

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



**“APLICACIÓN DEL MÉTODO MARSHALL Y
GRANULOMETRÍA SUPERPAVE EN EL DISEÑO DE
MEZCLA ASFALTICA TEMPLADA CON EMULSIÓN
ASFÁLTICA”**

PRESENTADO POR:

CÉSAR ARTURO CASTANEDA SIETE

GUILLERMO ANTONIO ESCOBAR AGUILAR

LUIS ANTONIO LÓPEZ LEMUS

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR (INTERINO) :

ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO MARSHALL Y
GRANULOMETRÍA SUPERPAVE EN EL DISEÑO DE
MEZCLA ASFALTICA TEMPLADA CON EMULSIÓN
ASFÁLTICA”**

Presentado por :

CÉSAR ARTURO CASTANEDA SIETE

GUILLERMO ANTONIO ESCOBAR AGUILAR

LUIS ANTONIO LÓPEZ LEMUS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :
ING. DÍLBER ANTONIO SÁNCHEZ

ING. CARLOS GUILLERMO MATA

San Salvador, Noviembre de 2011

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. DÍLBER ANTONIO SÁNCHEZ

ING. CARLOS GUILLERMO MATA

AGRADECIMIENTOS:

A Dios todopoderoso, por habernos dado la vida, la inteligencia y la sabiduría necesaria en todo el trayecto de nuestra carrera y permitirnos concluir con éxito nuestro Trabajo de Graduación.

Los más sinceros agradecimientos a la universidad por habernos dado la oportunidad de formarnos profesionalmente especialmente a todos los docentes que con su esfuerzo y profesionalismo supieron proporcionarnos las herramientas necesarias para nuestra formación y a todo el personal que forman parte de la Escuela de Ingeniería Civil.

A nuestros asesores Ing. Dílber Antonio Sánchez e Ing. Carlos Guillermo Mata por habernos brindado su ayuda cuando la necesitamos y por alentarnos y guiarnos de la mejor manera para la culminación de nuestro trabajo.

A nuestros familiares y amigos quienes con su apoyo nos dieron la voluntad, el carácter y la fuerza para seguir formándonos personal y profesionalmente, estando pendientes de nuestros avances para la culminación de este trabajo de graduación.

GUILLERMO, CÉSAR, LUIS

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS TODOPODEROSO: Por haberme dado la vida, la salud, la inteligencia, la sabiduría y guiarme por el camino correcto durante todo el transcurso de mi carrera y el desarrollo de éste trabajo de graduación.

A MIS PADRES: Jorge Alberto Escobar y Antonia Sandra Aguilar de Escobar por su amor, comprensión, aliento y consejos, y también por haberme brindado el apoyo moral, espiritual y económico en el desarrollo de mis estudios.

A MI ESPOSA: María Inés de Escobar, por su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera y brindarme ánimos y cariño en los momentos difíciles, Te Amo Inés.

A MI HIJO: Guillermito Escobar (Yemito) Por ser la fuente de mi inspiración y la razón principal por la cual luché por finalizar mis estudios, Te Amo Yemito.

A MIS HERMANOS: Jorge Alberto y Carlos Eduardo Escobar Aguilar, por haberme apoyado siempre que lo necesité y por su compañía y sincera amistad.

A MI AMIGO: Guillermo Alexander Romero y su familia, por ser quienes me brindaron su ayuda y me abrieron las puertas de su casa cuando lo necesité, sin esperar nada a cambio, muchas gracias.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS: Luis López y César Siete, por haberme apoyado y comprendido a lo largo de éste trabajo de graduación, y habernos repuesto juntos antes las dificultades surgidas durante la realización del mismo.

A MIS PROFESORES: Que con paciencia y abnegación me transmitieron todos los conocimientos necesarios durante la carrera.

A MIS ASESORES: Ing. Dílber Sánchez e Ing. Carlos Mata por guiarme de la mejor manera posible durante el desarrollo del trabajo de graduación y brindarme el apoyo y ayuda necesaria siempre.

A TODOS LOS PROFESIONALES Y DEMÁS PERSONAS: Ing. Erick Calidonio, Ing. Alfredo Torres, Téc. Majico, Don Pancho y Chepe, quiénes nos brindaron el apoyo necesario en el laboratorio de ASFALCA S.A. de C.V., Y a todas las personas que de una manera directa o indirecta colaboraron en la elaboración de este Trabajo de Graduación.

“Dios Bendiga a todas las personas anteriormente mencionadas”

“El tamaño de tus sueños es el tamaño de tu Dios”

GUILLERMO ESCOBAR

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS TODOPODEROSO: Por darme vida, salud, fortaleza y sabiduría para afrontar los obstáculos, y ahora para culminar mis estudios universitarios.

A MIS PADRES: Luis Alonso López y María Esperanza Lemus, por su amor, su apoyo, esfuerzos y sacrificios para poder brindarme la ayuda suficiente para lograr mis estudios universitarios.

A MIS HERMANOS: Carlos Antonio López por haber llegado a nuestra familia y alegrar nuestras vidas, a mi hermanita Irma Esperanza López por haber convivido con nosotros y dejar sus recuerdos de amor en nuestros corazones.

A MI FAMILIA: Dora Alicia Lemus, Claudia Yanira Lemus, Beatriz Lemus, Mónica Lemus y Salvador Zamora, a quienes agradezco su apoyo incondicional y su amor familiar.

A MIS AMIGOS: Ismael Santa Cruz, Rebeca Guerra, Kenny Tobías, Neydi García, Rafael Crespín, Danilo Cruz, Diana Marisol, amigos que me brindaron mucho apoyo, amor y demostraron lo valioso que he sido en sus vidas.

A LOS PROFESIONALES QUE COLABORARON CON EL TRABAJO DE GRADUACION: Ingeniero Dilber Sánchez, Ingeniero Carlos Mata, Ingeniero Franklin Barrera, Ingeniero Erick Calidonio, Ingeniero Grijalba Portal, Ingeniero Alex Pineda, Ingeniero Víctor León, Ingeniero Victor Alfonso.

A todos muchas Gracias.

LUIS ANTONIO LOPEZ

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS: Por haber sido mi principal apoyo durante el transcurso de mi carrera, por haberme dado la sabiduría, las fuerzas y la paciencia para poder seguir adelante y sobreponerme ante todo tipo de obstáculos.

A él sea toda la gloria y la honra por haberme guiado hasta acá y permitirme alcanzar una de mis tan añoradas metas.

A MIS PADRES: Julio César Castaneda Carranza y María Vilma Siete Reyes; por ser los mejores padres y maestros que puedo tener, quienes con su sabiduría y buenos consejos me supieron guiar siempre por el buen camino hasta forjarme y convertirme en un hombre de bien.

Muchas gracias por su comprensión, amor, esfuerzo y el apoyo incondicional que me brindaron, compartiendo conmigo las alegrías y las tristezas durante mis años de estudio.

Este triunfo no es solamente mío, la mayor parte es de ustedes. Los amo.

A MIS HERMANAS: Eva María Castaneda y Vilma Aracely Castaneda, por convivir conmigo esta experiencia y haberme apoyado de muchas formas.

A MI TIA: Miriam Siete, por todo su apoyo y comprensión, porque siempre estuvo conmigo incondicionalmente.

A LA FAMILIA SIETE GUARDADO: Muchas gracias por abrirme las puertas de su hogar y por toda la ayuda y confianza que me brindaron durante todo el tiempo que conviví con todos ustedes.

A MIS ASESORES: Ing. Dílber Sánchez , Ing. Carlos Mata; por su valiosa colaboración en el desarrollo de este trabajo de graduación, por forjarnos con toda su experiencia y conocimientos en nuestra formación académica.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS: Guillermo Escobar y Luis López; por su valiosa colaboración, apoyo y comprensión para la realización de nuestro trabajo de graduación.

Por haberme permitido compartir con ellos esta experiencia, y porque de una u otra manera hemos estrechado más los lazos de amistad. Fue un gusto haber trabajado con ustedes.

A MIS AMIGOS Y DEMÁS FAMILIARES: Muchas gracias por su cariño y apoyo, porque también han aportado su granito de arena en la realización de este esfuerzo.

**AGRADECIMIENTOS ESPECIALES A LOS SIGUIENTES PROFESIONALES
Y AMIGOS QUE COLABORARON EN LA REALIZACION DE ESTE
TRABAJO DE GRADUACION:**

Ing. Erick Calidonio.

Ing. Raúl

Ing. Alfredo Torres.

Ing. Stanley Portal.

Ing. Breyen Ríos.

Ing. Alex Pineda.

A los técnicos y trabajadores de ASFALCA S.A DE C.V:

Téc. Majico, José (Chepe) y a Don Pancho.

A mi amigo y compañero:

Br. Víctor León.

“Para lograr algo requieres insistir y persistir, dar un cien por ciento de tu voluntad”

CÉSAR CASTANEDA SIETE.

INDICE

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes	4
1.3 Planteamiento del problema	7
1.4 Justificaciones	8
1.5 Objetivos.....	10
1.5.1 Objetivo General	10
1.5.2 Objetivos Específicos	10
1.6 Alcances.....	11
1.7 Limitaciones.....	12

CAPITULO II: MATERIALES PETREOS

2.1 Definición de agregados pétreos.....	14
2.2 Tipos de agregados pétreos.....	14
2.3 Conceptos más frecuentes relacionados a los agregados.....	19
2.4 Propiedades de los agregados pétreos.....	20
2.4.1 Propiedades individuales.....	20
2.4.2 Propiedades de conjunto.....	20
2.5 Clasificación de las rocas.....	21
2.5.1 Rocas ígneas.....	21
2.5.2 Rocas sedimentarias.....	23
2.5.3 Rocas metamórficas.....	24
2.5.4 Clasificación petrológica de las rocas.....	25
2.5.5 Clasificación mineralógica de las rocas.....	26

2.6 Características principales de los agregados pétreos para pavimentos	27
2.6.1 Graduación.....	28
2.6.2 Tamaño máximo de la partícula.....	29
2.6.3 Textura superficial.....	30
2.6.4 Limpieza.....	31
2.6.5 Capacidad de absorción.....	32
2.6.6 Dureza.....	34
2.6.7 Afinidad con el asfalto.....	35
2.6.8 Forma de la partícula.....	37
2.6.9 Peso específico.....	38
2.7 Especificaciones para agregados en pavimentos con emulsión asfáltica.....	40
2.7.1 Especificaciones técnicas.....	40
2.7.2 Especificaciones para agregado grueso.....	41
2.7.3 Especificaciones para agregado fino.....	42
2.8 Método SUPERPAVE.....	43
2.8.1 Generalidades del método SUPERPAVE.....	43
2.8.2 Niveles de diseño SUPERPAVE.....	44
2.8.2.1 Nivel I.....	46
2.8.2.2 Nivel II.....	47
2.8.2.3 Nivel III.....	47
2.8.3 Agregados minerales SUPERPAVE.....	48
2.8.3.1 Propiedades de consenso.....	48
2.8.3.1.1 Angularidad del agregado grueso.....	49

2.8.3.1.2 Angularidad del agregado fino.....	51
2.8.3.1.3 Partículas alargadas y chatas.....	51
2.8.3.1.4 Contenido de arcilla.....	52
2.8.4 Propiedades de la fuente de origen.....	53
2.8.4.1 Tenacidad.....	54
2.8.4.2 Durabilidad.....	54
2.8.4.3 Materiales deletéreos.....	54
2.8.5 Análisis de la granulometría SUPERPAVE.....	55
2.8.5.1 Grafica elevada al exponente 0.45.....	55
2.8.5.2 Origen de la gráfica de Fuller.....	56
2.8.5.3 Importancia de la gráfica de Fuller.....	58
2.8.6 Granulometría SUPERPAVE.....	59
2.8.7 Mecanismos de control de la granulometría.....	68
2.8.8 La zona restringida.....	70
2.8.9 Ensayos a agregados pétreos.....	75
2.8.10 Resumen de resultados de ensayos	85

CAPITULO III: EMULSIONES ASFALTICAS

3.1 Las emulsiones.....	87
3.2 Los emulsificantes.....	90
3.3 Las emulsiones asfálticas.....	91
3.4 Tipos de emulsiones asfálticas.....	94
3.4.1 Emulsiones aniónicas.....	95
3.4.2 Emulsiones catiónicas.....	95
3.4.3 De rompimiento rápido.....	95
3.4.4 De rompimiento medio.....	95

3.4.5 De rompimiento lento.....	96
3.4.6 Para impregnación.....	96
3.4.7 Super estables.....	96
3.5 Clasificación de las emulsiones asfálticas.....	97
3.6 Propiedades de las emulsiones asfálticas.....	98
3.6.1 Rompimiento de las emulsiones asfálticas.....	98
3.6.2 Viscosidad.....	100
3.6.3 Floculación.....	100
3.6.4 Sedimentación.....	100
3.6.5 Coalescencia.....	100
3.7 Ventajas de las emulsiones asfálticas.....	101
3.8 Recomendaciones para el uso de emulsiones asfálticas.....	103
3.8.1 Usos de las emulsiones catiónicas.....	105
3.9 Especificaciones de las emulsiones asfálticas.....	107
3.10 Emulsiones de asfaltos modificados.....	108
3.11 Fabricación de emulsiones asfálticas.....	109
3.12 Ensayos a emulsiones asfálticas.....	110
3.12.1 Viscosidad.....	110
3.12.2 Residuo de destilación.....	110
3.12.3 Sedimentación.....	111
3.12.4 Demulsibilidad.....	111
3.12.5 Ensayo de tamizado.....	112
3.12.6 Mezclado con cemento.....	113
3.12.7 Método de ensayo estándar para viscosidad Saybolt...	114
3.12.8 Residuos por destilación.....	116

3.12.9 Sedimentación AASHTO T 59.....	118
3.12.10 Tamizado AASHTO T59.....	121

CAPITULO IV: DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA TEMPLADA

4.1 Clasificación de las mezclas asfálticas.....	124
4.2 Definición de mezcla asfáltica templada.....	128
4.2.1 Beneficios de las mezclas asfálticas templadas.....	128
4.3 Propiedades que debe presentar la mezcla.....	129
4.3.1 Estabilidad.....	129
4.3.2 Durabilidad.....	130
4.3.3 Flexibilidad.....	131
4.3.4 Resistencia a la fatiga.....	132
4.3.5 Resistencia al deslizamiento.....	132
4.3.6 Impermeabilidad.....	133
4.3.7 Trabajabilidad.....	133
4.4 Características de la mezcla.....	134
4.4.1 Densidad.....	134
4.4.2 Vacíos de aire.....	135
4.4.3 Vacíos en el agregado mineral (VMA).....	135
4.4.4 Contenido de asfalto.....	136
4.4.5 Vacíos llenos de asfalto (VFA).....	138
4.5 Método de Illinois.....	139
4.5.1 Metodología.....	139
4.5.2 Propósito de la metodología.....	139
4.5.3 Descripción general del método.....	140

4.5.4 Especificaciones de la metodología.....	141
4.6 Procedimiento de diseño de la mezcla asfáltica templada.....	143
4.7 Dosificación de agregados.....	154
4.7.1 Método analítico.....	155
4.7.1.1 Dosificación para dos agregados.....	155
4.7.1.2 Granulometría de los dos agregados a ser combinados..	156
4.7.1.3 Límites de graduación granulométrica para mezclas con Tamaño máximo nominal de 19 mm.....	157
4.7.1.4 Combinación de diseño para mezcla asfáltica templada..	159
4.7.1.5 Combinación teórica.....	161
4.7.1.6 Análisis de la combinación.....	163
4.7.2 Combinación de laboratorio.....	164
4.7.3 Estimación del porcentaje óptimo de asfalto.....	166
4.7.3.1 Relación propuesta por el Manual Básico de Mezclas en Frío (MS 14).....	166
4.7.3.2 Relación propuesta por el Manual de Diseño de Mezclas Asfálticas SUPERPAVE.....	167
4.7.3.3 Obtención del contenido óptimo de asfalto SUPERPAVE.....	167
4.7.4 Dosificación para las briquetas de prueba.....	172
4.8 Procedimiento de la Metodología de Diseño propuesta por la Universidad de Illinois.....	172
4.8.1 Procedimiento de dosificación para cada briketa.....	173
 CAPITULO V: ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS	
5.1 Trabajo de laboratorio para el diseño de la mezcla.....	181

5.1.1 Gravedad Especifica Bulk.....	182
5.1.2 Gravedad Especifica Teórica Máxima.....	186
5.1.3 Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas.....	189
5.1.3.1 Calculo de estabilidad corregida.....	197
5.2 Análisis de los resultados de laboratorio.....	202
5.2.1 Análisis de la densidad.....	202
5.2.2 Análisis de vacíos de aire.....	203
5.2.3 Análisis de vacíos en el agregado mineral (VMA).....	205
5.2.4 Análisis de vacíos llenos de asfalto (VFA).....	207
5.3 Análisis y gráficos de resultados obtenidos.....	209
5.3.1 Observaciones y tendencias de las gráficas de diseño...	214
5.4 Determinación del contenido óptimo de asfalto.....	215
5.5 Experimentos adicionales a la mezcla asfáltica templada.....	219
5.6 Conclusiones.....	223
5.7 Recomendaciones.....	226
Bibliografía.....	227

CAPITULO I

GENERALIDADES

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El concreto asfáltico en nuestro país y en todo el mundo se ha convertido en uno de los principales materiales para la construcción de carreteras, principalmente elegido por su rapidez de construcción y sus buenas propiedades de funcionalidad y durabilidad. Por lo tanto por ser un material muy utilizado en la construcción de obras viales, se ha tenido la necesidad de hacer muchas investigaciones cuya finalidad es obtener un material más durable pero que mantenga sus propiedades de funcionalidad. En nuestro país el concreto asfáltico utilizado es el concreto hecho con mezclas asfálticas en caliente cuyos materiales constituyentes son agregados pétreos y cemento asfáltico, para poder realizar esta mezcla ambos materiales son calentados a una temperatura adecuada para mezclarse y posteriormente colocarse y compactarse. Con el pasar de los años apareció las mezclas en frío en donde el concreto asfáltico es obtenido utilizando emulsión asfáltica como ligante y los materiales pétreos al igual que la emulsión asfáltica no se han tenido que calentar a temperaturas altas, trayendo consigo un ahorro económico significativo en comparación a las mezclas en caliente ya que con este concreto se necesita menor consumo de combustible y ahorro de energía para su elaboración.

Una investigación más reciente y aun no conocida en nuestro país; trata una nueva alternativa de diseño de mezclas asfálticas , cuyo nombre es MEZCLAS ASFÁLTICAS TEMPLADAS; que es una tecnología de mezcla asfáltica que ya ha sido estudiada e implementada en Europa y en algunos países de Suramérica y Norteamérica.

