1,093.0	Gravedad especifica bulk	2.31	2.263	2.265
G.E. Teórica Máx.	2.429	Promedio	2.264		
PORCENTAJE DE VACÍOS 6.8%					

TABLA 5.6 Gravedad específica Bulk y teórica máxima de temperatura de compactación en campo a 106°C.

ESTABILIDAD y FLUJO

Estabilidad			
Temperatura de compactación	106 ° C		
N° Briqueta	1	2	3
V briqueta (cm ³)	510.3	518.3	513.0
Lectura del anillo	295.00	265.00	320.00
Factor de Corrección	1.00	1.00	1.00
Estabilidad (Kg)	1294	1163	1403
Estabilidad prom. Kg (Lb)	1287 (2837)		
Flujo			
Lectura del anillo	11	12	11
Flujo (mm)	2.79	3.05	2.79
Flujo prom. (mm)	2.88		

TABLA 5.7 Estabilidad y flujo de temperatura de compactación en campo a 106 °C.

OTROS ENSAYOS

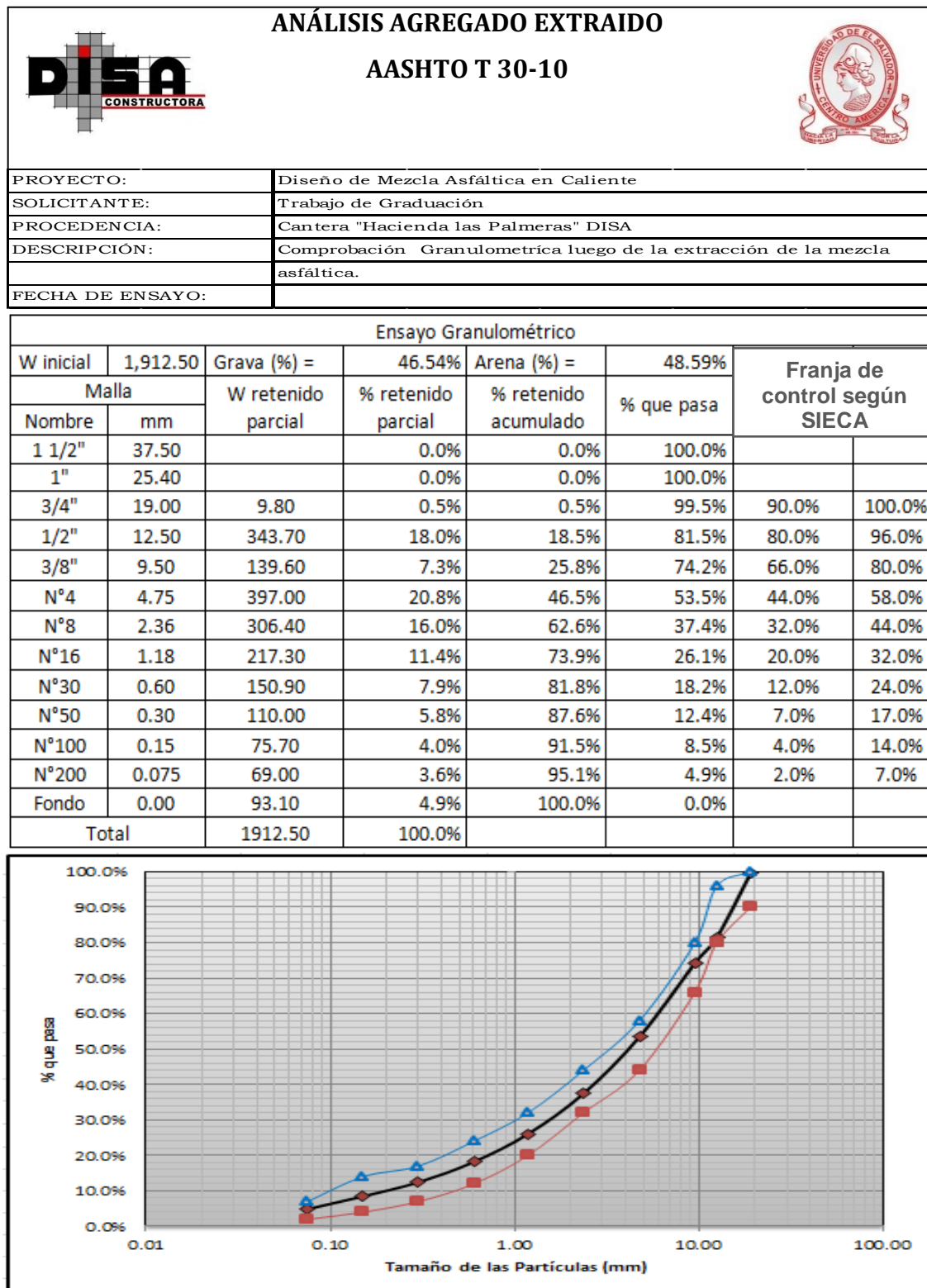
Extracción Cuantitativa del Ligante Asfáltico de Mezclas Asfálticas en Caliente. AASHTO T 164-08.

La mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, utilizada para generar la curva de compactación para campo y laboratorio, fue sometida al ensayo que permite verificar el contenido de asfalto. Los resultados se presentan a continuación.

Contenido de Asfalto	
W inicial de la muestra (g)	2,026.3
PP.N EXT (g)	1,917.5
Finos Adheridos (g)	3.7
Ceniza (g)	0.0
P.A.T EXT (g)	1,921.2
Diferencia (g)	105.1
W materia mineral (g)	3.7
Contenido de Asfalto (%)	5.2

TABLA 5.8 Resultado de extracción de asfalto de mezcla asfáltica tibia.

El contenido de asfalto de la mezcla asfáltica tibia es de 5.2, la cual presenta 0.2 % menos que la mezcla en caliente.



5.4 EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE LA MEZCLA ASFALTICA TIBIA.

Basado en AASHTO T-283-99.

La mezcla asfáltica tibia producida para generar las curvas de compactación, fue sometida al ensayo que permite evaluar el daño que el agua puede causar en la mezcla, el cual es “**Resistencia de la Mezcla Bituminosa Compactada al Daño por Humedad Inducido**” también conocido como TSR. Para la evaluación se utilizó mezcla asfáltica tibia producida a 145° C y mezcla producida a 155°C y comparar los resultados obtenidos.

Por cada temperatura de producción se realizaron 6 briquetas compactadas a 106° C, debido a que esta temperatura produce vacíos de aire de 7%, el cual está dentro del rango de vacíos que exige el ensayo para los especímenes que es de 6-8%.

TRABAJO DE LABORATORIO DE ENSAYO



FIGURA 5.14 a) y b) Preparación de especímenes para aplicación de vacíos.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.



FIGURA 5.15 a) Colocación de briquetas en baño María.

b) Aplicación de vacío a briquetas en el Picnómetro.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.







FIGURA 5.16 Ensayo de tracción indirecta de la briqueta.

FUENTE: Laboratorio Planta Asfáltica, Constructora DISA S.A. de C.V., Quezaltepeque.

Se presenta la tabulación de los valores obtenidos de las doce briquetas realizadas, de las cuales los resultados fueron los siguientes:

- Temperatura de producción de 145° con un TSR de **79.26%**.
- Temperatura de producción de 155° con un TSR de **80.89 %**.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR						
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA						
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
LABORATORIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.						
		ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS (AASHTO T 283-99) Mezcla Asfáltica en Caliente con asfalto AC-30 y Graduación B TMN 3/4"				
		Solicitante: <u>Universidad de El Salvador</u>		Fecha de Recepción: _____		
Proyecto: <u>Trabajo de Graduación</u>				Fecha de Ensayo: _____		
Muestras en condición Seca						
Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	62.75	63.15	62.32	62.21	63.57	63.84
Peso seco al aire A	1157.31	1143.57	1145.27	1141.68	1159.39	1170.80
Peso Saturado con Superficie Seca B	1163.20	1155.17	1151.90	1146.56	1168.26	1178.16
Peso sumergido C	654.50	643.20	646.67	642.23	652.87	660.63
Volumen (B-C) E	508.70	511.97	505.23	504.33	515.39	517.53
Gravedad Bulk (A/E) F	2.275	2.234	2.267	2.264	2.250	2.262
Teórica Máxima G	2.424	2.424	2.424	2.424	2.424	2.424
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6.15	7.85	6.48	6.61	7.20	6.67
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	31.26	40.20	32.76	33.34	37.09	34.53
Lectura	192	187	201			
Coefficiente	1.04	1	1.04			
Carga Kg P	862.47 Kg	807.77 Kg	902.76 Kg			
Carga lb P	1901.31 Lb	1780.72 Lb	1990.13 Lb			
Carga N P	8460.79 N	7924.20 N	8856.04 N			
Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg						
Peso Saturado con Superficie Seca B'				1161.91	1184.89	1192.64
Peso sumergido C'				649.66	658.08	665.31
Volumen (B'-C') E'				512.25	526.81	527.33
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				20.23	25.5	21.84
% Saturación (100J'/I)				60.68	68.74	63.26
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				1.57	2.22	1.89
Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C						
Espesor mm t''				63.44	65.00	65.50
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1170.37	1191.92	1199.91
Peso sumergido C''				656.06	664.96	668.92
Volumen (B''-C'') E''				514.31	526.96	530.99
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				28.69	32.53	29.11
% Saturación (100J''/I)				86.05	87.70	84.31
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				1.98	2.24	2.60
Lectura				174	160	165
Coefficiente				1	0.96	0.96
Carga, Kgf P''				751.78 Kg	663.81 Kg	684.49 Kg
Carga lb P''				1657.31 Lb	1463.37 Lb	1508.97 Lb
Carga N P''				7375.00 N	6511.99 N	6714.88 N
Tensión Seca 2000 P/πtD S _{td}	849.90	790.91	895.71			
Tensión Seca Promedio	845.51					
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				732.7500569	631.4737429	646.2056219
Tensión Húmeda Promedio				670.14		
Grado de Tensión TSR 100(S _{tm} /S _{td})				79.26		
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. Mezcla Asfáltica en Tibio con asfalto espumado producida a una temperatura de 145°C.						
Elaboró:			Revisó:			