Esta nueva modalidad en los concretos asfálticos, permite obtener concretos con temperaturas de fabricación y compactación, menores a las usadas tradicionalmente con las mezclas producidas en caliente debido al uso de aditivos, esta variante en la temperatura permite obtener un mayor control en planta y en campo para su fabricación y colocación, mientras que las propiedades de la mezcla misma no se ven afectadas en ningún momento por los pocos rangos de temperatura utilizados para su producción.

Debido a ello nos hemos planteado realizar el diseño de una mezcla asfáltica templada utilizando emulsión asfáltica como ligante de la mezcla y utilizando una granulometría que respete los requerimientos del método de diseño de mezclas SUPERPAVE (Superior Performing Pavement).

Este capítulo tiene como prerrogativa el establecimiento de las causas que impulsaron la realización de este trabajo de graduación, por lo que en primera instancia se hará una exposición de los antecedentes relacionados con el tema central.

Establecidos los antecedentes se procederá al planteamiento del problema que será la base del desempeño del trabajo de graduación puesto que en él se

plasmarán los puntos que a nuestro juicio son de vital importancia para desarrollo de trabajos relacionados y que hasta el momento no tienen una solución completamente satisfactoria. El porqué de esta investigación se detallará en el siguiente punto a través de las justificaciones. Se establecerán posteriormente cuales son los objetivos y los alcances que se pretenden con este trabajo, tanto de forma global como específica.

Finalmente se estipularán las limitaciones con la que se cuenta para la ejecución de esta investigación. De esta manera se espera dejar claro el problema, sus orígenes, los puntos que se atacarán y como se estudiarán y como se abordarán en vía de la resolución del problema planteado.

1.2 ANTECEDENTES

En El Salvador a raíz de la guerra civil que se vivió en la década de los 80's, la infraestructura vial al igual que toda obra de construcción en general se vieron afectadas grandemente y fue a partir de la finalización del conflicto armado que la construcción de calles y carreteras tuvo un desarrollo más notable. Actualmente este desarrollo que se ha tenido ha traído muchos beneficios económicos a la población y a la misma vez ha sido fuente de empleo para obreros y profesionales de la ingeniería civil dedicados al diseño y construcción de todo tipo de obras viales.

En años recientes las mezclas asfálticas utilizadas en la capa de rodadura eran específicamente diseños de mezclas asfálticas en caliente cuyos diseños y especificaciones aún se siguen utilizando tanto para mezclas densas como mezclas abiertas. Con el avance de nuevas tecnologías en el diseño de mezclas asfálticas se dio el surgimiento de las mezclas en frío, en donde se sustituyó el cemento asfáltico por emulsión asfáltica como ligante, estas mezclas como su nombre lo dice, son mezclas en frío ya que los agregados y la emulsión asfáltica no se calienta a grandes temperaturas para su mezclado, este tipo de mezclas también ha sido utilizado tanto para mezclas densas y mezclas abiertas. Actualmente estos diseños de mezclas son utilizados en nuestro país.

Recientemente en otros países ha surgido una nueva alternativa de diseño de mezclas asfálticas la cual tiene el nombre de mezclas templadas, técnica que ha sido utilizada en proyectos como:

- ✓ Kilómetro 6.5 y 8.2 del tramo de la carretera CL-600, entre Viana de Cega y Puente Duero, (Valladolid, España).
- ✓ Carretera a Errekaballara de Asteasu, tramo de dos kilómetros de la GI-4141 (Francia).
- ✓ Avenida Huergo (Argentina).
- ✓ Tres secciones de prueba en Virginia (EEUU), en el año 2006.
- ✓ Condados de: Highlands, York County (ruta estatal 143), Rappahannock.

- ✓ Tramo de prueba en el Barrio de Caballito (Buenos Aires, Argentina).
- ✓ Este tipo de tecnología es muy reciente y está más desarrollado en Europa, actualmente en América sólo ha sido empleada en Argentina y en los Estados Unidos.
- ✓ En Chile, Perú y Colombia, este tipo de mezcla asfáltica aún se encuentra en investigación pero se espera empiecen a ser utilizadas dentro de poco tiempo en Centroamérica y específicamente en El Salvador, se conoce poco sobre este tipo de mezcla asfáltica y aún no se han realizado diseños ni existen tramos de prueba, mucho menos vías con este tipo de mezcla asfáltica en su capa de rodadura.

La presente investigación tratará de estudiar y aplicar la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas templadas; diseños que se realizarán utilizando emulsión asfáltica y granulometría según especificaciones del Método SUPERPAVE.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En nuestro país, las mezclas asfálticas que se producen para su uso en carreteras son: las mezclas asfálticas en caliente y las mezclas asfálticas en frío.

Sin embargo, existe un tipo de mezcla asfáltica denominada Templada, la cual ha surgido hace poco tiempo y está siendo implementada en algunos países de Europa y América.

Estas mezclas templadas, son aquellas que se fabrican utilizando emulsión asfáltica y aditivo y se producen a una temperatura mayor a las mezclas en frío, calentando los agregados pétreos a una temperatura que oscila entre 80°C – 90°C y la emulsión asfáltica calentada a una temperatura de 60°C.

Actualmente en nuestro país, no han sido utilizadas en la construcción de carreteras; debido a esto, es de mucha importancia realizar una investigación que nos permita conocer el diseño y las características que este nuevo tipo de mezcla asfáltica presenta.

Para tal fin, se realizará un diseño de mezcla asfáltica templada densa, con tamaño máximo nominal de 3/4" que cumpla con una granulometría SUPERPAVE y que sea apta para tráfico medio.

El diseño de la mezcla asfáltica templada, se basará en el método Marshall Modificado para el análisis de las propiedades volumétricas de la mezcla, y en el método SUPERPAVE, para el diseño de la estructura granular de la mezcla.

Al diseño de la mezcla asfáltica templada, se le verificará que cumpla, tanto con las especificaciones del método Marshall Modificado, así como también, con las especificaciones granulométricas del método SUPERPAVE.

Esta investigación, colaboraría también a que las empresas dedicadas a la producción de mezclas asfálticas, conozcan y evalúen las ventajas y desventajas de trabajar con las mezclas asfálticas templadas.

1.4 JUSTIFICACIONES

En nuestro país, debido a que no se conocen las mezclas asfálticas templadas, y en la construcción de calles y carreteras, generalmente se utilizan mezclas en caliente y mezclas en frío; es importante tener conocimiento sobre las mezclas templadas con emulsión asfáltica ya que esta alternativa de diseño tiene ventajas de ahorro en su costo de producción en comparación con las mezclas en caliente, además de que los resultados de durabilidad de la capa de rodadura construida con mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica han presentado buenos resultados según la información encontrada sobre proyectos construidos en países como Estados Unidos, España y Argentina entre otros, en donde se utilizó esta mezcla asfáltica.

En comparación con las mezclas en caliente la mezcla templada con emulsión asfáltica tienen menor riesgo para el personal al manipularla ya que su temperatura es baja, también vendría a representar una alternativa de mezcla asfáltica para ser utilizada en la construcción de calles y carreteras de nuestro país.

Estas mezclas representan una opción nueva de capa de rodadura para pavimentos, estudiarlas y aprender de su comportamiento desde el momento de la selección de su granulometría para establecer el diseño de la mezcla es necesario, la información que ello brinde facilitará la investigación a las empresas o instituciones cuyas actividades involucren las mezclas asfálticas ya sea en construcción, diseño o simplemente gestión.

Finalmente, los estudiantes y profesionales podrán tener una herramienta más que les permitirá realizar proyectos similares con mucha mejor capacidad de obtención de los resultados y planteamiento de soluciones que le permitan tomar decisiones que sean más funcionales y económicas para la solución del problema.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL:

- Obtener el diseño de una mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica y granulometría SUPERPAVE, utilizando el Método Marshall.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la calidad de los materiales pétreos, mediante los ensayos correspondientes según lo especificado en las normas AASHTO.
- Determinar la proporción de los agregados pétreos, que conformaran la combinación granulométrica de la mezcla asfáltica con tamaño máximo nominal de 3/4", y verificar que la curva granulométrica de esta combinación teórica, pase por los puntos de control y evite la zona restringida que establece el método SUPERPAVE.
- Realizar la combinación granulométrica propuesta, y comprobar si esta, se apega a la combinación teórica o cae dentro de las tolerancias permisibles previamente establecidas.
- Evaluar las formulas propuestas en SUPERPAVE y Manual Básico de mezclas en frío (MS-14), para la obtención del contenido optimo teórico de emulsión asfáltica y determinar mediante la comparación de los resultados, el valor que será utilizado en el diseño de la mezcla de laboratorio.

- Elaborar mezclas de prueba en el laboratorio, con las proporciones agregados pétreos/ emulsión asfáltica, que sean convenientes y que permitan determinar el contenido óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla.
- Ensayar las mezclas de prueba mediante el Método Marshall y observar si la mezcla asfáltica cumple con los criterios que establece el Instituto del Asfalto para tránsito medio.

1.6 ALCANCES

- Los ensayos concernientes a la determinación de la calidad de los materiales; corresponderán nada más a aquellos que sean de utilidad para el diseño de la mezcla asfáltica templada.
- El diseño obtenido de la mezcla asfáltica templada, se analizara para un tráfico medio, por lo tanto las consideraciones y especificaciones utilizadas serán las correspondientes a dicho tráfico.
- La investigación abordara el diseño teórico y el diseño de laboratorio, excluyendo para la presente; la producción de la mezcla en planta y la realización de tramos de prueba.

1.7 LIMITACIONES

- El tipo de emulsión asfáltica que se utilizará en el diseño de la mezcla asfáltica templada, se limitará a la que recomiende y provea la empresa ASFALCA.
- El diseño de la mezcla templada, se adecuará a las metodologías de diseño que se utilizan en el país; para nuestro caso, la metodología Marshall, por lo que los criterios y las especificaciones a tomar en cuenta para la comparación de los resultados de la mezcla, serán los que considera dicho método.

CAPITULO II

MATERIALES PÉTREOS

2. MATERIALES PÉTREOS

2.1 DEFINICIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS.

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos inertes, que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y 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 (cementos asfálticos y emulsiones).

Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso, y entre el 75 y 85%, en volumen de la mayoría de estructuras de pavimentos.

El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante de la estructura de pavimento.

2.2 TIPOS DE AGREGADOS PÉTREOS.

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

a) Agregados naturales.

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimentos son la grava y la arena.

La grava se define usualmente, como partículas de tamaño igual o mayor que 4.75 mm (Nº4). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 4.75 mm (Nº4) pero mayor que 0.075 mm (No 200). Las partículas menores de 0.075 mm (No 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto, y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de cantera de ríos.

Los depósitos de grava varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente alguna cantidad de arcilla y limo.

b) Agregados de trituración.

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Aquí se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

Existen dos fuentes principales de agregados procesados o de trituración; estas son: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimentos de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas.

El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable; sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste principalmente en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones de

economía, el material triturado es utilizado tal como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado.

Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimentos. Sin embargo es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores a 6.35 mm (1/4 pulg), casi siempre, y usada como agregado de arena triturada o procesada hasta tamaños máximos de 0.60 mm (No 30).

c) Agregados sintéticos o artificiales.

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el caso del refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o triturarla una vez se ha enfriado.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación, ellos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y presentan una resistencia muy alta al desgaste. Los agregados sintéticos han sido usados en la pavimentación de cubiertas de puentes y cubiertas de techos, así como en capas superficiales de pavimento donde se requiere la máxima resistencia al deslizamiento.

d) Agregados marginales.

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

2.3 CONCEPTOS MÁS FRECUENTES RELACIONADOS A LOS AGREGADOS.

- ✓ **Agregado Grueso:** Agregado que pasa el tamiz de 3" y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4)
- ✓ **Agregado Fino:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenido en el tamiz de 75 μ m (No. 200)
- ✓ **Polvo Mineral:** La porción de agregado fino que pasa el tamiz No. 200
- ✓ **Relleno Mineral:** Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75 μ m (No. 200).
- ✓ **Agregado de Graduación Gruesa:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.
- ✓ **Agregado de Graduación Fina:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos.
- ✓ **Agregado Densamente Graduado:** Agregado con una distribución de tamaños de partícula, tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.
- ✓ **Agregado de Graduación Abierta:** Agregado que contiene poco o ningún llenante mineral, y donde los espacios de vacíos en el agregado compactado son relativamente grandes.

- ✓ **Agregado Bien Graduado:** Agregado cuya graduación va desde el tamaño máximo hasta el de un llenante mineral con el objeto de obtener una mezcla bituminosa con un contenido de vacíos controlado y alta estabilidad.

2.4 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

Las propiedades de los agregados pétreos se pueden conceptualizar bajo dos puntos de vista; uno como elementos aislados o individuales, y otro como conjunto.

2.4.1 Propiedades individuales.

Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, modulo elástico, conductividad térmica, etc. Así mismo presentan unas propiedades químicas macroscópicas: solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc.

2.4.2 Propiedades de conjunto.

Las propiedades de conjunto de los agregados pétreos son sus características como un todo. La distribución de la redondez o desgaste de los agregados es

una propiedad de gran interés, por cuanto va influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

2.5 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS.

Los diferentes tipos de rocas se pueden dividir, según su origen, en tres grandes grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

2.5.1 Las rocas ígneas.

Son aquellas formadas a partir del enfriamiento de rocas fundidas (magmas). Son rocas cristalinas.

Los magmas pueden enfriar de manera rápida en la superficie de la tierra mediante la actividad volcánica o cristalizar lentamente en el interior, originando grandes masas de rocas llamadas plutónicas. Cuando cristalizan en grietas de la corteza forman las rocas ígneas filonianas.

- ✓ **Rocas plutónicas:** Estas se forman cuando el magma solidifica en el interior de la tierra. Como en el interior las temperaturas son elevadas, el enfriamiento de los magmas es muy lento, por lo que estas rocas presentan cristales relativamente grandes que se ven bien a simple vista. Como la presión del interior es también muy elevada, los minerales crecen estrechamente unidos formando rocas densas y sin huecos. Los granitos son las rocas plutónicas más comunes y están compuestos por una mezcla de los minerales cuarzo, feldespatos y micas. El gabro, es

otra roca plutónica muy común, se reconoce por la ausencia de cuarzo y sus tonos oscuros.

- ✓ **Rocas volcánicas:** Se originan cuando los magmas enfrían en la superficie de la tierra a temperaturas y presiones bajas; en estas condiciones el enfriamiento es muy rápido y por ello son rocas constituidas por una masa de cristales de pequeño tamaño o bien materia amorfa sin cristalizar (vidrio). Al originarse en la superficie, donde la presión es baja, pueden adquirir un aspecto esponjoso. Las rocas volcánicas se clasifican en función de su composición química, una roca muy frecuente y fácil de reconocer por sus tonos oscuros es el basalto; la riolita por el contrario presenta tonos claros.

- ✓ **Rocas filonianas:** Se forman cuando los magmas cristalizan en el interior de grietas o fracturas en las que las presiones y temperaturas no son tan elevadas como las que soportan las rocas plutónicas durante su formación, ni tan bajas como las de las rocas volcánicas. De entre ellas destacan los pórfidos a las rocas que presentan grandes cristales de un mineral envueltos en una pasta de pequeños cristales de otros minerales. Las Pegmatitas se reconocen fácilmente por presentar grandes cristales de cuarzo, feldespatos y micas.

2.5.2 Rocas sedimentarias.

Son las originadas a partir de la consolidación de fragmentos de otras rocas, de restos de plantas y animales o de precipitados químicos, formados en zonas superficiales de la corteza terrestre, se denominan Rocas Sedimentarias y se pueden distinguir las siguientes:

- ✓ **Rocas sedimentarias detríticas:** Formadas a partir de la sedimentación de trozos de otras rocas después de una fase de transporte. La clasificación de estas rocas se basa en los tamaños de los trozos que las componen; las constituidas por trozos de tamaño grande, son los Conglomerados, las Areniscas poseen granos de tamaño intermedio y los Limos y Arcillas poseen trozos muy pequeños.
- ✓ **Rocas sedimentarias químicas y orgánicas:** Son las formadas a partir de la precipitación de determinados compuestos químicos en soluciones acuosas o bien por acumulación de sustancias de origen orgánico. Un tipo muy común es la roca Caliza, formada en su mayor parte por restos de organismos como corales, algas, etc. Aunque también pueden originarse por precipitación de cementos calcáreos. Los Carbones y Petróleos son rocas sedimentarias orgánicas originadas a partir de la acumulación de restos de materia orgánica.

2.5.3 Rocas Metamórficas.

Son aquellas que son sometidas a intensas presiones y temperaturas, sufren cambios en sus minerales y se transforma en un nuevo tipo de roca; es decir son rocas recristalizadas.

El proceso metamórfico se realiza en estado sólido y puede ocurrir en diferentes ambientes terrestres, por ejemplo; a ciertas profundidades las rocas sufren cambios debidos al peso de los materiales que hay por encima y a las grandes temperaturas.

También se produce metamorfismo en los bordes de las placas tectónicas debido fundamentalmente a las grandes presiones que actúan y también en los alrededores de los magmas gracias a las grandes temperaturas reinantes, por tanto las transformaciones se producen sin que la roca llegue a fundirse.

La mayoría de las rocas metamórficas, se caracterizan por un aplastamiento general de sus minerales que hace que se presenten alineados. Esta estructura característica que denominamos foliación, se ve muy bien en rocas como las pizarras y los esquistos.

Las Pizarras; son arcillas metamorfizadas, presentan foliación muy recta, paralela y próxima. Generalmente son oscuras y con frecuencia contienen fósiles.

Los Esquistos; son rocas que han sufrido un metamorfismo más intenso. Presentan foliación algo deformada y los fósiles que pudiera haber en la roca original desaparecen durante el proceso metamórfico.

Otras rocas metamórficas muy comunes son:

El mármol; que se trata de rocas carbonatadas (como calizas) que han sufrido metamorfismo y presentan un aspecto cristalino característico.

La Cuarcita; estas son areniscas ricas en cuarzo metamorfizadas.

2.5.4 Clasificación petrológica de las rocas.

Petrológicamente las rocas pueden clasificarse en varios grupos de rocas de características comunes, entre estos tenemos:

- ✓ **Grupo basáltico:** Andesita, basalto, porfiritas básicas, dolerías de todas clases, epidorita cuarzo – dolerita.
- ✓ **Grupo pedernalino:** Horsteno, pedernal.
- ✓ **Grupo gabrico:** Diorita básica, gabro, hornoblenda-roca, norita, peridotito, picritica.
- ✓ **Grupo granítico:** Granito, granodiorita, granulito, pegmatita, cuarzo-diorita, sionita.
- ✓ **Grupo arenisco:** Aglomerado, arcosa, brecha, arenilla, arenisca, tufa.
- ✓ **Grupo hornofelsico:** Rocas que se alteran al contacto de todas clases, excepto mármol.
- ✓ **Grupo calizo:** Dolomita, caliza, mármol.
- ✓ **Grupo porfirítico:** Aplita, dacita, felsita, microgramito, pórfido, cuarzo, porfirita, riolita, troquita.

- ✓ **Grupo cuarzoso:** Arcilla refractaria, areniscas cuarzosas, cuarcita recristalizada.
- ✓ **Grupo esquistoso:** Filita, esquisto, pizarra, todas las rocas severamente agrietadas.

2.5.5 Clasificación mineralógica de las rocas.

De acuerdo a su mineralogía, las rocas se clasifican en:

- ✓ Minerales de sílice (cuarzo, ópalo, calcedonia, tridimita).
- ✓ Feldespatos.
- ✓ Minerales de Mica.
- ✓ Minerales de Carbonato.
- ✓ Minerales de Sulfato.
- ✓ Minerales de Sulfuro de Hierro.
- ✓ Minerales de Ferro magnesio.
- ✓ Zeolitas.
- ✓ Óxidos de hierro.
- ✓ Minerales de Arcilla.

2.6 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS AGREGADOS PETREOS PARA PAVIMENTOS.

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación.

Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aun mas, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfaltico de buena calidad.

Las propiedades más relevantes, consideradas para un agregado apropiado para concreto asfaltico de buena calidad son las siguientes:

- ✓ Graduación y tamaño máximo de partícula.
- ✓ Textura superficial
- ✓ Limpieza
- ✓ Capacidad de absorción
- ✓ Dureza
- ✓ Afinidad con el asfalto
- ✓ Forma de la partícula
- ✓ Peso específico

Cada una de estas propiedades importantes que debe poseer un agregado que será utilizado en pavimentación, se describen a continuación.

2.6.1 Graduación.

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica requieren que las partículas de agregado, estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas, esté presente en ciertas proporciones mediante el cribado de los agregados (Figura 2.1).

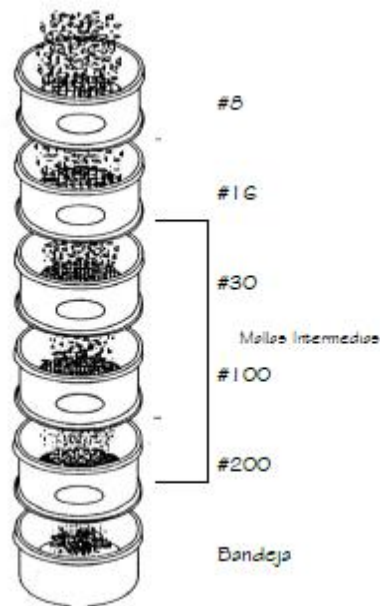


Figura 2.1 Cribado de agregados pétreos.

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado, es comúnmente llamada graduación del agregado o gradación del agregado.

Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

2.6.2 Tamaño máximo de partícula.

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado utilizado.

Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas, estos se describen a continuación:

- ✓ **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.
- ✓ **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.

Una mezcla de pavimentación, se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o a su tamaño máximo nominal.

La granulometría de las partículas es determinada por un análisis de tamices efectuado sobre las muestras de agregados. El análisis de tamices, consiste en pasar la muestra por una serie de tamices (**ver figura 2.1**), cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico.

Los tamices están denominados de acuerdo al tamaño de sus aberturas. Las partículas gruesas, quedan atrapadas en los tamices superiores; las partículas de tamaño mediano pasan a través de los tamices medianos, y las partículas finas pasan a través de los tamices inferiores.

La granulometría del agregado, o graduación de la mezcla, tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, después de haber efectuado el análisis de tamices, luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra.

Los concretos asfálticos, son clasificados de acuerdo a los porcentajes de partículas de agregado que contienen y todos ellos son esenciales para la producción de una mezcla asfáltica densa, cohesiva, durable y resistente a la penetración del agua.

2.6.3 Textura superficial.

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento.

Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel lija, aumenta 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.

Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es tan solo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

2.6.4 Limpieza.

Las especificaciones de la obra, generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales extraños que adulteran el agregado, generalmente estos materiales extraños los constituyen: vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etc. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregados 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).

El ensayo “Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos por el Uso del Ensayo del Equivalente de Arena” (AASHTO T 176), es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción (proporción) de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

2.6.5 Capacidad de absorción.

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto, es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara 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 mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. Los agregados altamente porosos y absorbentes, no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables para su utilización en mezclas asfálticas, a pesar de su alta capacidad de absorción.

Algunos ejemplos de dichos materiales son: la escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos. Estos materiales son altamente porosos, pero también son livianos en peso y poseen alta resistencia al desgaste.

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.

También estos valores pueden ser un indicativo de la calidad de los materiales pétreos, así por ejemplo; absorciones altas indicaran agregados con alto contenido de poros permeables, lo que los vuelve de mala calidad para su uso en mezclas asfálticas.



Figura 2.2 Escoria de alto horno

2.6.6 Dureza.

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento.

Los agregados que están en, o cerca de la superficie, deben ser más duros, es decir deben tener más resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

El ensayo de Resistencia al Desgaste de Agregado Grueso de Tamaño Pequeño por Impacto y Abrasión en la Máquina de Los Ángeles (AASHTO T 96), es la medida más común de la dureza en los agregados.

Este ensayo nos permite tener una idea, de la forma en que se comportaran los agregados, bajo los efectos de la abrasión causados por el tráfico, además nos proporciona una idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.

Los agregados intemperizados, tendrán valores de desgaste elevados, por lo que su uso será limitado o nulo dentro de un proyecto de pavimentación. Por lo tanto, este valor, es muy utilizado como un indicador de la relativa calidad de los agregados a utilizarse en pavimentación.

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

También los ensayos para determinación de gravedades específicas están relacionados con la dureza, pues usualmente se acepta que; agregados con gravedades específicas bajas (< 2.000) no son apropiados para mezclas de superficie, ya que pueden catalogarse como agregados livianos, propensos a excesiva pulimentación a causa de las cargas vehiculares.

También la gravedad específica está relacionada con la porosidad del agregado y por lo tanto a su capacidad de absorción, por eso estos valores pueden ser un indicativo de la calidad de los materiales pétreos; así por ejemplo, absorciones altas indicaran agregados con alto contenido de poros permeables, lo que los vuelve de mala calidad para mezclas de superficie.

2.6.7 Afinidad con el asfalto.

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto, los agregados que tienen alta afinidad con el asfalto son conocidos como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto; por consiguiente tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silíceos como: la cuarcita y algunos granitos, son algunos ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con mucha precaución.

Figura 2.3 Agregados Susceptibles al desprendimiento.



a) Cuarcita



b) Granito

No es muy claro por qué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto sin compactar, es sumergida en agua, y las partículas cubiertas son observadas visualmente.

En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua, posteriormente ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo a la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

2.6.8 Forma de la partícula.

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla 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.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas.

El mejor entrelazamiento ocurre con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas casi siempre, por procesos de trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas, las partículas gruesas (grandes) de agregado, proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado, suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y generalmente provienen de arenas naturales.

La prueba de laboratorio más utilizada para medir la forma de las partículas es conocida como cubicidad de las partículas. Este método comprende el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), rodadas y lajeadas de la fracción retenida en la malla N° 4 (4.75 mm) de una muestra de agregados pétreos.

Valores altos de chancado indicaran que el agregado se compone de partículas con el potencial de proporcionar una superficie con adecuada rugosidad. Los

valores que componen a la cubicidad, toman mayor significado en el diseño de las mezclas para superficie de pavimentos, ya que estos valores serán determinantes para obtener el porcentaje óptimo de aglutinante y la rugosidad de la superficie del pavimento a construir con dichos agregados. Así agregados con bajo porcentaje de partículas chancadas, requerirán de un mayor porcentaje de aglutinante que otros con alto porcentaje de partículas chancadas. Las partículas chancadas contribuyen en gran medida a la estabilidad de la mezcla elaborada con estas mismas.

2.6.9 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.

Una tonelada de agregado de bajo peso específico, tiene un volumen mayor (ocupa un mayor espacio) que una tonelada de agregado con un peso específico más alto. Por consiguiente para poder cubrir todas las partículas de agregado, mas asfalto debe ser adicionado a una tonelada de agregado con

bajo peso específico (mayor volumen) que a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (menos volumen).

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 terminado

La única manera de calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación, es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla de pavimentación y luego, restando de su valor, los pesos específicos del agregado y el asfalto que conformara la mezcla, el resultado es una indicación del volumen de vacíos de aire en la muestra. Todos los agregados son hasta cierto punto porosos.

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.

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.

2.7 ESPECIFICACIONES PARA AGREGADOS EN PAVIMENTOS CON EMULSION ASFALTICA.

2.7.1 Especificaciones técnicas.

Las especificaciones técnicas que abordamos son las utilizadas para establecer los requisitos de calidad de los materiales pétreos que intervienen en la elaboración del esqueleto granular de una carpeta asfáltica, también existen especificaciones para ligantes asfálticos y mezclas.

A nivel Centroamericano, como resultado de los esfuerzos de integración de los países de la región, se crearon las especificaciones conocidas como S.I.E.C.A (Secretaría de Integración Económica Centroamericana) las cuales por convenio pretenden ser obligatorias para todos los países miembros. Dichas especificaciones están clasificadas en:

- ✓ **Generales:** Contienen las actividades aplicadas a obras de mantenimiento en todos los países Centroamericanos.
- ✓ **Particulares:** Modifican las especificaciones generales para ser adecuadas a las condiciones prevalecientes en los contratos específicos de mantenimiento vial, en cada país Centroamericano.

2.7.2 Especificaciones para agregado grueso. (Según SIECA)

Este material consiste en piedra o grava de buena calidad, triturados y mezclados de manera que el producto obtenido cumpla con los siguientes requisitos:

- (1) Abrasión de los Ángeles, (AASHTO-T 96): 40% máx.
- (2) Perdida por disgregabilidad (sanidad) en sulfato de sodio (ácidos),
AASHTO T 104: 12% máx.
- (3) Caras fracturadas, FLH T 50T: 75% min
- (4) Índice de durabilidad (grueso), AASHTO T 210: 35% min

No deben usarse agregados con caras pulidas o que tengan carbonato soluble.

2.7.3 Especificaciones para agregado fino.

El agregado fino deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena, de acuerdo con la especificación AASHTO M 29, incluyendo la pérdida en sulfato.

Debe llenar además, los requisitos siguientes:

- | | |
|---|---------|
| (1) Índice de durabilidad (fino), AASHTO T 210: | 35% min |
| (2) Equivalente de arena, AASHTO T 176: | 35% min |

El llenante mineral podrá proceder de la trituración de los agregados o aportarse como producto comercial o especialmente preparado para este fin.

La proporción de llenante mineral de aporte se fijara en las especificaciones particulares de cada proyecto.

La especificación granulométrica se tomará del método de diseño SUPERPAVE.

2.8 METODO SUPERPAVE.

2.8.1 Generalidades del método SUPERPAVE.

Cuando una mezcla asfáltica es usada como carpeta en un pavimento asfáltico, está sujeta a múltiples acciones que terminan con la vida útil de la misma. Estas acciones son entre otras el tráfico y el clima. Los daños producidos en las carpetas asfálticas son conocidos como deformaciones permanentes, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico. Todos estos daños están asociados en mayor escala a las características finales de la mezcla asfáltica cuando forma parte del pavimento y a las características constitutivas de la misma.

El elevado número de aplicaciones de cargas o la poca resistencia de la mezcla a resistir los esfuerzos cortantes inducidos al pavimento, puede dar origen a deformaciones permanentes. Para controlar este tipo de deformaciones son recomendadas características granulométricas apropiadas y asfaltos que actúen adecuadamente ante las temperaturas a las que está expuesto un pavimento.

El agrietamiento por fatiga es causado en un pavimento por factores que ocurren simultáneamente, se pueden destacar: cargas pesadas repetidas, pobres características de drenaje del pavimento, alta deflexión del pavimento y mezclas asfálticas muy rígidas entre otros. Adicionalmente, es influenciado por deficiencias en los métodos de diseño del pavimento y métodos inadecuados de construcción.

El agrietamiento térmico es observado regularmente en zonas donde el clima genera temperaturas muy bajas. Este puede deberse a la utilización de ligantes asfálticos muy duros, los cuales son propensos a la contracción de la carpeta asfáltica, en tiempos fríos. Como consecuencia que las moléculas del asfalto se encuentran sostenidas por débiles estructuras moleculares, pueden ser destruidas por calentamiento o por esfuerzos cortantes; esto proporciona al asfalto, sus características visco elásticas.

El comportamiento reológico del asfalto depende de la temperatura del asfalto y de la duración de la carga. A altas temperaturas y/o cargas lentas, el asfalto se comporta como un líquido viscoso, cuya viscosidad varia con las condiciones específicas de carga y temperatura. A bajas temperaturas y/o cargas rápidas, el asfalto se comporta como un sólido elástico, cuya rigidez depende de las condiciones específicas de temperatura y carga.

A temperaturas intermedias el asfalto se comporta como un material visco elástico. Este comportamiento se caracteriza por una respuesta combinada ante carga, con una componente viscosa y una componente elástica.

2.8.2 Niveles de diseño SUPERPAVE.

Con un presupuesto que alcanzó los 150 millones de dólares (fondos provenientes de Estados Unidos, Canadá, México y algunos países de Europa), se desarrolló entre Octubre de 1987 y Marzo de 1993 el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, más conocido por sus siglas en ingles SHRP

(Strategic Highway Research Program). El resultado final de estas investigaciones es un nuevo sistema para la especificación de materiales asfálticos: el método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements).

El sistema SUPERPAVE entrega:

- ✓ Nuevas especificaciones para asfaltos.
- ✓ Nuevas especificaciones para agregados.
- ✓ Nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas.
- ✓ Nuevos modelos de predicción del comportamiento.

Enfocado en producir una mezcla que se comporte adecuadamente, el primer paso del análisis SUPERPAVE involucra la selección cuidadosa de los materiales y el proporcionamiento volumétrico de los mismos.

Los niveles superiores de análisis requieren la utilización de sofisticados ensayos; estos niveles apuntan a determinar con precisión el comportamiento futuro de la estructura del pavimento ante variables como el clima y el tráfico.

El método SUPERPAVE está compuesto por tres niveles. Debido a que el análisis y el diseño de una mezcla en el sistema SUPERPAVE son complejos, la extensión del uso de esta metodología (según los investigadores del SHRP) depende del nivel de tránsito y de la función de la mezcla en el pavimento. La **Tabla 2.1**, especifica los distintos niveles considerados para el análisis y diseño de las mezclas asfálticas en caliente mediante la metodología SUPERPAVE.

Tabla 2.1 Niveles de análisis método SUPERPAVE.

Tránsito, ESALs	Niveles de diseño	Requerimientos de ensayo¹
ESALs $\leq 10^6$	1	Diseño volumétrico.
$10^6 < \text{ESALs} \leq 10^7$	2	Diseño volumétrico + ensayos de predicción de La performance.
ESALs $> 10^7$	3	Diseño volumétrico + aumento de los ensayos de Predicción de la performance.
¹ En todos los casos, la susceptibilidad a la humedad debe ser evaluada usando la norma AASHTO T283		

2.8.2.1 Nivel 1.

Este nivel requiere el diseño volumétrico, el cual involucra los siguientes aspectos:

- ✓ Selección del tipo de asfalto.
- ✓ Selección de las propiedades de los agregados.
- ✓ Preparación de especímenes de ensayo.
- ✓ Selección del contenido de asfalto.

Esta actividad se basa en la estimación de las propiedades volumétricas de la mezcla; contenido de vacíos de la mezcla (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

2.8.2.2 Nivel 2.

Este nivel utiliza como punto inicial el análisis volumétrico del nivel anterior. Los ensayos establecidos para el nivel intermedio de análisis son:

- ✓ Ensayo de corte (SST, SUPERPAVE Shear Test).
- ✓ Ensayo de tensión indirecta (IDT, Indirect Tensile Test).

Utilizando equipos IDT y SST, son realizados varios ensayos para lograr de esta manera una serie de predicciones del comportamiento de la mezcla.

2.8.2.3 Nivel 3.

Este nivel, incluye la totalidad de los pasos realizados en los niveles anteriores, pero se realizan pruebas adicionales IDT y SST, a una amplia gama de temperaturas. Un completo análisis de la mezcla utiliza especímenes confinados SST y ofrece un mayor y más confiable nivel de predicción del comportamiento de la misma.

Utilizando la metodología SUPERPAVE, los resultados de los ensayos de comportamiento de las mezclas asfálticas, permiten estimar con gran precisión, el comportamiento del pavimento durante el transcurso de su vida útil, en términos de ejes equivalentes (ESALs). De la misma manera, permite estimar la cantidad de ejes equivalentes para alcanzar cierto nivel de resistencia al desplazamiento, a grietas por fatiga o a grietas por bajas temperaturas.

2.8.3 Agregados minerales SUPERPAVE.

Durante el desarrollo del SHRP, expertos en pavimentos fueron consultados con el fin de determinar cuáles eran las propiedades más importantes del agregado. Hubo un acuerdo general con respecto a que las propiedades del agregado juegan un rol central en la deformación permanente.

Fisuras por fatiga y por baja temperatura eran menos afectadas por las características del agregado. Los investigadores de SHRP confiaron en la experiencia de esos expertos y en la suya propia para identificar dos categorías de propiedades de los agregados que se necesitan en el sistema de SUPERPAVE, si bien no se desarrolló ningún nuevo procedimiento para ensayar agregados, si se refinaron los procedimientos existentes para adaptarlos al sistema, estas propiedades son: las propiedades de consenso y las propiedades de origen. Además se desarrolló una nueva forma de especificación de la granulometría o graduación del agregado; esto se llama estructura del agregado de diseño.

2.8.3.1 Propiedades de Consenso.

Estas propiedades son consideradas críticas para alcanzar un alto comportamiento de la mezcla asfáltica y se asocian a la calidad del agregado para producir una mezcla resistente y durable. Estas propiedades son:

- ✓ Angularidad del agregado grueso.
- ✓ Angularidad del agregado fino.

- ✓ Partículas alargadas y chatas.
- ✓ Contenido de arcilla.

Hay requerimientos estándar para esas propiedades de los agregados. Las normas de consenso varían en función del nivel del tránsito y de la posición de los agregados en la estructura del pavimento. Los materiales ubicados cerca de la superficie del pavimento sujetos a altos niveles de tránsito demandan normas de consenso más rigurosas.

Elas se aplican a una mezcla de agregados propuesta antes que a los componentes individuales, no obstante, muchas agencias corrientemente aplican estos requerimientos a agregados individuales con el objeto de identificar así un componente indeseable. A continuación se define cada una de las propiedades y se presentan los requerimientos establecidos por el sistema SUPERPAVE.

2.8.3.1.1 Angularidad del agregado grueso.

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado y resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4.75 mm con una o más caras fracturadas.

Muchos Departamentos de Transporte de los E.E.U.U tienen protocolos para medir la angularidad del agregado grueso, usualmente deben contarse las partículas manualmente para determinar las caras fracturadas.