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR						
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA						
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
LABORATORIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.						
		ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS (AASHTO T 283-99) Mezcla Asfáltica en Caliente con asfalto AC-30 y Graduación B TMN 3/4"				
		Solicitante: Universidad de El Salvador		Fecha de Recepción: _____		
Proyecto: Trabajo de Graduación				Fecha de Ensayo: _____		
Muestras en condición Seca						
Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	62.47	63.48	62.46	62.68	62.82	63.01
Peso seco al aire A	1154.03	1177.71	1154.55	1151.87	1157.22	1151.56
Peso Saturado con Superficie Seca B	1156.17	1180.49	1158.28	1156.32	1160.47	1156.68
Peso sumergido C	649.73	665.85	651.93	648.19	651.15	645.85
Volumen (B-C) E	506.44	514.64	506.35	508.13	509.32	510.83
Gravedad Bulk (A/E) F	2.279	2.288	2.280	2.267	2.272	2.254
Teórica Máxima G	2.434	2.434	2.434	2.434	2.434	2.434
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6.38	5.98	6.32	6.87	6.65	7.38
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	32.31	30.78	32.01	34.89	33.88	37.72
Lectura	218	212	242			
Coeficiente	1.04	1	1.04			
Carga Kg P	978.83 Kg	915.37 Kg	1086.17 Kg			
Carga lb P	2157.84 Lb	2017.94 Lb	2394.47 Lb			
Carga N P	9602.35 N	8979.80 N	10655.36 N			
Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg						
Peso Saturado con Superficie Seca B'				1174.56	1177.39	1174.76
Peso sumergido C'				659.29	662.82	657.88
Volumen (B'-C') E'				515.27	514.57	516.88
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				22.69	20.17	23.2
% Saturación (100J'/I)				65.04	59.53	61.51
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				1.41	1.03	1.18
Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C						
Espesor mm t''				63.80	63.97	64.22
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1178.75	1183.54	1182.48
Peso sumergido C''				661.49	664.93	661.83
Volumen (B''-C'') E''				517.26	518.61	520.65
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				26.88	26.32	30.92
% Saturación (100J''/I)				77.05	77.69	81.98
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				1.80	1.82	1.92
Lectura				191	190	188
Coeficiente				1	1	1
Carga, Kgf P''				824.99 Kg	820.68 Kg	812.07 Kg
Carga lb P''				1818.69 Lb	1809.20 Lb	1790.22 Lb
Carga N P''				8093.14 N	8050.91 N	7966.44 N
Tensión Seca 2000 P'/πtD S _{td}	968.88	891.62	1075.32			
Tensión Seca Promedio	978.61					
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{um}				799.5162712	793.2735875	781.8747567
Tensión Húmeda Promedio				791.55		
Grado de Tensión TSR 100(S _{um} /S _{td})				80.89		
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. Mezcla Asfáltica en Tibio con asfalto espumado producida a una temperatura de 155°C.						
Elaboró:			Revisó:			

5.5 CONCLUSIONES

- La dosificación de los agregados utilizada para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente y mezcla asfáltica tibia, se realizó con base a la metodología Bailey, obteniendo el proporcionamiento siguiente: grava $\frac{3}{4}$ " 15%, grava $\frac{1}{2}$ " 35% y arena triturada 50%, con el cual se garantiza un empaquetamiento de agregados que ayude a las propiedades de la mezcla asfáltica tibia.
- El diseño de la mezcla asfáltica en caliente es el mismo que se utilizó para producir la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, los cuales fueron analizados con los lineamientos de la metodología Marshall para una mezcla densa, cumpliendo con estos y haciendo la mezcla apta para su producción y colocación.
- La mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado puede producirse a temperaturas menores o iguales que la mezcla asfáltica en caliente, cumpliéndose de igual manera con los parámetros especificados en las normas que rigen la calidad de la mezcla.
- La dosificación de agua para el proceso de espumación varía de 1.5 a 5%, en la mezcla asfáltica tibia en estudio se utilizó 4%, dando como resultado una razón de expansión de 14 veces y una vida media de 8 segundos, siendo aceptables con base a los mínimos requeridos.
- La granulometría y el contenido óptimo de asfalto no se ven afectados significativamente con el uso del sistema Astec Green para asfalto espumado.
- La mezcla asfáltica tibia y la mezcla asfáltica en caliente tienen aproximadamente el mismo diferencial de temperatura de compactación en