Una cara fracturada se define como alguna superficie fracturada que ocupa más del 25% del área del contorno de la partícula del agregado visible en esa orientación. La **Tabla 2.2**. Muestra los valores mínimos requeridos para la angularidad del agregado grueso en función del nivel de tránsito y la posición en el pavimento.

Tabla 2.2 Requerimientos de SUPERPAVE para la angularidad del agregado grueso.

Tránsito en 10⁶ ESALs	Prof. desde la sup. < 100mm	Prof. desde la sup. > 100mm
<0.3	55/-	-/-
<1	65/-	-/-
<3	75/-	50/-
<10	85/80	60/-
<30	95/90	80/75
<100	100/100	95/90
≥100	100/100	100/100

"85/80". 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y 80% tiene dos caras fracturadas.

2.8.3.1.2 Angularidad del agregado fino.

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado fino y provee resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados menores de 2.36 mm, levemente compactados. Contenidos de vacíos mayores, significan más caras fracturadas.

Tabla 2.3 Requerimientos de SUPERPAVE para la angularidad del agregado fino.

Tránsito en 10⁶ ESALs	Prof. desde la sup. < 100mm	Prof. desde la sup. > 100mm
<0.3	-	-
<1	40	-
<3	40	40
<10	45	40
<30	45	40
<100	45	45
≥100	45	45

Los valores son los porcentajes de vacíos para los agregados finos levemente compactados.

2.8.3.1.3 Partículas alargadas y planas.

El concepto es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máximas y mínima es mayor que 5. Las partículas alargadas

son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento es la norma ASTM D 4791 " Partículas alargadas y chatas en agregados gruesos" y se aplica a agregados gruesos mayores de 4.75 mm.

Tabla 2.4 Requerimientos de SUPERPAVE para las partículas planas y alargadas.

Tránsito en 10⁶ ESALs	Porcentaje
<0.3	-
<1	-
<3	10
<10	10
<30	10
<100	10
≥100	10

Los valores son los máximos % en peso, de partículas chatas y alargadas.

2.8.3.1.4 Contenido de arcilla.

El contenido de arcilla, es el porcentaje de material arcilloso presente en la fracción de agregado menor de 4.75 mm (norma AASHTO T 176 "Finos plásticos en agregados graduados y suelos usando el ensayo del equivalente de arena".

Tabla 2.5 Requerimientos de SUPERPAVE para el contenido de arcilla.

Tránsito en 10⁶ ESALs	Equivalente de arena mínimo
<0.3	40
<1	40
<3	40
<10	45
<30	45
<100	50
≥100	50

2.8.4 Propiedades de la fuente de origen.

Además de las propiedades de consenso, los expertos viales pensaron que habría otras características críticas del agregado. No obstante, no pudieron acordar valores críticos para esas propiedades, pues dichos valores son específicos de cada fuente de origen. Consecuentemente, un grupo de "Propiedades de fuente de origen" fue recomendado. Valores específicos son establecidos por las agencias locales, aun cuando esas propiedades son relevantes durante el proceso de diseño de la mezcla, podrían también ser usadas como un control de aceptación de la fuente de origen. Estas propiedades son:

- ✓ Tenacidad
- ✓ Durabilidad
- ✓ Materiales deletéreos.

2.8.4.1 Tenacidad.

La tenacidad es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de abrasión Los Ángeles. La norma es AASHTO T 96 "Resistencia a la abrasión del agregado grueso de pequeño tamaño mediante el uso de la maquina Los Ángeles". Este ensayo estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manipuleo, construcción y servicio. Los valores de pérdida máximos están aproximadamente entre 35 y 45%.

2.8.4.2 Durabilidad.

Es el porcentaje de pérdida del material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio o sulfato de magnesio. La norma es la AASHTO T 104 " Ensayo de sanidad de agregados por sulfato de sodio". El ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por la acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento. Los valores máximos de pérdida son aproximadamente de 10 a 20% para cinco ciclos.

2.8.4.3 Materiales deletéreos.

Los materiales deletéreos son definidos como el porcentaje en peso de contaminantes como esquistos, madera, mica y carbón mezclados con los agregados. La norma es la AASHTO T 112, y puede aplicarse tanto a

agregados finos como a gruesos. El ensayo se realiza tamizando el agregado por vía húmeda sobre tamices prescritos. El porcentaje en peso del material perdido como resultado del tamizado húmedo, se informa como el porcentaje de la masa de arcilla y partículas friables.

Hay evidentemente un amplio rango de máximos porcentajes permisibles de arcilla y partículas friables, dependiendo de la composición exacta del contaminante, el rango va de valores tan pequeños como 0.2% a tan altos como 10%.

2.8.5 Análisis de la granulometría SUPERPAVE.

A continuación se discutirán los diferentes criterios establecidos por el método SUPERPAVE para la evaluación de una granulometría para mezclas asfálticas en caliente. La aparición de nuevos criterios para la evaluación de la graduación de agregados es debido al surgimiento de la metodología de diseño SUPERPAVE, la cual forma parte del programa estratégico de investigación en carreteras (Strategic Highway Research Program, SHRP), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de las carreteras.

Para nuestro diseño utilizaremos una granulometría con tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ".

2.8.5.1 Gráfica elevada al exponente 0.45

Para especificar la granulometría, SUPERPAVE ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall, tomando en consideración recomendaciones de la FHWA.

Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la granulometría permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan en escala aritmética, las abscisas representan las aberturas de los tamices en mm elevadas a la potencia 0.45.

2.8.5.2 Origen de la gráfica de Fuller.

La curva de distribución granulométrica de un material grueso, no uniforme, o gráfica de Fuller tiene su origen en la ecuación de Fuller, la cual representa condiciones de máxima densidad y mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA), la ecuación de Fuller se describe a continuación:

$$p_i = \left(\frac{D_i}{D_{max}} \right)^n$$

Donde:

P_i = acumulado que pasa, en decimal, para el diámetro de la partícula D_i

D_i = diámetro de la partícula

D_{max} = tamaño máximo de material

n = valor asociado a la forma de la curva

Con la expresión de Fuller, la graduación de agregados para una mezcla asfáltica se puede expresar por un par de números, esto es, un coeficiente de forma (n) y el tamaño máximo (Dmax). La literatura sugiere que cuando el factor de forma tiene un valor de 0.45 la mezcla es capaz de alcanzar las máximas densidades cuando se compacta. Lo que hay que resaltar aquí es que solo las curvas con n igual o cercana a 0.45 producen la máxima densificación; aunque esto se ha desvirtuado en la actualidad.

La **Figura 2.4.** Muestra la representación con el diámetro elevado a la potencia de 0.45 que fue introducida en los años 60's por la FHWA (Federal Highway Association) de Estados Unidos. Esta representación permite visualizar la línea de máxima densificación y evitar que la curva de graduación de diseño caiga encima de ella. En general, la curva de máxima densificación es temida porque produciría inaceptablemente bajos valores de vacíos en el agregado mineral VMA.

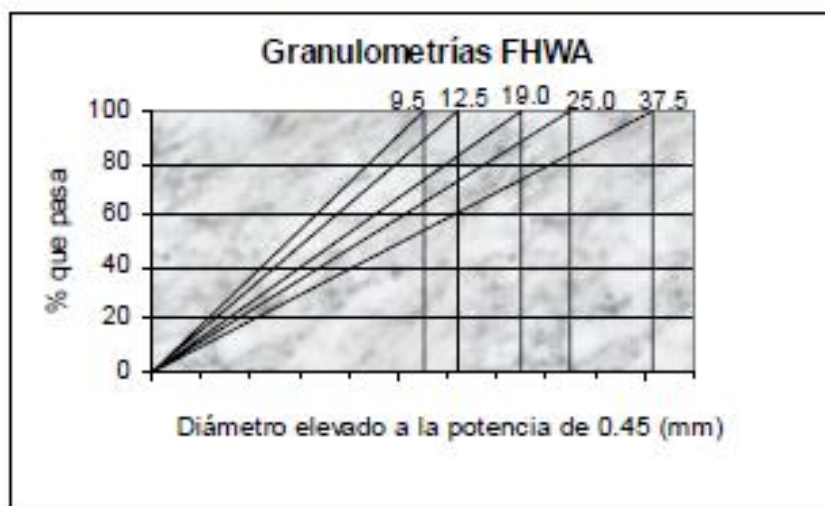


Figura 2.4. Representación de granulometrías según la FHWA

Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; la cual corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0%, 0 mm).

2.8.5.3 Importancia de la gráfica de Fuller.

La importancia de usar la gráfica de Fuller, es que permite expresar la graduación de agregados en una mezcla asfáltica con dos números (n_i/D_i). el primer número está referido a la forma de la curva y a la estructura y arreglo geométrico de la potencial masa compactada, mientras el otro se refiere al tamaño máximo del agregado. Esto facilita la expresión y manejo de la graduación, de las especificaciones granulométricas y hasta la definición de la buena graduación y el potencial de densificación de la mezcla.

El ajuste de Fuller también puede servir para controlar la variabilidad de la producción diaria de la mezcla en planta. Este método para evaluar la variabilidad de una granulometría aventaja al método tradicional de tolerancias de mallas individuales, pues aquel considera a la graduación de manera integral; las tolerancias individuales introducen de por sí un sesgo muy significativo que afecta principalmente al contratista.

Una combinación de agregados es un todo, de esto pueden dar fe los manejadores de plantas trituradoras y cribadoras que cuando intentan modificar el porcentaje que pasa de un tamaño, los otros se alteran irremediablemente.

Se observa que hay una influencia igualitaria de D_{max} y n en la trabajabilidad. En el ámbito de las graduaciones de SUPERPAVE, la facilidad de manejo y colocación aumenta a medida que las mezclas tienen a la vez tamaños máximos más pequeños y estructuras más densas. Una mezcla densa y otra abierta tienen significativamente diferentes trabajabilidades para un mismo tamaño máximo.

2.8.6 Granulometría SUPERPAVE.

Para especificar la granulometría, SUPERPAVE ha modificado un enfoque ya en uso en algunas agencias. Utiliza el exponencial 0.45 en la carta granulométrica para definir una granulometría permitida. Esta carta usa una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan, las abscisas en escala aritmética representan las aberturas de los tamices en mm elevadas a la potencia 0.45.

La **Figura 2.5**, muestra como es la escala de las abscisas; en este ejemplo el tamiz de 4.75 mm es dibujado a 2.02 unidades a la derecha del origen de coordenadas ($4.75^{0.45} = 2.02$).

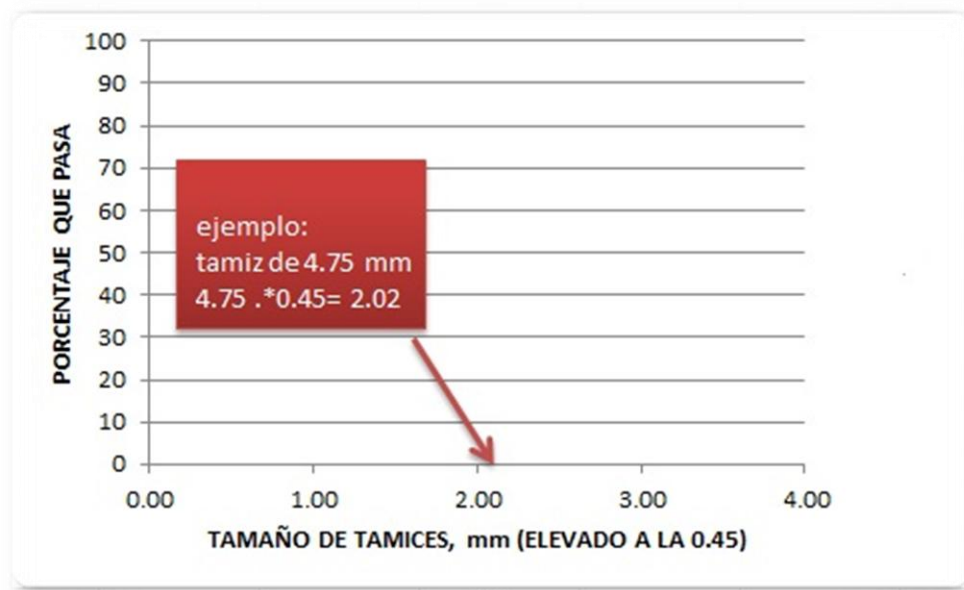


Figura 2.5 Base grafica para la carta con exponente 0.45

Normalmente esta carta no está marcada con la potencia 0.45 de la abertura de los tamices, en su lugar la escala está marcada con la abertura real del tamiz, tal como se muestra en la figura.

Un rasgo importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad. Esta granulometría corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo del agregado y ordenada 100% hasta el origen (0%, 0 mm).

SUPERPAVE emplea la serie estándar de tamices de ASTM y las siguientes definiciones con respecto al tamaño del agregado.

- ✓ Tamaño máximo nominal: Tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz que retiene más del 10%.

- ✓ Tamaño máximo: Tamaño de tamiz mayor que el tamaño máximo nominal.

La granulometría de máxima densidad (**Figura 2.6**) representa la graduación para la cual las partículas del agregado se acomodan entre si conformando el arreglo volumétrico más compacto posible.

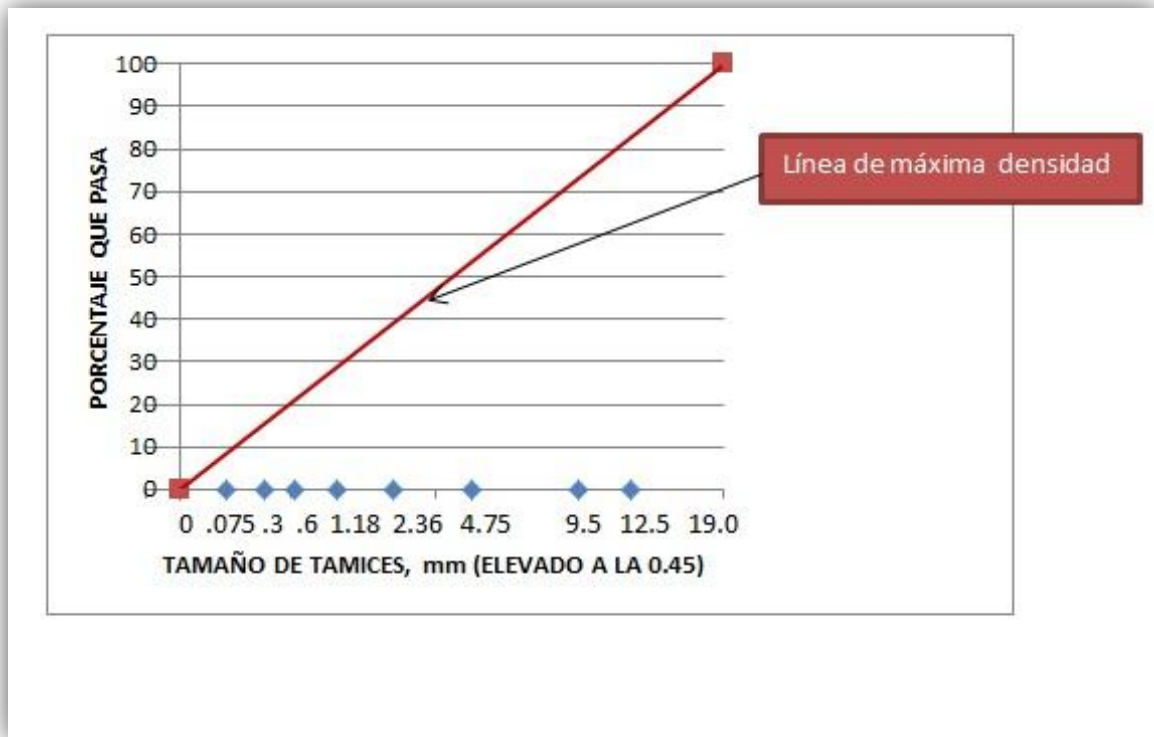


Figura 2.6 Granulometría de densidad máxima para un tamaño máximo del agregado de 19 mm.

Evidentemente, esta granulometría debe evitarse, porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de un film de asfalto lo suficientemente grueso como para obtener una mezcla durable. La **Figura 2.6** muestra la carta granulométrica elevada a la 0.45 con la graduación de máxima densidad para un tamaño máximo del agregado de 19 mm y 12.5 mm de tamaño máximo nominal.

Para especificar la granulometría del agregado, dos conceptos adicionales se emplean: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. Corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de polvo (0.075 mm).

La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda que debe ser esquivada por la curva granulométrica. Granulometrías que invaden la zona restringida han sido llamadas con frecuencia "humped graduations" (graduaciones con joroba), por la forma característica de joroba que tiene la curva que pasa por aquella zona.

En la mayoría de los casos, las curvas de graduación con joroba indican una mezcla con mucha arena fina en relación al total de arena. Esta granulometría prácticamente siempre resulta en un comportamiento débil de la mezcla, que se manifiesta en la difícil compactación durante la etapa constructiva y en una reducida resistencia a la deformación permanente durante la vida en servicio. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende en demasía del stiffness del ligante asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte. Esas mezclas son también sensibles al contenido de asfalto y pueden fácilmente volverse plásticas.

El término usado para describir la frecuencia de distribución acumulada del tamaño de las partículas del agregado es el de estructura del agregado de diseño. Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de

control y evite la zona de restricción, satisface los requerimientos granulométricos de SUPERPAVE.

SUPERPAVE define cinco mezclas tipos en base al tamaño máximo nominal.

Tabla 2.6 Denominación de las mezclas de SUPERPAVE.

Denominación para SUPERPAVE	Tamaño máximo nominal, mm	Tamaño máximo, mm
37.5 mm	37.5	50
25 mm	25	37.5
19 mm	19	25
12.5 mm	12.5	19
9.5 mm	9.5	12.5

La **Figura 2.7** ilustra los puntos de control y la zona restringida para la mezcla SUPERPAVE de 12.5 mm.

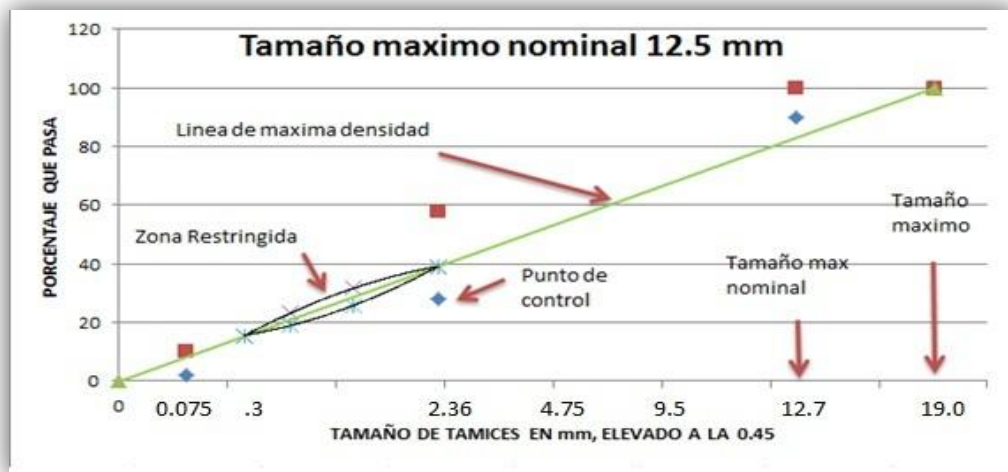


Figura 2.7 Límites granulométricos de SUPERPAVE, para una mezcla de 12.5 mm

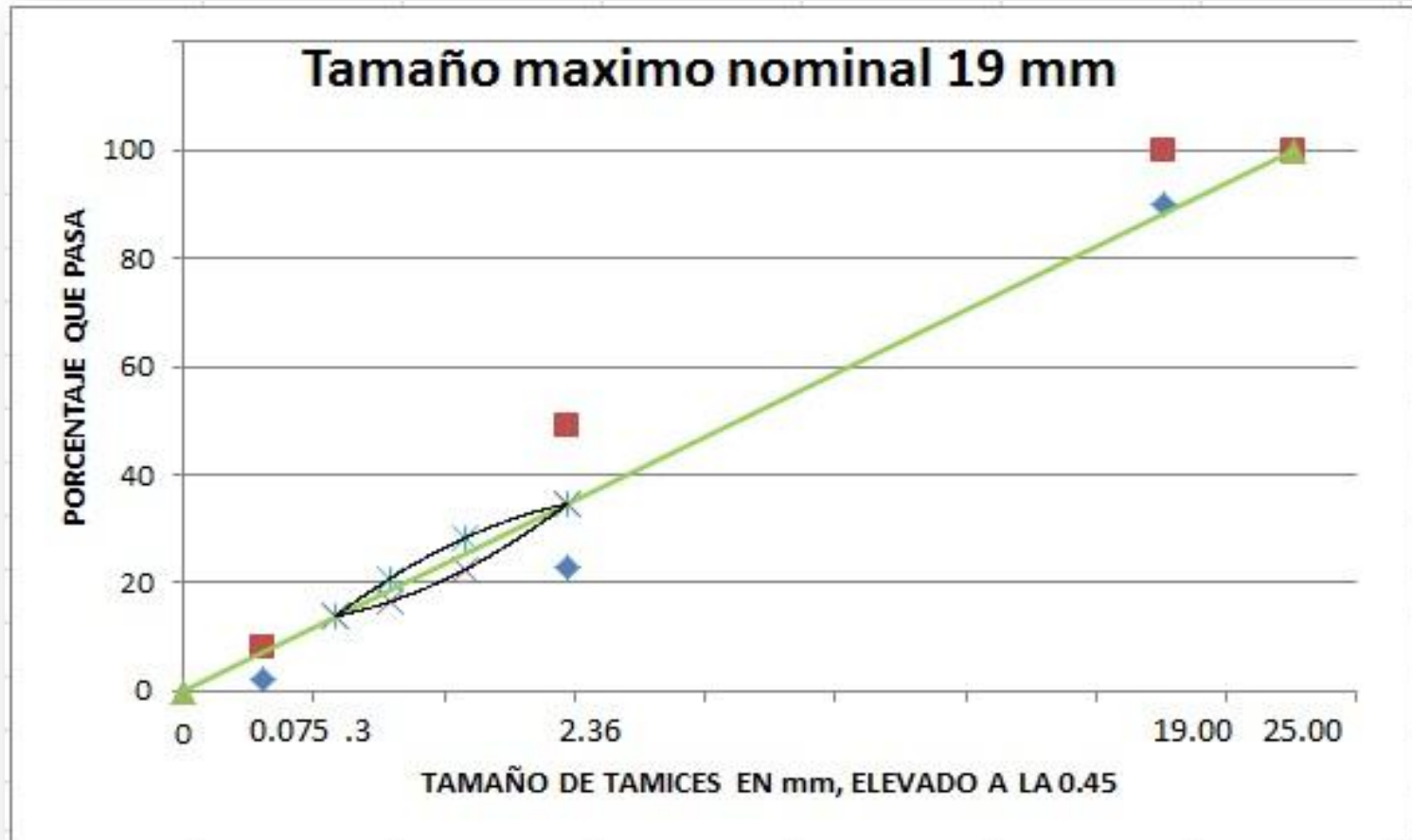
SUPERPAVE recomienda, sin exigirlo, mezclas que estén graduadas por debajo de la zona restringida; también recomienda que, si el nivel de tránsito de proyecto aumenta, la granulometría se acerque más a los puntos de control de tamaño grueso. Además, los requerimientos de control de SUPERPAVE de la granulometría no fueron hechos para ser aplicados a tipos de mezcla especiales tales como las "stone matrix asphalt" o las mezclas abiertas.

A continuación se presentan los requerimientos de SUPERPAVE para la granulometría de los cinco tipos de mezcla asfáltica que define.

Tabla 2.7 Tamaño máximo nominal 19 mm (3/4")

Tamiz, mm	Puntos de control		Zona restringida	
			mínimo	máximo
25.000		100		
19.000	90	100		
12.500				
9.500				
4.750				
2.360	23	49	34.6	34.6
1.180			22.3	28.3
0.600			16.7	20.7
0.300			13.7	13.7
0.150				
0.075	2	8		

Figura 2.8 Carta granulométrica para un tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4")



2.8.7 Mecanismos de control de la granulometría.

Históricamente las especificaciones de las granulometrías han consistido en bandas maestras (límite superior e inferior) en los cuales se especifica el máximo y mínimo porcentaje que pasa para cada malla. Tales especificaciones tienen una característica indeseable inherente. Las mezclas pueden estar diseñadas dentro de las especificaciones y sin embargo tener un desempeño pobre en servicio. Específicamente, estas mezclas tienen una estructura de agregado pobre y son susceptibles a la deformación permanente. De igual forma las mezclas pueden ser diseñadas demasiado densas, lo que reduce el contenido de asfalto y conduce a problemas de durabilidad.

Para especificar la granulometría del agregado, como ya se menciono anteriormente, se emplearon dos conceptos: los puntos de control y la zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

Los puntos de control fueron seleccionados para cumplir objetivos específicos, los cuatro puntos de control superiores, mínimo 100% que pasa la malla de tamaño máximo, 90 a 100% pasando la malla del tamaño máximo nominal y 90% máximo que pasa la malla menor inmediata que la del tamaño máximo nominal, se utilizan para verificar que se cumpla con la definición de tamaño máximo nominal y tamaño máximo.

Los cuatro puntos de control inferiores sirven para propósitos diferentes. Los requerimientos máximos y mínimos para la malla No. 200 (75 μm), son típicamente para mezclas asfálticas de granulometría cerrada. Otras mezclas como las SMA, las cuales tienen porcentajes que pasan la malla No 200 de 10 a 14% no cumplen con esta especificación.

Los puntos de control para la malla No 8 (2.36 mm), son utilizados para controlar partículas con tamaño de arena en la mezcla. El punto superior limita la cantidad de arena en la mezcla con el fin de evitar mezclas asfálticas arenosas las cuales generalmente no cumplen con las especificaciones. El punto inferior asegura una cantidad de arena adecuada en la mezcla para cumplir con los requerimientos de una granulometría densa. Una granulometría con granulometría abierta (open graded) o mezcla porosa no cumplirá con estos puntos de control.

La zona restringida ha sido especificada para asegurarse que se desarrolla una adecuada estructura en la mezcla. La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. Y forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Se especifica que las granulometrías deben pasar ya sea abajo o arriba de la zona. Mezclas que pasan por arriba tenderán a ser arenosas y a tener estructuras de agregado débiles en comparación con las que pasan debajo de la zona restringida. Por otro lado, granulometrías que pasan a través de la zona de restricción (desde abajo), se llaman graduaciones con joroba, por la forma característica de joroba que se

forma en la curva al pasar por dicha zona. En la mayoría de los casos, estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de arena. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una buena resistencia al corte.

2.8.8 La zona restringida.

Después de algunos años de estar utilizando las especificaciones de SUPERPAVE referente a la graduación de los agregados, investigadores de la Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP-Cooperativa Nacional de Investigación en Carreteras) desarrollaron una investigación bajo el título NCHRP Report 464 The Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification, para revisar las recomendaciones originales del método de diseño SUPERPAVE para HMA. Se revisaron las graduaciones de agregados y su influencia en las HMA. Finalmente encontraron que las recomendaciones originales se establecieron por consenso sin una base experimental, el criterio de revisión incluyó la zona de restricción por la cual recomendaron no pasar graduaciones de agregados.

La literatura en la cual estos investigadores basaron la revisión de las recomendaciones de la zona de restricción fue el Reporte SHRP-A-408 de la SHRP, nivel uno del diseño de mezclas; selección de materiales, compactación y acondicionamiento, de donde surge la idea de la zona de restricción.

Las preguntas principales en su revisión fueron:

¿Cuáles eran las bases de la zona de restricción?

¿Qué conclusiones y recomendaciones habían acerca de las graduaciones que violaban la zona de restricción?

¿Cuáles eran las posibles variables que deberían ser estudiadas para evaluar las graduaciones que pasan a través de la zona de restricción?

El reporte SHRP-A-408 de la SHRP, resume el desarrollo de los aspectos de diseño volumétrico de SUPERPAVE bajo el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP). Bajo este programa se reunió a un grupo de expertos en el área de producción de agregados y diseño y comportamiento de mezclas asfálticas en caliente, con la finalidad de presentar ante ellos una serie de cuestionamientos consistentes básicamente en siete características del agregado:

- ✓ Límites de graduación.
- ✓ Caras fracturadas.
- ✓ Contenido de arenas naturales.
- ✓ Abrasión de Los Ángeles.
- ✓ Agregados redondeados.
- ✓ Materiales deletéreos.
- ✓ Equivalente de arena.

La respuesta para determinar que características deberían modificarse de esta serie fue basada únicamente en acuerdos y desacuerdos acerca de las modificaciones, sin una base científica.

Una vez acordadas las características a modificar, establecieron limitaciones en los límites de graduación. De esta manera se agregaron características adicionales como mínimo/máximo tamaños de agregados, puntos de control/zona restringida y puntos de control.

La mayoría de los expertos especificaron graduaciones arriba y debajo de la zona restringida, aunque la mitad de ellos recomendaron graduaciones debajo de la zona de restricción para altas condiciones de tráfico.

Como ya se dijo con anterioridad, la zona de restricción forma una banda a través de la cual fue recomendado no pasar graduaciones de agregados. La zona de restricción fue adoptada para reducir la incidencia de tender o estar propensa a roderas en las HMA. Aunque la zona restringida fue incluida por SUPERPAVE como una guía recomendada, no como una especificación requerida, algunas agencias en EU la interpretaron como un requerimiento.

Según esto, la intención original de incluir una zona de restricción debido a que algunas graduaciones particularmente se ven afectadas por: el uso de arenas naturales redondeadas o con distribución de tamaños limitada; y la proporción admisible de la fracción fina (0.15 a 0.6 mm) del total de la arena (que pasa por 2.36 mm), fue la de ayudar a reducir la incidencia de tender o ser propenso a roderas en las HMA.

Volviendo al proyecto Report 464 The Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification, de acuerdo con algunos expertos en EU, cumplir con el criterio de la zona de restricción, quizás no es deseable o necesario para producir mezclas que den buen comportamiento en términos de roderas. Algunas agencias de carreteras de EU, pueden proveer ejemplos de graduaciones de agregados que pasan a través de la zona de restricción, sin embargo estas producen mezclas que presentan buen comportamiento. Por ejemplo si se tiene una mezcla de agregados con un valor alto de angularidad (por ejemplo valor alto de angularidad de agregado fino FAA), es probable que la mezcla no exhiba ninguna tendencia durante la construcción y sería resistente a las roderas bajo tráfico sin tener en cuenta si la graduación pasa a través de esta zona restringida. Algunos cuestionaron también la necesidad de la zona de restricción cuando las mezclas requieren propiedades volumétricas tales como el VMA y VA especificados para los números de giros N_{inicial} , $N_{\text{diseño}}$, y $N_{\text{máximo}}$ en la compactación giratoria.

Basado en lo que se ha indicado, la investigación de la NCHRP se desarrolló con el objetivo inicial de determinar bajo qué condiciones es necesario cumplir con los requerimientos de la zona de restricción cuando las HMA en SUPERPAVE presentan otros requerimientos tales como FAA y criterios volumétricos para un proyecto específico.

Debido a que la zona de restricción es aplicada dentro de los tamaños de agregados finos, la forma y textura de estos, son los factores más importantes

que afectan el comportamiento de las HMA. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta la variación de los valores de FAA.

Otro factor muy importante en el comportamiento de las HMA, es la mineralogía del tipo de agregado y el tipo de trituración.

En el estudio desarrollado por la NCHRP, se variaron los tipos de agregados, la forma y textura del agregado fino, esto es que usaron diferentes tipos de agregados finos tanto triturados como naturales y por consiguiente los valores de FAA variaron, además de los niveles de tráfico, reflejados en el número de giros en el compactador giratorio.

2.8.9 Ensayos a agregados pétreos.



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA

(AASHTO T 176)

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de recepción: _____
 Proyecto: Trabajo de Graduación Fecha de ensayo: _____
 Procedencia: _____ Laboratorista: Tesis UES
 Material: ARENA

		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Lectura de Arcilla	A	5.1	5.2	5.2
Lectura de Arena	B	3.4	3.5	3.6
Equivalente de Arena	(B / A) x100	66.67	67.31	69.23
Promedio		68		

Observaciones:



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**ENSAYO DE SANIDAD
(AASHTO T 104)**

Proyecto: Trabajo de Graduación **Fecha de muestreo:** _____
Material: _____ **Fecha de ensayo:** _____
Procedencia de la muestra: _____ **Ciclo No.** 1

Tamaño de tamiz		% Retenido parcial	Peso por fracción antes de ensayo (g)	Peso por fracción después de ensayo (g)	% perdida en fracción	% perdida en muestra original
Pasa	Retiene					
2 1/2"	2"					
2"	1 1/2"					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"					
1/2"	3/8"					
3/8"	No. 4					
Totales						

Análisis cualitativo de agregado grueso (mayor de 3/4")

Tamaño de tamiz		No. De partículas	Partículas exhibiendo daños			
			Antes de la prueba	Partidas	Desmenuzadas	Agrietadas
2 1/2"	1 1/2"					
1 1/2"	3/4"					

Agregado Fino

3/8"	No. 4	11.06	221.30	219.80	0.68	0.07
No.4	No.8	15.71	314.20	311.60	0.83	0.13
No.8	No.16	13.16	263.20	261.40	0.68	0.09
No.16	No.30	14.63	292.70	290.40	0.79	0.11
No.30	No.50	8.54	170.80	168.10	1.58	0.13

Total = 0.53

Observaciones: _____



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO DE SANIDAD
(AASHTO T 104)

Proyecto: Trabajo de Graduación **Fecha de muestreo:** _____
Material: _____ **Fecha de ensayo:** _____
Procedencia de la muestra: _____ **Ciclo No.** 2

Tamaño de tamiz		% Retenido parcial	Masa por fracción antes de ensayo (g)	Masa por fracción después de ensayo (g)	% perdida en fracción	% perdida en muestra original
Pasa	Retiene					
2 1/2"	2"					
2"	1 1/2"					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"					
1/2"	3/8"					
3/8"	No. 4					
Totales						

Análisis cualitativo de agregado grueso (mayor de 3/4")						
Tamaño de tamiz		No. De partículas	Partículas exhibiendo daños			
			Antes de la prueba	Partidas	Desmenuzadas	Agrietadas
2 1/2"	1 1/2"					
1 1/2"	3/4"					

Agregado Fino						
3/8"	No. 4	11.06	219.80	218.10	0.77	0.09
No.4	No.8	15.71	311.60	309.50	0.67	0.11
No.8	No.16	13.16	261.40	259.00	0.92	0.12
No.16	No.30	14.63	290.40	287.50	1.00	0.15
No.30	No.50	8.54	168.10	166.00	1.25	0.11
Total =						0.58

Observaciones: _____



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO DE SANIDAD
(AASHTO T 104)

Proyecto: Trabajo de Graduación **Fecha de muestreo:** _____
Material: _____ **Fecha de ensayo:** _____
Procedencia de la muestra: _____ **Ciclo No.** 3

Tamaño de tamiz		% Retenido parcial	Peso por fracción antes de ensayo (g)	Peso por fracción después de ensayo (g)	% perdida en fracción	% perdida en muestra original
Pasa	Retiene					
2 1/2"	2"					
2"	1 1/2"					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"					
1/2"	3/8"					
3/8"	No. 4					
Totales						

Análisis cualitativo de agregado grueso (mayor de 3/4")

Tamaño de tamiz		No. De partículas	Partículas exhibiendo daños			
			Antes de la prueba	Partidas	Desmenuzadas	Agrietadas
2 1/2"	1 1/2"					
1 1/2"	3/4"					

Agregado Fino

3/8"	No. 4	11.06	218.10	215.30	1.28	0.14
No.4	No.8	15.71	309.50	307.90	0.52	0.08
No.8	No.16	13.16	259.00	257.30	0.66	0.09
No.16	No.30	14.63	287.50	286.00	0.52	0.08
No.30	No.50	8.54	166.00	163.50	1.51	0.13

Total = 0.52

Observaciones: _____



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO DE SANIDAD
(AASHTO T 104)

Proyecto: Trabajo de Graduación **Fecha de muestreo:** _____
Material: _____ **Fecha de ensayo:** _____
Procedencia de la muestra: _____ **Ciclo No.** 4

Tamaño de tamiz		% Retenido parcial	Peso por fracción antes de ensayo (g)	Peso por fracción después de ensayo (g)	% perdida en fracción	% perdida en muestra original
Pasa	Retiene					
2 1/2"	2"					
2"	1 1/2"					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"					
1/2"	3/8"					
3/8"	No. 4					
Totales						

Análisis cualitativo de agregado grueso (mayor de 3/4")

Tamaño de tamiz		No. De partículas	Partículas exhibiendo daños			
			Antes de la prueba	Partidas	Desmenuzadas	Agrietadas
2 1/2"	1 1/2"					
1 1/2"	3/4"					

Agregado Fino

3/8"	No. 4	11.06	215.30	210.10	2.42	0.27
No.4	No.8	15.71	307.90	300.20	2.50	0.39
No.8	No.16	13.16	257.30	234.30	8.94	1.18
No.16	No.30	14.63	286.00	275.30	3.74	0.55
No.30	No.50	8.54	163.50	160.80	1.65	0.14

Total = 2.53

Observaciones: _____



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO DE SANIDAD
(AASHTO T 104)