campo, para temperaturas de producción similares; con la curva de compactación de las distintas mezclas, se obtuvieron temperaturas de 102°C y 106°C, para mezcla asfáltica en caliente y mezcla asfáltica tibia respectivamente.

- La temperatura de diseño para la compactación en laboratorio de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, es menor que la temperatura utilizada en una mezcla asfáltica en caliente. A través de la carta de viscosidad-temperatura, se indica que la mezcla asfáltica en caliente puede ser compactada entre 145 a 150°C y la mezcla asfáltica tibia a una temperatura de 131°C, obtenida en base a la curva de compactación; generando ventajas de producción, colocación y de salud para los obreros.
- El proceso de espumación se realiza con la inyección de agua fría a un asfalto calentado a una temperatura mayor de 155°C, ya que a temperaturas menores los valores de razón de expansión y vida media no son satisfactorios.
- Las mezclas asfálticas tibias son más propensas a sufrir daño por humedad, por lo tanto, se obtienen valores de TSR ligeramente menores que los obtenidos para una mezcla asfáltica en caliente. Para la mezcla asfáltica tibia se obtuvieron valores de TSR de 79.26% y 80.89% con temperaturas de producción de 145°C y 155°C respectivamente; y el valor de TSR, para la mezcla asfáltica en caliente fue de 86.36%.
- La mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado produce una serie de ventajas, como la disminución de emisiones volátiles a la atmósfera, una mejor trabajabilidad debido a la reducción de la viscosidad del asfalto, un ahorro en el consumo de energía y combustible y una disminución significativa de olores que producen las mezclas convencionales.

5.6 RECOMENDACIONES

- Para las muestras de laboratorio y la realización de la compactación, la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado no debe reducir su temperatura por debajo de los 100°C, debido a que pierde sus propiedades de espumación por tanto no presenta resultados satisfactorios.
- Debe considerarse la adquisición de equipo especializado que permita evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, además de la evaluación del TSR.
- Darle continuidad a esta investigación, a través de la realización de tramos de prueba, que permitan medir el desempeño de la mezcla asfáltica tibia ante las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales.
- Realizar diseños de mezcla asfáltica tibia con asfalto espumado, considerando diferentes agregados y distintos cementos asfálticos para espumar y así evaluar su comportamiento.

5.7 BIBLIOGRAFÍA

Libros.

- Laboratorio Ingeniería de la Construcción, Investigación de nuevas mezclas de baja energía para la rehabilitación superficial, España: Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España.
- Liang R., Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave, Estados Unidos: Ohio Department of Transportation, 2008.
- Hurley G., y Prowell B., Evaluation of Evotherm for use in warm mix asphalt, Estados Unidos: National Center of Asphalt Technology of Auburn University, 2006.
- Hurley G., y Prowell B., Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt, Estados Unidos: National Center of Asphalt Technology of Auburn University, 2005.
- Wirtgen, Wirtgen: Manual de reciclado en frío (2nda edición), Alemania, 2004.
- Varner M., Performance experience with mechanically foamed WMA, Estados Unidos: ASTEC, Inc., 2012.
- Principios De Construcción De Pavimentos De Mezcla Asfáltica En Caliente (MS-22). 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. (2^{na} ed.). Guatemala: Proyecto USAID. 2004.
- Especificaciones Y Normas De La Asociación Americana De Carreteras Estatales Y Oficiales Para El Transporte (AASHTO). Washington: AASHTO.

Investigaciones.