Proyecto: Trabajo de Graduación **Fecha de muestreo:** _____
Material: _____ **Fecha de ensayo:** _____
Procedencia de la muestra: _____ **Ciclo No.** 5

Tamaño de tamiz		% Retenido parcial	Peso por fracción antes de ensayo (g)	Peso por fracción después de ensayo (g)	% perdida en fracción	% perdida en muestra original
Pasa	Retiene					
2 1/2"	2"					
2"	1 1/2"					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"					
1/2"	3/8"					
3/8"	No. 4					
Totales						

Análisis cualitativo de agregado grueso (mayor de 3/4")

Tamaño de tamiz		No. De partículas	Partículas exhibiendo daños			
			Antes de la prueba	Partidas	Desmenuzadas	Agrietadas
2 1/2"	1 1/2"					
1 1/2"	3/4"					

Agregado Fino

3/8"	No. 4	11.06	210.10	200.60	4.52	0.50
No.4	No.8	15.71	300.20	285.90	4.76	0.75
No.8	No.16	13.16	234.30	223.40	4.65	0.61
No.16	No.30	14.63	275.30	265.00	3.74	0.55
No.30	No.50	8.54	160.80	156.10	2.92	0.25

Total = 2.66

Observaciones: _____



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
 'MARIO ANGEL GUZMAN URBINA'



PROYECTO : TRABAJO DE GRADUACION
 MATERIAL: Grava 3/4", Cantera San Diego

ENSAYO DE PARTICULAS PLANAS, PARTICULAS ALARGADAS,
 Y PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS EN AGREGADO GRUESO
 (ASTMD 4791)

INDICE DE
 ALARGAMIENTO

Tamaño del agregado		Peso de la muestra (grs)	Peso de Material Retenido Calbr	% Retenido en Calibrador	% Retenido Gradación Original	% Retenido Calibrador por % Ret. Grad. Original
Pasa	Retiene					
1"	3/4"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	1/2"	100.00	0.00	0.00	0.40	2.50
1/2"	3/8"	100.00	0.00	0.00	36.90	1.90
3/8"	#4	100.00	0.00	0.00	34.20	1.00
Totales		300.00	0.00	0.00	71.50	5.40
Indice de Alargamiento=			Sumatoria(% Ret. Calibrador por % Ret. Grad. Original)			
			Sumatoria (% Ret. Grad. Original)			

INDICE DE
 APLANAMIENTO

Tamaño del agregado		Peso de la muestra (grs)	Peso de Material Retenido Calbr	% Retenido en Calibrador	% Retenido Gradación Original	% Retenido Calibrador por % Ret. Grad. Original
Pasa	Retiene					
1"	3/4"	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00
3/4"	1/2"	200.00	9.30	4.65	32.10	4.65
1/2"	3/8"	200.00	8.30	4.15	19.10	4.15
3/8"	#4	200.00	12.00	6.00	33.50	6.00
Totales		600.00	29.60	14.80	85.10	14.80
Indice de Aplanamiento=			Sumatoria(% Ret. Calibrador por % Ret. Grad. Original)			
			Sumatoria (% Ret. Grad. Original)			

ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS, NORMA ASTM D 5821
 PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS

Tamaño del agregado		Peso de la muestra (grs)	Peso de Material Retenido Calbr	% Retenido en Calibrador	% Retenido Gradación Original	% Retenido Calibrador por % Ret. Grad. Original
Pasa	Retiene					
1"	3/4"	300.00	289.00	96.30	0.40	36.26
3/4"	1/2"	300.00	283.10	94.33	32.10	3030.13
1/2"	3/8"	300.00	292.00	97.33	33.50	3257.53
Totales		900.00	864.10	287.96	66.00	6323.92
% de Caras Fracturadas=			Total Promedio de Caras Fracturadas			
			Total Porcentaje Retenido en Gradacion Original			

INDICE DE ALARGAMIENTO= 7.6%
 INDICE DE APLANAMIENTO= 17.4%
 % DE CARAS FRACTURADAS= 96.0%



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y
ABSORCION DE AGREGADO FINO
(AASHTO T 84-91, ASTM C 127- (1993))

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de recepción: _____
Proyecto: Trabajo de graduación Fecha de ensayo: _____
Procedencia: Cantera Laboratorista: _____
Ubicación: _____ Elaboró: _____
Material: Arena

Peso de tara 1-1 _____

Peso de tara 2-2 _____

Muestra No.	1		
Picnómetro No.	1-1		
Peso de muestra SSS g	460.3		
Peso de picnómetro + agua g	750.2		
Peso de picnómetro + agua + muestra g	1030.6		
Peso seco de muestra seca + tara g			
Peso de muestra seca g	445.0		
Gravedad específica	2.474		
Gravedad específica SSS	2.559		
Gravedad específica aparente	2.704		
Absorción %	3.438		
Gravedad específica promedio		2.474	
Promedio de absorción %		3.4	

Observaciones:



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y
ABSORCION DE AGREGADO GRUESO
(AASHTO T 85-91, ASTM C 127- (1993))

Solicitante: Universidad de El Salvador Fecha de recepción: _____
Proyecto: Trabajo de graduación Fecha de ensayo: _____
Procedencia: _____ Laboratorista: _____
Ubicación: _____ Elaboró: _____
Material: Grava 3/4"

Ensayo No	1		
Peso de tara g			
Peso de tara para secado g			
Peso grava SSS + tara g			
Peso de grava SSS g	B	1518.6	
Peso de grava sumergida (w aparente) g	C	935.8	
Peso del agua desplazada (vol. Total) g		582.8	
Gravedad específica Bulk _{SSS}	B/(B-C)	2.606	
Peso seco de grava + tara g			
Peso seco de grava g	A	1489.7	
Peso de agua Kg.			
Peso de agua desplazada por sólidos Kg.			
Gravedad específica aparente	A/(A-C)	2.689	
Gravedad Específica Bulk	A/(B-C)	2.556	
Absorción %	(B-A)/AX100	1.94	
Promedio de Gravedad Específica		2.556	
Promedio de absorción %		1.94	

Observaciones:



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE DESGASTE

(AASHTO T 96-02, ASTM C 131-01))

Solicitante: Universidad de El Salvador Material: Agregado Grueso 3/4"
Proyecto: Tesis UES Laboratorista: Tesis UES
Procedencia: _____ Fecha de recepción: _____
Ubicación: Tesis UES Fecha de ensayo: _____
Encargado: _____

	Tamizado	Lavado
Ensayo No.		
Tipo de graduación	B	
Peso de tara (g)	200	
M -1 Pasa malla 3/4" se retiene en 1/2"	2500	
M -2 Pasa malla 1/2" se retiene en 3/8"	2500	
Peso inicial (g)	5000	
Peso retenido en malla #12 (g)	3856	
Perdida (g)	1144	
% de Desgaste	22.9	

Observaciones:

2.8.10 RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS



Ensayo	Norma	Resultado
Equivalente de Arena	AASHTO T-176	68 %
Ensayo de Sanidad	AASHTO T-104	6.82 % Desgaste total.
Ensayo de partículas planas, partículas alargadas y partículas planas y alargadas en agregado grueso.	ASTM D-4791	Indice de alargamiento: 7.6% Indice de aplanamiento: 17.4 % Porcentaje Caras Fracturadas: 96.0%
Gravedad específica y absorción de agregado fino.	AASHTO T84-91	Gravedad específica promedio: 2.474 Promedio de absorción: 3.4%
Gravedad específica y absorción de agregado grueso.	AASHTO T85-91	Gravedad específica promedio: 2.556 Promedio de absorción: 1.94%
Porcentaje de desgaste para agregado grueso.	AASHTO T96-02	Desgaste: 22.9%

CAPITULO III

EMULSIONES

ASFALTICAS

3. EMULSIONES ASFÁLTICAS

3.1 LAS EMULSIONES

Podemos definir una emulsión como 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, emulsionante o emulgente. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa). Esto puede apreciarse en la siguiente figura 3.1, en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión.

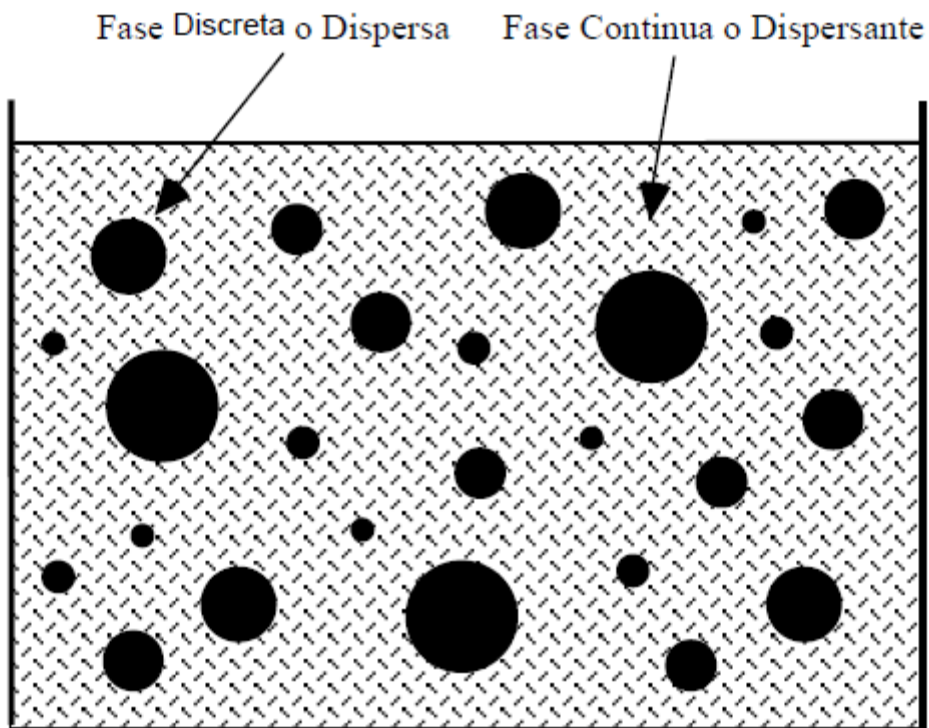


Figura 3.1 Diagrama esquemático de una emulsión

Generalmente el tamaño de la fase discreta tiene alguna dimensión lineal entre 1 nanómetro y 1 micra. Son estos tamaños tan pequeños los que le dan a las emulsiones sus importantes e interesantes propiedades. La ciencia que trata con las emulsiones es multidisciplinaria, ya que involucra física, química, biología, etc.

Lo importante de las emulsiones no es la composición química de la muestra (ya sea orgánica o inorgánica), ni su origen (mineral o biológico), ni su estado físico (una fase o más); es su tamaño la característica importante.

Consecuentemente, podemos decir que a la ciencia de las emulsiones le interesan las moléculas grandes y los sistemas macroscópicos subdivididos muy finamente, ya sea mono- o multi-fásicos.

Las áreas de aplicación de las emulsiones son:

En Física: Nucleación, metalurgia, aleaciones, cerámicas, cementos, polímeros, filtros, aerosoles, espumas, electroforésis, tratamiento de aguas, purificación de agua, recuperación de petróleo, etc.

En Química: Fenómenos de absorción, intercambio iónico, cromatografía GPC, nefelometría, ósmosis, catálisis, detergentes y jabones, pinturas, adhesivos,

tintas, emulsificantes, colorantes, papel, lubricantes, recubrimientos, pigmentos, espesantes, etc.

En Biología: Micro-encapsulación, virus, proteínas, ácidos nucleicos, hematología, alimentos, cosméticos, saborizantes, etc.

Podemos mencionar que existen dos tipos de emulsiones:

- Emulsiones formadas por macromoléculas en solución (sistemas de una fase)
- Emulsiones formadas por materia finamente dividida (sistema de 2 o más fases)

Las emulsiones las podemos dividir en:

- **Liofílicas:** si a la partícula le gusta el solvente
- **Liofóbicas;** si a la partícula no le gusta el solvente.

Si el medio es agua, entonces:

- Liofílico = Hidrofílico y Liofóbico = Hidrofóbico.

Las emulsiones liofílicas son verdaderas soluciones (desde el punto de vista termodinámico), por lo que no es fácil hablar de la superficie de la emulsión. Por el contrario, para emulsiones liofóbicas, debido a la diferencia de fases entre las partículas en la emulsión y el medio donde se encuentran dispersas, no existe

ningún problema para definir la superficie de la emulsión. Por lo tanto, el concepto de superficie sólo es aplicable a sistemas multifásicos.

3.2 LOS EMULSIFICANTES

Los emulsificantes son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300); tienen una parte hidrofóbica (generalmente es una cadena hidrocarbonada ya sea lineal o cíclica) que es soluble en el medio orgánico (en nuestro caso en el asfalto) y una parte hidrofílica (generalmente es un grupo polar de tipo orgánico o inorgánico), soluble en el medio acuoso.

Los emulsificantes están compuestos generalmente por un radical alkilo R el cual es hidrofóbico y un componente hidrofílico, que se encuentran saponificados y con el contacto con el agua se disocian, quedando con cargas negativas o positivas según el tipo de emulsificante. En la siguiente figura se muestra una representación pictórica de la emulsión aniónica y la catiónica.

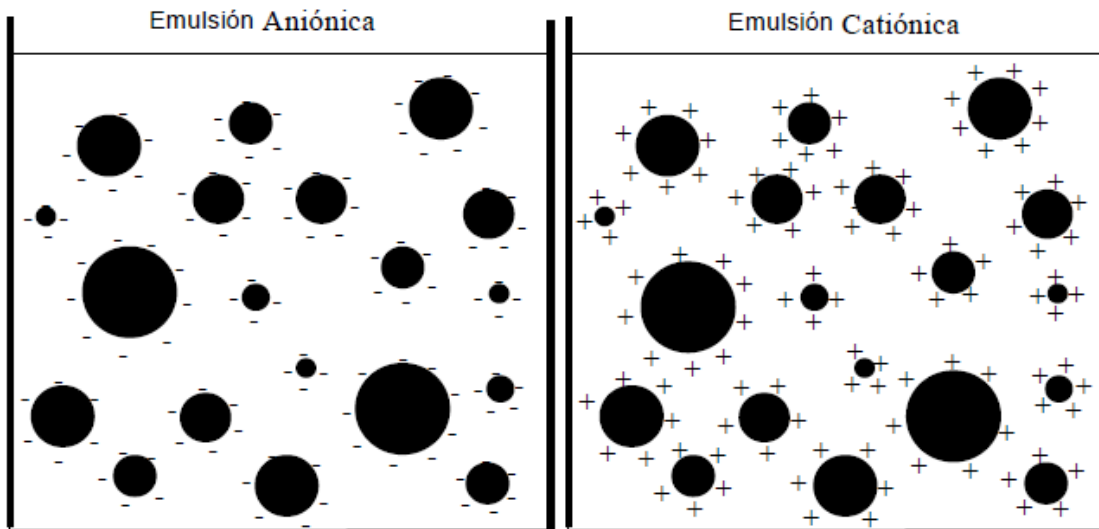


Figura 3.2 Representación esquemática de una emulsión aniónica y de una catiónica

3.3 LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

En el caso de emulsiones asfálticas, los líquidos no miscibles son el agua y el asfalto. Adicionalmente se tiene el emulgente el cual se deposita en la interface entre el agua y el asfalto y estabiliza la emulsión; éste depende del tipo de emulsión que se requiera.

Las emulsiones del tipo asfáltico aparecieron en el mercado a principios del siglo XX en diferentes lugares y con usos muy diversos. A principios de 1900 (en 1905) se empleó por primera vez una emulsión asfáltica en la construcción de carreteras en la ciudad de Nueva York; la emulsión utilizada es del tipo aniónica y se empleó en lugar de los usuales caminos fabricados con material

pétreo, como una alternativa para evitar el polvo cuando transitaban los vehículos.

En 1914 el estado de Indiana comenzó a realizar trabajos de reparación de caminos empleando estas emulsiones aniónicas. En ese mismo año, en Hamburgo, Alemania, se construyó una carpeta asfáltica con un tratamiento superficial de varias capas, empleando una emulsión estabilizada la cual reacciona activamente con la arcilla del substrato pétreo. Las emulsiones aniónicas se comenzaron a emplear en Europa en 1925. En la fabricación de éstas se aprovecharon los ácidos nafténicos contenidos en el asfalto para que actuaran como el agente emulsificante en el momento de agregar agua con soda cáustica al sistema y someterlo a una vigorosa agitación.

Las emulsiones asfálticas se comenzaron a utilizar en México de 1930 a 1935 para la construcción de caminos. El gran inconveniente que tuvieron fue el largo tiempo de rompimiento de la emulsión, que en la época de lluvias causaba muchos retrasos y graves problemas de construcción. Por este motivo, los asfaltos rebajados ganaron la preferencia del constructor y hasta la fecha, no han podido ser desplazados totalmente.

Las emulsiones asfálticas catiónicas aparecieron en Europa en 1953 y en Estados Unidos hasta 1958. Aparentemente, su aplicación inicial en la construcción de caminos coincidió con la aparición de nuevos productos químicos tenso-activos en el mercado, los cuales tienen, adicionalmente, otros

usos como en el campo de las pinturas, en la industria petrolera, en la industria textil, etc.

Al principio, tales emulsiones se usaron únicamente en la construcción de tratamientos superficiales, como riego de liga y de sello. Al reconocerse la ventaja de las emulsiones catiónicas sobre las aniónicas y los asfaltos rebajados, se inició la búsqueda de un emulsificante que produjera una emulsión de rompimiento lento, capaz de mezclarse con una granulometría para base o para carpeta.

En 1973, los países árabes, poseedores de la mayoría del petróleo mundial, aumentaron el valor del barril de petróleo crudo resultando afectados los derivados del mismo, entre ellos los solventes empleados en los asfaltos rebajados; esto provocó un incremento en el uso mundial de las emulsiones asfálticas. Los países con mayor producción de emulsiones asfálticas son, en orden de importancia: Estados Unidos, Francia, España y Japón. Entre estos cuatro países se fabrica un 40% aproximadamente de la producción mundial de emulsión asfáltica, que se estima actualmente próxima a los dieciséis millones de toneladas, de la que más del 85% es del tipo catiónico.

3.4 TIPOS DE EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de emulgente usado. En este caso podemos hablar de dos tipos, aniónicas y catiónicas:

Catiónicas (carga positiva), Aniónicas (carga negativa) y No-iónicas (que no tienen carga).

Según las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Materials) y la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), otra clasificación se basa en la velocidad con que las gotitas de asfalto coalescen (ver propiedades), o también el tiempo de rotura. Para tal efecto han sido adoptados los siguientes términos: RS (rapid-setting, rotura rápida), MS (medium-setting, rotura media), SS (slow-setting, rotura lenta), QS (quick-setting, rotura muy rápida), esta última generalmente para micropavimentos.

Finalmente las emulsiones se identifican por una serie de números y letras que aluden a la viscosidad y a la consistencia de la base del cemento asfáltico. La letra "C", encabezando el nombre de la emulsión, identifica a una emulsión catiónica, su ausencia identifica una aniónica, p.e. RS-1 es una emulsión aniónica, y CRS-1 es una emulsión catiónica. Además hay números que indican la viscosidad relativa, ejemplo. MS-2 es más viscoso que una MS-1. La letra "h" indica que la base asfáltica es más consistente (dura o "hard"), y la letra "s" más blanda (soft), ejemplo. CSS-1h, MS-2s.

3.4.1 Emulsiones Aniónicas:

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga negativa.

3.4.2 Emulsiones Catiónicas:

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga positiva.

Respecto a la estabilidad de las emulsiones asfálticas, éstas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

3.4.3 De Rompimiento Rápido:

Estas se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos (con excepción de la emulsión conocida como ECR-60), la cual no se debe utilizar en la elaboración de estas últimas.

3.4.4 De Rompimiento Medio:

Estas normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos es menor o igual al 2%, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.

3.4.5 De Rompimiento Lento:

Estas se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.

3.4.6 Para Impregnación:

Estas se utilizan para impregnaciones de sub-bases y/o bases hidráulicas.

3.4.7 Super Estables:

Estas se emplean en la estabilización de materiales y en la recuperación de pavimentos.

3.5 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

Según el contenido de asfalto en la emulsión, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se muestra en la siguiente tabla.

Clasificación de las Emulsiones Asfálticas

Clasificación	Contenido de Asfalto (% en masa)	Tipo de Rompimiento	Polaridad
EAR-55	55	Rápido	Aniónica
EAR-60	60	Rápido	Aniónica
EAM-60	60	Medio	Aniónica
EAM-65	65	Medio	Aniónica
EAL-55	55	Lento	Aniónica
EAL-60	60	Lento	Aniónica
EAI-60	60	Para Impregnación	Aniónica
ECR-60	60	Rápido	Catiónica
ECR-65	65	Rápido	Catiónica
ECR-70	70	Rápido	Catiónica
ECM-65	65	Medio	Catiónica
ECL-65	65	Lento	Catiónica
ECI-60	60	Para Impregnación	Catiónica
ECS-60	60	Sobre-Estabilizada	Catiónica

Tabla 3.1 Clasificación de las emulsiones asfálticas

3.6 PROPIEDADES DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.

3.6.1 Rompimiento de las Emulsiones Asfálticas

Cuando uno usa emulsiones asfálticas, es necesario tener control sobre la estabilidad de la emulsión, o sea, se tiene que poder controlar el rompimiento de la misma. Pasado un tiempo determinado, el cual depende de la situación en particular que se esté trabajando, las emulsiones tienen que desestabilizarse para que el asfalto se deposite como una capa sobre el material pétreo.

Este fenómeno de rompimiento o ruptura de la emulsión ocurre debido a la carga eléctrica que tiene el material pétreo. La carga que tiene el material pétreo neutraliza la carga de las partículas de asfalto en la emulsión, permitiendo que se acerquen unas a otras para formar agregados de gran tamaño; estos agregados son los que se depositan sobre el material pétreo formando una capa asfáltica.

Durante este proceso el agua es eliminada del sistema asfalto-pétreo. En el proceso de desestabilización, la emulsión como va perdiendo agua, pasa por una emulsión inversa en donde el asfalto forma la fase continua y el agua la fase discreta, o sea que se forman pequeñas gotas de agua en el interior del asfalto, las cuales posteriormente, cuando se deposita la capa de asfalto, son eliminadas.

En general, los factores que influyen en la ruptura de la emulsión aniónica son la evaporación de la fase acuosa, la difusión del agua de la emulsión y la absorción superficial de una parte del emulsificante en el material pétreo. La

ruptura de la emulsión catiónica se produce por la absorción de la parte polar del emulgente por los agregados, provocando la ruptura de la emulsión y haciendo que las partículas del asfalto se adhieran inmediatamente a las partículas del material pétreo, aun en presencia de humedad. En la siguiente figura podemos observar el proceso de ruptura de una emulsión en tres pasos: primero se observa la emulsión, enseguida cuando se inicia el rompimiento y después cuando se produce la ruptura completa y queda el material pétreo cubierto por el asfalto.

La forma de rompimiento de las emulsiones asfálticas catiónicas, en la mayoría de los casos, mejora la adherencia y permite una mejor distribución de la mezcla dentro de la masa del agregado pétreo; adicionalmente permite proseguir los trabajos de asfaltado en regiones con climas húmedos o durante una temporada de lluvias, garantizando la apertura de caminos al tránsito en un corto período de tiempo.

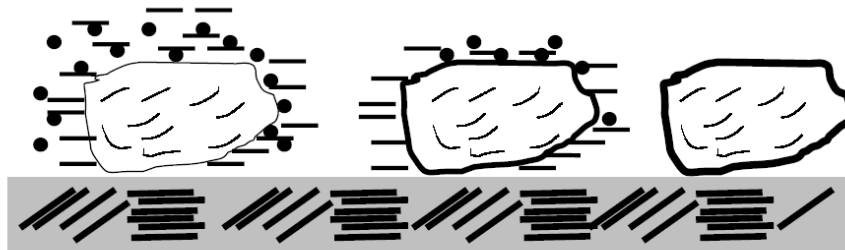


Figura 3.3. Ruptura de una emulsión asfáltica sobre un material pétreo.

3.6.2 Viscosidad.

Para emulsiones CRS y CMS, la viscosidad es importante. Esta propiedad es controlada por la cantidad y tipo de asfalto, la temperatura y tipo de emulsificante, asfaltos con diferentes PEN, darán diferentes viscosidades. Esta propiedad se puede controlar, aumentando o disminuyendo la cantidad de asfalto, agregando CaCl₂ o cambiando el tipo de emulsificante.

3.6.3 Floculación.

Es un proceso en el cual las gotitas de asfalto empiezan a unirse unas con otras, generalmente se forma una gota grande al centro rodeada de pequeñas alrededor de ella. Estas partículas floculadas se pueden separar con sólo agitar.

3.6.4 Sedimentación.

Las partículas de asfalto ligeramente elevan su densidad respecto al agua por efecto de la gravedad, se orienta hacia la parte inferior del envase que lo contiene. Si aumentamos solventes a la mezcla, esta puede perder densidad y las partículas se orientan hacia la parte superior del envase, a éste fenómeno se le denomina “cremosidad”.

3.6.5 Coalescencia.

Cuando las gotitas se fusionan formando grandes partículas, la emulsión eventualmente ya rompió. Este fenómeno generalmente se origina después de la floculación. Esto se debe a la insuficiente cantidad de emulsificante, temperaturas de producción y almacenamiento erróneas.

3.7 VENTAJAS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

En esta sección veremos qué ventajas tienen las emulsiones asfálticas sobre los asfaltos rebajados y las mezclas asfálticas en fundido (en caliente).

- 1) Es un ligante asfáltico no contaminante ni peligroso, ya que contiene del 35 al 40% de agua como solvente.
- 2) Su manejo es sencillo y seguro, gracias a su baja viscosidad a temperatura ambiente.
- 3) Tiene un límite de almacenamiento y es muy amplio, ya que puede ser almacenado por semanas o meses, debido entre otras cosas a la igualdad de las densidades de sus componentes.
- 4) Tiene una gran adhesión con cualquier agregado pétreo, a pesar de condiciones de humedad adversas debido a la enorme dispersión de las

partículas de asfalto de tamaño muy pequeño y al uso de agentes emulsificantes de tipo catiónico.

5) Se aplica en un lapso muy corto de tiempo, lo que permite la pronta funcionalidad de la obra en que se esté usando.

6) Presenta un bajo costo de la fase dispersante, que es el agua.

7) Se emplean materiales pétreos locales, lo que elimina la transportación de este tipo de materiales por grandes distancias.

8) El equipo de aplicación es mucho más sencillo debido a que todos sus componentes se aplican a temperatura ambiente.

9) Por su aplicación en frío, ayuda a no alterar el medio ambiente y queda suprimida la emisión de humos o gases.

10) El empleo del agua como solvente no crea problema de su desperdicio, ya que es recuperable.

3.8 RECOMENDACIONES PARA EL USO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las recomendaciones más generales para el uso de las emulsiones asfálticas son las que se describen a continuación:

1) Si el depósito se usó para almacenar emulsiones aniónicas y se van a almacenar emulsiones catiónicas, es necesario neutralizar la acción de aquella lavando el tanque, primero con agua y posteriormente con ácido clorhídrico diluido al uno por ciento.

2) Por el contrario, si el depósito se usó para almacenar emulsiones catiónicas y se quiere almacenar emulsiones aniónicas, se tendrá que lavar con agua y neutralizarlo con soda cáustica al 0.3 por ciento.

3) Para descargar más emulsión sobre la ya almacenada, es necesario que el tubo de descarga llegue al fondo para no romper la nata de la superficie, de otra forma, se corre el riesgo de obstruir las bombas.

4) Cuando una fábrica o compañía está establecida permanentemente en una región donde se registran temperaturas muy bajas, los tanques deben tener un sistema de calentamiento adecuado o estar cubiertos con algún sistema aislante, para evitar la congelación.

5) Cuando los tanques de almacenamiento sean los que usa una compañía constructora, los depósitos se protegerán con mechones alrededor, lo que será suficiente para que no baje la temperatura. Si los tanques están enterrados, no hay necesidad de tomar otra medida para evitar la congelación.

6) Antes de recibir una emulsión en obra, se recomienda comprobar su calidad y el tipo de emulsión de que se trate, haciendo las pruebas de identificación que se recomiendan en cada caso.

7) Una emulsión que cumple con las especificaciones de calidad, puede estar almacenada durante más de un año, si se recircula sistemáticamente para mantenerla homogénea.

8) Los tanques de almacenamiento deberán tener un sistema de recirculación, con el objeto de evitar el asentamiento del asfalto contenido en la emulsión.

9) La temperatura ambiente al aplicarse la emulsión, deberá ser de 10 °C mínimos y en ascenso y nunca debe de hacerse cuando baje la temperatura durante la noche.

10) La emulsión, una vez que es desestabilizada (o sea que ya se produjo el rompimiento), no debe de re-emulsificarse aún en presencia de agua y del paso

de los vehículos; por este motivo es muy importante que el emulsificante sea el adecuado.

3.8.1 Usos de las Emulsiones Catiónicas

El asfalto es un importante material termoplástico que es ampliamente usado en la construcción y sus usos se hacen extensivos a las emulsiones asfálticas catiónicas, entre los que destacan:

1- Usos generales.

2- Juntas para pavimentos hidráulicos.

3- Adhesivos.

4 -Selladores.

5 -Impermeabilizantes.

6 -Recubrimiento de tubería especial.

7 -Para tratamientos superficiales, para pavimentos asfálticos, en carreteras y aeropistas:

- Riegos de impregnación.

- Riegos de imprimación o penetración.

- Riegos negros con emulsión diluida.

- Riegos de liga.

- Riegos de sello con arena o gravilla seleccionada.

8- Morteros asfálticos o slurry seal (sólo con emulsiones asfálticas).

9 -Bacheo.

10- En la masa o mezcla asfáltica, para carreteras y aeropistas.

11 -Mezcla cerrada y mezcla abierta.

12 -Grava - emulsión y arena – emulsión.

13 -Penetración.

14 -Impregnación.

3.9 ESPECIFICACIONES DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.

A continuación se indican algunas especificaciones adicionales de las Emulsiones Asfálticas Catiónicas:

CARACTERISTICAS	NORMA S.C.T. 601.03.011	EMULSION RAPIDA		EMULSION MEDIA		EMULSION LENTA	
		RR-C1	RRC2	RM-C1	RM-C2	RL-C1	RL-C2
Viscosidad Saybolt Furol A 25°C en seg. A 50°C en seg.	011-G.11	>20	>80 >20	>20	>20	>20	>20
Viscosidad Brookfield A 25° C en CP A 50°C en CP	ASTM D- 4402	>40	>160 >40	>40	>40	>40	>40
Determinación del Residuo asfáltico: Destilación % Mínimo Evaporación % Mín.	011-G.09 011-G.10	60 60	63 63	60 60	63 63	63 63	60 60
Sedimentación en Almacén en 24 hrs. % Máximo a 25° C NOTA 1	ASTM D-244	2.0	1.0	3.0	3.0	3.0	2.0
Retenido en malla 0.85 mm. % máximo	011-G.13	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Carga eléctrica de la Partícula	011-G.03	P O S I T I V A					
Tiempo que tarda en Descargar la partícula en Minutos a 50° C	AMFE	<2	<2	>12	>12	>25	NOTA 2
Carga activa de la Partícula NOTA 3	AMFE	Obscura	Obscura	café	café	beish	Sin color
Miscibilidad en agua	ASTM D-244	NegativA	Negativa	P O S I T I V A			
Determinación del Potencial de hidrógeno (Ph) máximo	011-F.04	<4	<4	<4	<4	<4	<4

Tabla 3.2. Especificaciones de las emulsiones asfálticas.

Norma S.C.T. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte) Instituto Mexicano del Transporte.

3.10 EMULSIONES DE ASFALTOS MODIFICADOS

El planteamiento de nuevas necesidades, el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación o puesta en obra y en definitiva, la mejora y optimización de las técnicas en las emulsiones asfálticas, ha permitido la aparición de nuevos tipos de emulsiones, entre las que podemos enumerar: emulsiones muy viscosas, de alta flotación, de rompimiento controlado por aditivos, emulsiones modificadas y emulsiones de asfaltos modificados.

Actualmente se utiliza una gran variedad de polímeros comerciales con composición química y propiedades diferentes, para *emulsiones de asfaltos modificados*. Entre los empleados de forma más generalizada tenemos los elastómeros termoplásticos de estireno-butadieno-estireno (SBS) y de estirenobutadieno(SBR), y los copolímeros de estireno acetato de vinilo (EVA).

Actualmente existen en el mercado un gran número de asfaltos modificados con polímeros, que en general utilizan un emulgente catiónico para lograr la unión y estabilidad del cemento asfáltico, el polímero y el agua, constituyendo una emulsión asfáltica catiónica con polímeros.

Los fabricantes de los productos mencionados, los promocionan al público, mostrando su calidad en comparación con los empleados tradicionalmente, en los usos de la ingeniería civil, por medio de resultados de pruebas de laboratorio, las cuales están especificadas en Normas establecidas por

organismos reconocidos a nivel internacional y nacional, tales como: A.S.T.M., AASHTO, SHRP., S.C.T. y NOM.

Los asfaltos modificados que podemos adquirir en El Salvador, tienen la característica de que son provenientes del extranjero, por lo que resultan muy costosos, ya que en su precio están incluidos los derechos de patente y de importación. Por esta razón, su uso en obras de gran envergadura muchas veces se omite, a pesar de las ventajas que presenta.

3.11 FABRICACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS

El equipo y producción para la fabricación de emulsiones es muy simple y fácil de conseguir en el mercado. El problema está en la formulación de las emulsiones que deben adaptarse a los materiales pétreos. Los requerimientos para la fabricación de las emulsiones asfálticas son sencillos, como se muestra en la figura 3.4.

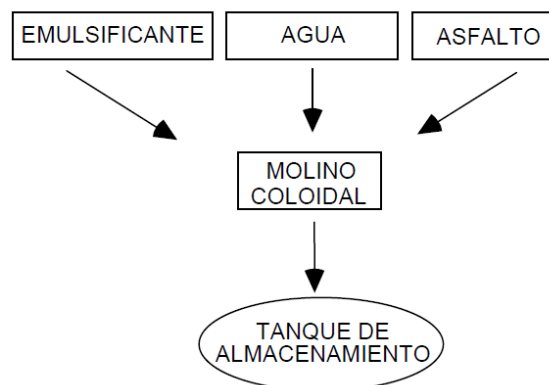


Figura 3.4 Esquema de la fabricación de emulsiones asfálticas

3.12 ENSAYOS A EMULSIONES ASFÁLTICAS.

3.12.1 Viscosidad

Los aparatos, procedimiento y finalidad del ensayo de viscosidad de los asfaltos emulsificados o emulsiones asfálticas son esencialmente los mismos descritos para los asfaltos fluidificados. Los aparatos y procedimiento se describen en los métodos AASHTO T59 y ASTM D244.

3.12.2 Residuo de destilación

En las emulsiones asfálticas se emplea el ensayo de destilación para determinar las proporciones de asfalto y agua y obtener asfalto puro para su ensayo. El procedimiento de ensayo es esencialmente el mismo descrito para los asfaltos fluidificados, salvo que se emplean una retorta de hierro y quemadores anulare en lugar de matraz de vidrio y mechero Bunsen. Los aparatos y procedimientos para la realización del ensayo se describen en los métodos AASHTO T59 ASTM D244.

3.12.3 Sedimentación

El ensayo de sedimentación determina la tendencia a sedimentar de los glóbulos de asfalto durante el almacenaje de una emulsión asfáltica. Se deja en reposo, durante cinco días, una muestra de emulsión asfáltica en un cilindro graduado, después de lo cual se determina la diferencia en contenido de asfalto entre el fondo y la superficie de la muestra. El procedimiento y material necesario se describen en los métodos AASHTO T59 y ASTM D244.

3.12.4 Demulsibilidad

El ensayo de demulsibilidad da una indicación de la velocidad relativa a que los glóbulos coloidales de asfalto de las emulsiones de rotura rápida y media se unirán entre sí (o la emulsión romperá) cuando la emulsión se extienda en película delgada sobre el terreno o los áridos. El cloruro cálcico coagula o flocula los diminutos glóbulos de asfalto presentes en estas emulsiones. En el ensayo se mezcla con emulsión asfáltica una solución de cloruro cálcico en agua, tamizando a continuación la mezcla para determinar la cantidad de asfalto separada de la emulsión.

En el ensayo de las emulsiones de rotura rápida (RS) se emplea una solución muy débil de cloruro cálcico; las especificaciones determinan la concentración de la solución y la cantidad mínima de asfalto que debe quedar en el tamiz. En este tipo de emulsiones es necesario un alto grado de demulsibilidad, ya que se

espera de ellas que rompan casi inmediatamente al contacto con los áridos a los que se aplican.

El ensayo de las emulsiones de rotura media (MS) exige el empleo de una solución de cloruro cálcico más fuerte que la empleada en el ensayo de los tipos de rotura rápida. En las aplicaciones en las que se especifica el tipo MS no se desea la rápida coalescencia del asfalto, y las especificaciones demuestran normalmente, para estos productos, un límite máximo de la demulsibilidad, así como la concentración de la solución. El material y procedimiento para la realización de este ensayo se describen en los métodos AASHTO T59 y ASTM D244.