- 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.
- Vavríck 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.
- Páramo J., y Poncino H., Diseño de mezclas asfálticas en caliente en los inicios del siglo XXI, Argentina: Comisión Permanente del Asfalto, 2012.
- 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.
- Garnica P., Delgado H., y Gómez J., Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio, México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes del Instituto Mexicano del Transporte, 2003.
- Prowell B., Warm Mix Asphalt, Estados Unidos: U.S. Department of Transportation, 2007.
- D'angelo J., y Harm E., Warm Mix Asphalt: European practice, Estados Unidos: U.S. Department of Transportation, 2008.
- Alvarez, A.; Carvajal, J.; Reyes, O.; Estakhri, C.; Walubita, L., Analysis Of The Internal Structure Of Warm Mix Asphalt 1 (WMA) Mixtures. Texas. 2011.
- Wasiuddin, M.; Selvaratnam S, Musharraf M., and Marie Louise Thérèse Anne Guegan. Comparative Laboratory Study of Sasobit And Aspha-Min Additives in Warm Mix Asphalt. 2007.

Tesis.

- Alonzo R., Flores J. y Sánchez J., Manual de mantenimiento de vías urbanas, utilizando mezcla asfáltica en caliente, tibia y en frío, El Salvador: Universidad de El Salvador, 2012.

- Lopera C., Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (ELAEIS GUINEENSIS), Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- Bower N., Laboratory evaluation of performance of warm mix asphalt in Washington State, Estados Unidos: Washington State University, 2011.
- Castaneda C., Escobar G., y López L., Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica, El Salvador: Universidad de El Salvador, 2011.
- Crespín R., Santa Cruz I., y Torres P., Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño, El Salvador: Universidad de El Salvador, 2012.

Artículos de revista.

- Thenoux G. y Jamet A., Tecnología del asfalto espumado y diseño de mezcla, Chile: Universidad Católica de Chile.
- Thenoux G. y Jamet A., Tecnología del asfalto espumado, Chile: Revista Ingeniería de la Construcción.
- Thenoux G. y Jamet A., Asfalto Espumado: Tecnología y Aplicaciones, Chile: Universidad Católica de Chile.
- Orellana R., Asfalto Espumado: Tecnología y Aplicaciones, Chile: Instituto Chileno del Asfalto.
- Pine W., The Basics of the Bailey Method, Indianapolis: Holman Consulting Engineers.
- Ulloa A., Mezclas Asfálticas Tibias (MAT), Costa Rica: Unidad de Investigación PITRA de Laname UCR, 2011.
- Jiménez M., ¿Qué es el asfalto espumado, se puede utilizar en Costa Rica?, Costa Rica: Unidad de Investigación PITRA de Laname UCR, 2011.

- Sistema Double Barrel Green, Sistema de Mezcla de Asfalto Tibio, Latinoamérica: ASTEC, Inc.
- Harnish I., Liquid Anti-Strip Technology & Best Practice, 2010.

ANEXOS

ANEXO 1: RAZÓN DE CORRELACIÓN DE ESTABILIDAD.



Volumen de Especimen, cm ³	Espesor Aproximado de Especimen, pulg.	mm	Razón de correlación
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

^a La estabilidad medida de un espécimen multiplicada por la razón de
el espesor del espécimen corresponde a la estabilidad corregida para
especimen a 63.5 mm (2 1/2 pulg).

^b La relación de volumen-thickness se basa en un diámetro del
especimen de 101.6 mm (4 pulg)

Ensayos de agregados con tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$

ANEXO 2: ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS DE GRAVA TMN $\frac{3}{4}$ ".

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR							
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA							
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL							
LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA							
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.							
							
PARTICULAS DE CARAS FRACTURADAS (ASTM D 5821-01)							
Solicitante:	<u>Universidad de El Salvador</u>			Fecha de Recepción:	_____		
Proyecto:	<u>Trabajo de Graduación</u>			Fecha de Ensayo:	_____		
	<u>La Cantera, San Diego, La</u>						
Procedencia:	<u>Libertad.</u>			Laboratorista:	_____		
Ubicación:	<u>Quezaltepeque</u>			Elaboró:	_____		
Material:	<u>Grava mal graduada, Color gris oscuro TMN: $\frac{3}{4}$</u>						
Peso inicial: 5365.90 g							
Malla	Peso retenido según granulometría	Cantidad de partículas retenidas	Cantidad de partículas fracturadas por fracción	Cantidad de partículas no fracturadas por fracción	% de Partículas fracturadas por fracción (P)	Dudosa	Cantidad de partículas fracturadas en fracción total (FT)
Tamaño del agregado							
1"	3/4"	4265.3	1210	1207.2	2.8	99.77	4255.43
3/4"	1/2"	800.8	310	310	0	100	800.8
1/2"	3/8"						
3/8"	N° 4						
N° 4	N° 8						
Fondo							
TOTALES	5066.1	1520	1517	2.8			5056.23
Porcentaje de Partículas Con Caras Fracturadas PFT=					34%		
Porcentaje de Partículas Con Caras No Fracturadas=					5.80%		
Observaciones:	_____						

ANEXO 3: PESO VOLUMETRICO Y VACÍOS EN EL AGREGADO TMN 3/4".

		UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA			
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.					
DETERMINACIÓN DE LOS PESOS VOLUMETRICOS Y VACÍOS EN EL AGREGADO (ASTM C 29-04)					
Solicitante:		Universidad de El Salvador		Fecha de Recepción: _____	
Proyecto:		Trabajo de Graduación		Fecha de Ensayo: _____	
Procedencia:		Cantera "Hacienda Las Palmeras" DISA		Laboratorista: _____	
Ubicación:		Quezaltepeque		Elaboró: _____	
Material:		Grava Mal Graduada, color gris oscuro			
		TMN 1/2"			

h: 27.5 cm	D: 25.6 cm	Peso del molde: 6187 gr.	Volumen: 14044 cm ³		
Peso Volumétrico Suelto					
Peso de la muestra + molde (gr)	Peso del molde (gr)	Peso neto (gr)	Volumen (cm ³)	Peso Volumétrico (g/cm ³)	
25387	6187	19200.00	14044.00	1.367	
25087	6187	18900.00	14044.00	1.346	
25092	6187	18905.00	14044.00	1.346	
25096	6187	18909.00	14044.00	1.346	
				Promedio:	1.351
Peso Volumétrico Varillado					
Peso de la muestra + molde (gr)	Peso del molde (gr)	Peso neto (gr)	Volumen (cm ³)	Peso Volumétrico (g/cm ³)	
25555	6187	19368.00	14044.00	1.379	
25436	6187	19249.00	14044.00	1.371	
25400	6187	19213.00	14044.00	1.368	
25490	6187	19303.00	14044.00	1.374	
				Promedio:	1.373

Observaciones: _____

ANEXO 4: ENSAYO DE PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS DE TMN 3/4".



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.



PARTICULAS PLANAS, PARTICULAS ALARGADAS
 Y PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS DE AGREGADO GRUESO
 (ASTM D 4791-10)

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de Recepción: _____
 Trabajo de _____
 Proyecto: Graduación Fecha de Ensayo: _____
 Procedencia: La Cantera, San Diego, La
 : Libertad. Laboratorista: _____
 Ubicación: Quezaltepeque Elaboró: _____
 Material: Grava mal graduada, color
gris oscuro TMN: 3/4

Peso inicial: 5365.90 g

MALLA	% Retenido parcial	Cantidad de muestra ensayada	Fracción de Partículas Planas	% Partícula Plana	Fracción de Partículas Alargadas	% Partículas Alargadas	Fracción de Partículas Planas y Alargadas	% de Partículas Planas y Alargadas
3/4	0.90%							
1/2	78.60%	929.8	40.3	3.41	0	0	0	0
N°4	3.09%							
N°8	0.60%							
N°30	0.40%							
N°50	0.10%							
N°200	0.20%							
Fondo	0.20%							
			74	5.57%	0	0%	0	0%
Grava 96.91%	Arena	2.89%	Finos	0.20%		SUMA		100%

Observaciones

:

ANEXO 5: PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO TMN 3/4".



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.**

**DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPÉCIFICA
Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO
(AASHTO T 85-10, ASTM C 127-04)**

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de Recepción: _____
 Proyecto: Trabajo de Graduación Fecha de Ensayo: _____
 Procedencia: Cantera "Hacienda Las Palmeras" DISA Laboratorista: _____
 Ubicación: Quezaltepeque Elaboró: _____
 Material: Grava Mal Graduada, color gris oscuro TMN 3/4"

Ensayo N°	1	2	
Peso de grava SSS (g)	2258.40	2256.30	
Peso de grava sumergida (g)	1400.30	1401.00	
Peso del agua desplazada (g)	858.10	855.30	
Gravedad Específica Bulk SSS	2.632	2.638	
Peso seco de grava (g)	2214.00	2211.500	
Gravedad Específica aparente	2.721	2.729	
Gravedad Específica Bulk	2.580	2.586	
Absorción (%)	2.01%	2.03%	
Gravedad Específica Bulk SSS Promedio	2.635		
Gravedad Específica aparente Promedio	2.725		
Gravedad Específica Bulk Promedio	2.583		
Promedio de absorción (%)	2.02%		

Observaciones: _____

Ensayos de agregados con tamaño máximo nominal de 1/2".

ANEXO 6: PARTÍCULAS DE CARAS FRACTURADAS DEL AGREGADO TMN 1/2".

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR								
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA								
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL								
LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA								
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.								
PARTICULAS DE CARAS FRACTURADAS (ASTM D 5821-01)								
Solicitante:	Universidad de El Salvador			Fecha de Recepción: _____				
Proyecto:	Trabajo de Graduación			Fecha de Ensayo: _____				
	La Cantera, San Diego, La							
Procedencia:	Libertad.			Laboratorista: _____				
Ubicación:	Quezaltepeque			Elaboró: _____				
Material:	Grava mal graduada, Color gris oscuro TMN: 1/2							
Peso inicial: 1685.2 g								
Malla		Peso retenido según granulometría	Cantidad de partículas retenidas	Cantidad de partículas fracturadas por fracción	Cantidad de partículas no fracturadas por fracción	% de Partículas fracturadas por fracción (P)	Dudosa	Cantidad de partículas fracturadas en fracción total (FT)
Tamaño del agregado								
1"	3/4"	0		0				
3/4"	1/2"	131.2	131.2	131.2	0	100		131.2
1/2"	3/8"	482.5	310	310	0	100		482.5
3/8"	N° 4	908.1	908.1	908.1	0	100		908.1
N° 4	N° 8	103	103	103	0	100		103
Fondo		0	0	0				
TOTALES		1624.8	1452.8	1452.8	2.8			1624.8
Porcentaje de Partículas Con Caras Fracturadas PFT=						36.40%		
Porcentaje de Partículas Con Caras No Fracturadas=						3.60%		
Observaciones: _____								

ANEXO 7: PESO VOLUMETRICOS Y VACÍOS EN EL AGREGADO TMN 1/2".



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.**





**DETERMINACIÓN DE LOS PESOS
VOLUMETRICOS Y VACÍOS EN EL AGREGADO
(ASTM C 29-04)**

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de Recepción: _____
 Proyecto: Trabajo de Graduación Fecha de Ensayo: _____
 Procedencia: La Cantera, San Diego, La Libertad. Laboratorista: _____
 Ubicación: Quezaltepeque Elaboró: _____
 Material: Grava Mal Graduada, color gris oscuro
TMN 1/2"

h: 15.4 cm	D: 15.1 cm	Peso del molde: 1646.7 gr.		Volumen: 2757.8cm ³	
Peso Volumétrico Suelto					
Peso de la muestra + molde (gr)	Peso del molde (gr)	Peso neto (gr)	Volumen (cm ³)	Peso Volumétrico (g/cm ³)	
5392.6	1646.7	3745.90	2757.80	1.358	
5411.8	1646.7	3765.10	2757.80	1.365	
5412	1646.7	3765.30	2757.80	1.365	
5461.6	1646.7	3814.90	2757.80	1.383	
				Promedio:	1.368
Peso Volumétrico Varillado					
Peso de la muestra + molde (gr)	Peso del molde (gr)	Peso neto (gr)	Volumen (cm ³)	Peso Volumétrico (g/cm ³)	
5608.9	1646.7	3962.20	2757.80	1.437	
5630.8	1646.7	3984.10	2757.80	1.445	
5605.2	1646.7	3958.50	2757.80	1.435	
5596	1646.7	3949.30	2757.80	1.432	
				Promedio:	1.437

Observaciones: _____

ANEXO 8: PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS DE GRAVA TMN 1/2”.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR								
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.							
PARTICULAS PLANAS, PARTICULAS ALARGADAS Y PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS DE AGREGADO GRUESO (ASTM D 4791-10)								
Solicitante:	<u>Universidad de El Salvador</u>					Fecha de Recepción: _____		
Proyecto:	<u>Trabajo de Graduación</u>					Fecha de Ensayo: _____		
Procedencia:	<u>La Cantera, San Diego, La Libertad.</u>					Laboratorista: _____		
Ubicación:	<u>Quezaltepeque</u>					Elaboró: _____		
Material:	<u>Grava mal graduada, color gris oscuro TMN: 1/2</u>							
Peso inicial: 1685.0 g								
MALLA	% Retenido parcial	Cantidad de muestra a ensayada	Fracción de Partículas Planas	% Partícula Plana	Fracción de Partículas Alargadas	% Partículas Alargadas	Fracción de Partículas Planas y Alargadas	% de Partículas Planas y Alargadas
1/2	7.79%	131.3	3.6	0.21	0	0	0	0
3/8	28.63%	312.5	17.6	1.61	0	0	0	0
N°4	53.93%							
N°8	6.12%							
N°30	1.96%							
N°50	0.38%							
N°200	0.60%							
Fondo	0.59%							
			18	1.83%	0	0%	0	0%
Grava 46.07%	Arena	53.33%	Finos	0.60%		SUMA		100%
Observaciones: _____								

ANEXO 9: PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO TMN 1/2".



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.**



**DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPÉCIFICA
Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO
(AASHTO T 85-10, ASTM C 127-04)**

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de Recepción: _____
 Proyecto: Trabajo de Graduación Fecha de Ensayo: _____
 Procedencia: La Cantera, San Diego, La Libertad Laboratorista: _____
 Ubicación: Quezaltepeque Elaboró: _____
Grava Mal Graduada, color gris oscuro TMN
 Material: 1/2"

Ensayo N°	1	2	
Peso de grava SSS (g)	2388.00	2387.00	
Peso de grava sumergida (g)	1487.00	1486.00	
Peso del agua desplazada (g)	901.00	901.00	
Gravedad Específica Bulk SSS	2.650	2.649	
Peso seco de grava (g)	2342.90	2341.60	
Gravedad Específica aparente	2.737	2.737	
Gravedad Específica Bulk	2.600	2.599	
Absorción (%)	1.92%	1.94%	
Gravedad Específica Bulk SSS Promedio	2.650		
Gravedad Específica aparente Promedio	2.737		
Gravedad Específica Bulk Promedio	2.600		
Promedio de absorción (%)	1.93%		

Observaciones: _____

Ensayos de la Arena

ANEXO 10: EQUIVALENTE DE ARENA.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.**



ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA

(AASHTO T 176-08)

Solicitante: Trabajo de Graduación Fecha de recepción: _____
 Proyecto: Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente Fecha de ensayo: _____
 Procedencia: La Cantera, San Diego, La Libertad Laboratorista: _____
 Ubicación: Quezaltepeque Elaboró: _____
 Material: Arena Limosa Gris Oscuro (SP SM)

		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Lectura de Arcilla	A	4.7	2.7	
Lectura de Arena	B	2.9	2.9	
Equivalente de Arena	(B / A) x100	61.7	61.7	
Promedio		61.7		

Observaciones:

ANEXO 11: PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.



DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPÉCIFICA
 Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO
 (AASHTO T 84-10, ASTM C 128-07)

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de Recepción: _____
 Proyecto: Trabajo de Graduación Fecha de Ensayo: _____
 Procedencia: La Cantera, San Diego, La Libertad Laboratorista: _____
 Ubicación: Quezaltepeque Elaboró: _____
 Arena Limosa Gris Oscuro (SP-
 Material: SM)

Muestra N°	1	2	3
Picnómetro N°			
Peso de muestra SSS (g)	500.00	500.00	500.00
Peso del Picnómetro + agua (g)	1455.70	1454.60	1454.70
Peso del Picnómetro + agua+ muestra (g)	1,758.10	1758.60	1758.60
Peso de la muestra seca (g)	490.20	490.00	490.10
Gravedad Específica	2.481	2.500	2.499
Gravedad Específica SSS	2.530	2.551	2.550
Gravedad Específica aparente	2.610	2.634	2.632
Absorción (%)	2.00%	2.04%	2.02%
Gravedad Específica Promedio		2.493	
Gravedad Específica SSS Promedio		2.544	
Gravedad Específica aparente Promedio		2.626	
Promedio de absorción (%)		2.02%	

Observaciones: _____

ANEXO 12: PESO VOLUMÉTRICO Y VACÍOS EN EL AGREGADO FINO.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MEZCLA ASFÁLTICA
CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.



DETERMINACIÓN DE LOS PESOS VOLUMÉTRICOS Y VACÍOS EN EL AGREGADO (ASTM C 29-04)

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de Recepción: _____
 Proyecto: Trabajo de Graduación Fecha de Ensayo: _____
 Procedencia: La Cantera, San Diego, La Libertad. Laboratorista: _____
 Ubicación: Quezaltepeque Elaboró: _____
Arena Mal Graduada, Color Gris
 Material: Oscuro

h: 15.4 cm	D: 15.1 cm	Peso del molde: 1646.7 gr.		Volumen: 2757.8 cm ³	
Peso Volumétrico Suelto					
Peso de la muestra + molde (gr)	Peso del molde (gr)	Peso neto (gr)	Volumen (cm ³)	Peso Volumétrico (g/cm ³)	
6168.5	1646.7	4521.80	2757.80	1.640	
6176.7	1646.7	4530.00	2757.80	1.643	
6174.3	1646.7	4527.60	2757.80	1.642	
6185.2	1646.7	4538.50	2757.80	1.646	
				Promedio:	1.642
Peso Volumétrico Varillado					
Peso de la muestra + molde (gr)	Peso del molde (gr)	Peso neto (gr)	Volumen (cm ³)	Peso Volumétrico (g/cm ³)	
6566.6	1646.7	4919.90	2757.80	1.784	
6601.1	1646.7	4954.40	2757.80	1.797	
6541.7	1646.7	4895.00	2757.80	1.775	
6547.5	1646.7	4900.80	2757.80	1.777	
				Promedio:	1.783

Observaciones: _____