3.12.5 Ensayo de tamizado

El ensayo de tamizado complementa al de sedimentación y tiene un propósito en cierto modo similar. Se emplea para determinar cuantitativamente el porcentaje de asfalto presente en forma de glóbulos relativamente grandes. Estos glóbulos no dan revestimientos delgados y uniformes de asfalto sobre las partículas de áridos y pueden ser, o no ser, identificados por el ensayo de sedimentación, que solamente tiene valor en este aspecto cuando hay suficiente diferencia entre el peso específico del asfalto y el del agua para permitir que se produzca la sedimentación.

En el ensayo de tamizado se hace pasar una muestra representativa de la emulsión asfáltica a través de un tamiz número 20. el tamiz y el asfalto retenido se lavan a continuación con una solución diluida de oleato sódico y, finalmente, con agua destilada. Después del lavado, el tamiz y el asfalto se secan en estufa y se determina la cantidad de asfalto retenido. El procedimiento y aparatos necesarios para la realización de este ensayo se describen en los métodos AASHTO T59 y ASTM D244.

3.12.6 Mezclado con cemento

El ensayo de mezclado con cemento desempeña en las emulsiones asfálticas de rotura lenta (SS) un papel análogo al del ensayo de demulsibilidad en los tipos de rotura rápida o media. Los tipos SS se destinan al empleo con materiales finos y áridos con polvo, y normalmente no son afectados por las soluciones de cloruro cálcico empleadas en el ensayo de demulsibilidad.

En el ensayo de mezclado con cemento se mezcla una muestra de emulsión asfáltica con cemento Pórtland de gran finura de molido, y la mezcla se hace pasar con la ayuda del agua, a través de un tamiz número 14. Las especificaciones limitan usualmente la cantidad de material que puede admitirse quede retenida en el tamiz. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen en los métodos AASHTO T29 y ASTM D244.

3.12.7 METODO DE ENSAYO STANDARD PARA VISCOSIDAD SAYBOLT BASADO EN LA Norma ASTM D-88

Se refiere a los procedimientos empíricos para determinar las viscosidades Saybolt Universal y Saybolt Furol para los productos del petróleo a la temperatura especificada entre 21 y 99 grados C.

PROCEDIMIENTO

1-MUESTREO: utilice los métodos descritos bajo las normas D-140 y D270

2-PREPARACION DEL EQUIPO

- Disponga el orificio universal para lecturas entre 32s y 1000s
- Disponga el orificio Furol para $t > 25s$
- Limpieza del viscosímetro
- Ubique el viscosímetro en un lugar apropiado
- Coloque en posición el fco. receptor de 60ml.
- Llene el baño con el medio de calentamiento, agua o aceite según el caso
- Agite y ajuste el control de temperatura así que no varíe más de 0.03 grados C.
- Mantenga la temperatura ambiente entre 20-30 grados C. y regístrela.

3.1 Establezca las temperaturas del test standard a saber:

3.2 Inserte el tapón

3.3 El ensayo puede agilizarse precalentando la muestra, pero no se acerque

al flash point.

3.4 Agite bien la muestra y filtre directamente sobre el viscosímetro hasta que el nivel rebase el anillo de sobreflujo- Véase la sección de la cámara de muestra.

Utilice malla 100Mesh (150 micrones)

3.5 Agite la muestra en el viscosímetro, utilizando un termómetro. Cuando la temperatura permanezca constante hasta 0.03 grados C de la temperatura del ensayo, durante un minuto, retire el termómetro.

3.6 Retire el exceso de muestra alrededor del anillo de sobreflujo, utilizando vacío.

3.7 Verifique que el frasco receptor esté en posición correcta.

3.8 Retire el tapón e inicie la medición del tiempo con el cronómetro.

3.9 Registre el tiempo transcurrido hasta que el menisco del aceite alcance la marca sobre el frasco receptor. Mida hasta 0.1 seg. Si el tiempo es menor a 200 seg.

4-CALCULOS:

4.1-Multiplique el tiempo medido para el flujo por el factor de corrección del viscosímetro.

El factor de corrección se encuentra de la relación entre la viscosidad Saybolt certificada y el valor medido con el aceite estándar a 37.8 grados C. Los aceites estándar se encuentran en el anexo A2 de la norma.

4.2-Reporte el tiempo CORREGIDO , como la viscosidad Saybolt Universal, SUS o viscosidad Saybolt Furol, SFS, a la temperatura a la cual se hizo la

prueba y con una precisión de 0.1s o al segundo según que el tiempo sea menor a 200 segundos o mayor a 200 segundos, respectivamente.

OBSERVACION IMPORTANTE:

Otro método fundamental para medir viscosidad cinemática, aparece en la norma ASTM D-445.

Existen otros tipos de viscosímetros, que permiten trabajar con una cantidad de muestra más pequeña, y se realiza con mucha rapidez, los cuales aparecen

Descritos en la norma ASTM D- 445

5-CONVERSIONES:

Los métodos de conversión de viscosidad cinemática en unidades de CSt a Unidades SUS o SFS con las tablas correspondientes de conversión aparecen descritos en el método ASTM- 2161. Se recomienda que la viscosidad cinemática sea reportada en unidades CSt (Centistokes)

3.12.8 RESIDUOS POR DESTILACIÓN. AASHTO T59 ASTM D244.

Con esta prueba se obtiene el contenido de agua y disolventes que presenta la emulsión cuando se calienta a 260° C. Al residuo se le efectúan pruebas de penetración, ductibilidad y solubilidad para saber cómo le afecta la temperatura al cemento asfáltico.

Los aparatos utilizados en este ensayo son destiladores de aleación de aluminio que es de aproximadamente de 240 mm de altura por 94 mm de diámetro interior, con un anillo quemador de 125 ± 5 mm con orificios para ajustarlo al

destilador; conexión del equipo, consiste en un tubo conector, escudo de metal, un condensador enfriado por agua y un adaptador adecuado entre el condensador y una probeta graduada de 100 ml. El cual lo detallare mas adelante en el dibujo que mostrare, termómetros para medir la temperatura en la etapa de destilación y por ultimo una balanza con una capacidad de 5000g con una sensibilidad de 0,1 g.

PROCEDIMIENTO

Se debe pesar exactamente 200 g de una muestra de emulsión para realizar este ensayo, previo al ensaye se deben pesar lo que es el destilador, abrazaderas, termómetros y empaquetaduras y otro elemento que contenga el destilador y que pueda alterar el ensayo en si por el peso más que nada. Se debe tapar bien con un papel aceitado o asbesto entre la tapa y el destilador, la tapa tiene que quedar herméticamente sellada. En la tapa están los corchos en los pequeños orificios por el cual ahí se deben colocar los termómetros para determinar la temperatura, éstos deben estar a 6,5 mm del fondo del destilador y el bulbo del otro debe quedar a 165 mm desde el fondo.

Colocar el anillo quemador alrededor del destilador a 150 mm desde el fondo de éste, la llama debe quedar al mínimo.

La temperatura debe de aumentar aproximadamente a los 215 °C luego de eso incrementar la temperatura a 260 °C manteniendo esta temperatura por

alrededor de unos 15 minutos. La destilación debe estar completa entre los 60 ± 15 minutos desde la primera aplicación de calor.

Una vez terminado el ensaye en sí y dejando que se enfríe se deben pesar los elementos para determinar los residuos sobrantes en el matraz igualmente registrar el volumen de aceite destilado y sacar el porcentaje de la emulsión.

Precisión

El criterio que se debe usar para aceptar los resultados:

Residuos por destilación, % masa 50 a 70

Repetición, % masa 1,0

Los resultados de los dos ensayos ellos por 2 laboratoristas no deberían diferir al menor que den las siguientes cantidades

Residuos por destilación, % masa 50 a 70

Repetición, % masa 2,0

3.12.9 SEDIMENTACION AASHTO T59 y ASTM D244.

Se utilizaran para este ensayo dos cilindros de vidrio de 500 ml, con base ajustable con tapones de vidrio o corcho u de otro material pero que los selle herméticamente que tenga un diámetro externo de 50 ± 5 mm y graduación de

5 ml, pipeta de vidrio de 60 ml, un sifón, una balanza y un horno como el antes señalado.

PROCEDIMIENTO

Se colocan 500ml de muestra en cada uno de los cilindros de vidrio, luego se tapan y se dejan sin mover por durante 5 días en el laboratorio; después de pasado este periodo hay que remover 55 ml de la parte superior de cada cilindro con una pipeta para no alterar el resto de la muestra.

Después pese 50 g por cada muestra por separados en vasos de vidrios tarados (de 600 ml) y determine el residuo asfáltico por evaporación luego de colocar la muestra en el horno a una temperatura de 163 °C más o menos por un mínimo de dos horas hasta obtener una masa constante.

Cálculos

Los cálculos de sedimentación se realizan por la siguiente formula:

$$\text{SEDIMENTACION, \% (5 días)} = B - A$$

Donde:

A = promedio del % de residuo de la parte superior de la muestra, y

B = promedio del % de residuo del fondo de la muestra.

Precisión

El criterio que será usado para juzgar la aceptabilidad es el siguiente: la Probabilidad de los resultados no serán considerados dudosos a menos que ellos difieran de una cantidad mayor a la indicada.

Los resultados no serán considerados dudosos si difieren por más de las siguientes cantidades.

Precisión

El criterio que será usado para juzgar la aceptabilidad es el siguiente: la probabilidad de los resultados no serán considerados dudosos a menos que ellos difieran de una cantidad mayor a la indicada.

Sedimentación masa, %	Repetibilidad % de la media
0,0 a 1,0	0.4
sobre 1,0	5

Los resultados no serán considerados dudosos si difieren por más de las siguientes cantidades.

Sedimentación masa, %	Reproducibilidad %
0,0 a 1,0	0,8 de la masa
sobre 1,0	10 de la media

3.12.10 TAMIZADO AASHTO T59 y ASTM D244.

Para esto se ocuparon un tamiz que tenga 75 mm de diámetro, teniendo una malla tejida de alambre de 0,85 mm o sea un N° 20, una paila metálica o caja poco profunda adaptada para la parte inferior del tamiz y una solución de oleato de sodio (2%) y se disuelven 2 g de oleato de sodio puro en agua destilada y diluir a 100 ml y una balanza.

Procedimiento

Se registra la masa el tamiz y de la paila y se moja la malla de alambre con la solución de Oleato de Sodio. Se pesa 1 kg de emulsión asfáltica dentro de un recipiente adecuado y verterlo dentro a través del tamiz posteriormente se debe lavar el recipiente hasta que el agua salga clara, después se coloca la paila bajo el tamiz y caliente por 3 horas a 110 más o menos en un horno de secado y en seguida se deja enfriar y se pesa el tamiz, paila y el residuo.

Cálculos

Se calcula el porcentaje de muestra retenida sobre el tamiz con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de la muestra retenida} = (B - A)/10$$

Donde:

A = masa del tamiz y paila, g.

B = masa del tamiz mas paila y residuo, g.

Precisión

El criterio que será usado para juzgar la aceptabilidad es el siguiente: la probabilidad de los resultados no serán considerados dudosos a menos que ellos difieran de una cantidad mayor a la indicada.

ensaye de tamizado,	Repetibilidad
% masa	% en masa
0 a 0,1	0,03

Los resultados no serán considerados dudosos si difieren por más de las siguientes cantidades:

ensaye de tamizado,	Reproducibilidad
% masa	% masa.
0 a 0,1	0,08

CAPITULO IV

DISEÑO DE MEZCLA

ASFALTICA TEMPLADA

4. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA TEMPLADA.

4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

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

a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

- ✓ Masilla asfáltica: Polvo mineral más cemento asfáltico.
- ✓ Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- ✓ Concreto asfáltico: Agregado grueso, agregado fino, polvo mineral y cemento asfáltico.
- ✓ Macadam asfáltico: Agregado grueso más cemento asfáltico.

b) Por la Temperatura de puesta en obra.

➤ *Mezclas asfálticas en Caliente:* El concreto asfáltico mezclado en planta y compactado en caliente, se compone de una mezcla de agregados graduados y asfalto, fabricado a una temperatura aproximada de 150°C colocada y compactada en caliente a una temperatura de 140 °C. Las plantas para la producción de mezclas en caliente se construyen de tal manera que, después de secar y calentar los agregados, los separa en diferentes grupos de tamaños, los recombina en las proporciones adecuadas, los mezcla con la cantidad debida de asfalto caliente y finalmente los entrega a los vehículos transportadores, que a su vez la colocan en la máquina pavimentadora para que esta la deposite sobre la vía con un espesor uniforme, después se

compacta mediante rodillos mientras la temperatura se conserva dentro de los rangos de especificación.

➤ Mezclas asfálticas en Frío: Definimos las mezclas asfálticas en frío como un tipo de concreto asfáltico, constituido por la combinación de uno o más agregados pétreos y un relleno mineral (filler), de ser necesario, con un asfalto emulsionado catiónico o diluido con solvente, cuya mezcla, aplicación y compactación se realizan en frío (condiciones ambientales). El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados).

Si bien el ligante puede ser precalentado hasta no más de 60°C, el resto de las operaciones, como queda expresado, se llevan a cabo a temperatura ambiente. Los agregados pétreos no requieren secado ni calentamiento, es decir, que se los emplea tal como se presentan en el acopio, con su humedad natural. Estas mezclas también pueden ser elaboradas en la misma planta central destinada a la elaboración de las mezclas caliente, prescindiendo para ello del sistema de calefacción para el secado de los áridos y el calentamiento y circulación del asfalto.

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: contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables. En las mezclas asfálticas en caliente, deben preferirse agregados con granulometría densa, o muy cercana a la densa.

➤ Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10%.

➤ Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.

➤ Mezclas Porosas o Drenantes: Mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado porcentaje de huecos

interconectados entre sí. Permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. 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: También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

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, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

➤ 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: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico (Zona comprendida entre dos curvas granulométricas).
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

4.2. DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA TEMPLADA.

Las mezclas templadas, son un tipo de mezcla asfáltica fabricada con emulsión asfáltica en planta a unas temperaturas superiores a las utilizadas en la fabricación de las mezclas en frío. Se producen calentando los agregados pétreos a una temperatura que oscila entre 80°C – 90°C y la emulsión asfáltica calentada a una temperatura de 60°C.

4.2.1 Beneficios de las mezclas asfálticas templadas.

Los beneficios se extienden más allá de un uso reducido de energía y emisiones más bajas al medio ambiente (de CO₂, compuestos orgánicos volátiles, polvo, etc.). Incluyen el riesgo reducido de quemaduras para los operarios, mayor flexibilidad al extender el tiempo posible de trabajo para el transporte y aplicación (los materiales no se enfrían tan rápidamente como las

mezclas en caliente) y un envejecimiento reducido del ligante durante la producción.

La problemática planteada a nivel mundial sobre el cambio climático, las emisiones de CO₂, las energías alternativas ante la posible disminución de las reservas de las energías fósiles han hecho que desde los diferentes actores relacionados con la construcción y conservación de carreteras se estén tomando medidas para que esta industria sea lo menos perjudicial con el medio ambiente, conllevando al mismo tiempo una reducción en el consumo energético (el consumo energético está principalmente relacionado con un ahorro de económico en la producción de este tipo de mezcla asfáltica).

4.3 PROPIEDADES QUE DEBE PRESENTAR LA MEZCLA.

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.

4.3.1 Estabilidad: es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas por el tránsito. La carpeta asfáltica debe de ser capaz de mantener su forma y textura ante las secuencias de carga que a diario le son impuestas. La fricción interna depende de la textura superficial, graduación del agregado, forma de la partícula, densidad de la mezcla, y, del contenido y tipo de asfalto. La estabilidad

es función de la fricción y la resistencia inter-bloqueada del agregado en la mezcla. Cuando sobrepasamos el nivel óptimo de asfalto la película es demasiado gruesa y esto genera que la cohesión decrezca, resultando en pérdida de fricción entre las partículas que componen la mezcla asfáltica. Es importante que las partículas que componen el agregado sean angulares y ásperas en su textura superficial, esto dará una alta estabilidad a la mezcla.

Los problemas clásicos debido a una estabilidad baja se detallan a continuación:

4.3.2 Durabilidad: es la propiedad de una mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales causados por el agua, aire, temperatura y las cargas debidas al tráfico. Estos efectos perjudiciales provocan desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), envejecimiento, segregación, etc.

Puede mejorarse la durabilidad de una mezcla asfáltica de tres maneras:

a) Utilizando un contenido óptimo de asfalto: se aumenta la durabilidad de la mezcla ya que las partículas del agregado están cubiertas por una película gruesa de asfalto. Esto evita el envejecimiento y el endurecimiento del asfalto, reteniendo por más tiempo las características originales tanto del asfalto como de los agregados.

b) Utilizando una graduación densa: esto proporciona un contacto mas cercano entre las partículas de agregado, mejorando así la impermeabilidad de la mezcla.

c) Diseñar y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad: esto se logra mediante la compactación por medios mecánicos utilizando maquinaria y equipo adecuado.

4.3.3 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. De hecho, todas las estructuras tienden a tener asentamientos diferenciales. La flexibilidad de las mezclas asfálticas es incrementada agregando mayor contenido de asfalto, hasta llegar al contenido óptimo, a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido de asfalto la carpeta tiende a ser extremadamente flexible y provoca entonces una mezcla con estabilidad baja. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

4.3.4 Resistencia a la fatiga: es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. Si el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por tal razón, las mezclas asfálticas de graduación densa presentan mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas de graduaciones abiertas. El envejecimiento y endurecimiento del asfalto en la carpeta de rodadura da como resultado menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la sub-rasante, influyen determinantemente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si la carpeta asfáltica presenta buena resistencia a la fatiga y la sub-base está mal compactada, se verán claramente los asentamientos y la resistencia a la fatiga disminuye considerablemente. Caso contrario si la sub-base está bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga la carpeta se dañara. Por lo anterior, el pavimento debe trabajar en conjunto para que pueda resistir la flexión causada por el tránsito.

4.3.5 Resistencia al deslizamiento: es la habilidad de una carpeta asfáltica, particularmente cuando esta mojada, de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Esto implica que el neumático debe mantenerse en contacto con las partículas del agregado y no sobre una película de agua en la superficie del pavimento, conocido como hidropneumático.

Una buena resistencia al deslizamiento lo contribuyen agregados con textura áspera y contenidos adecuados de asfalto. Los contenidos altos de asfalto producen mezclas inestables las cuales tienden a deformarse y exudar, generando así, mayor deslizamiento.

4.3.6 Impermeabilidad: Es la resistencia de una carpeta asfáltica al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. El contenido de vacíos puede ser una indicación a la susceptibilidad de una mezcla compactada al paso del agua y el aire.

4.3.7 Trabajabilidad: es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. El asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad.

4.4 CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA (Analizando el Método Marshall Modificado).

La mezcla asfáltica templada 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:

4.4.1 Densidad: está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura mas durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/pe^3), es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o 62.416 lb/pe^3). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

4.4.2 Vacíos de aire: están presente entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

4.4.3 Vacíos en el Agregado Mineral (VMA): son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el

volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

4.4.4 Contenido de asfalto: el contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas. Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la

mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No. 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

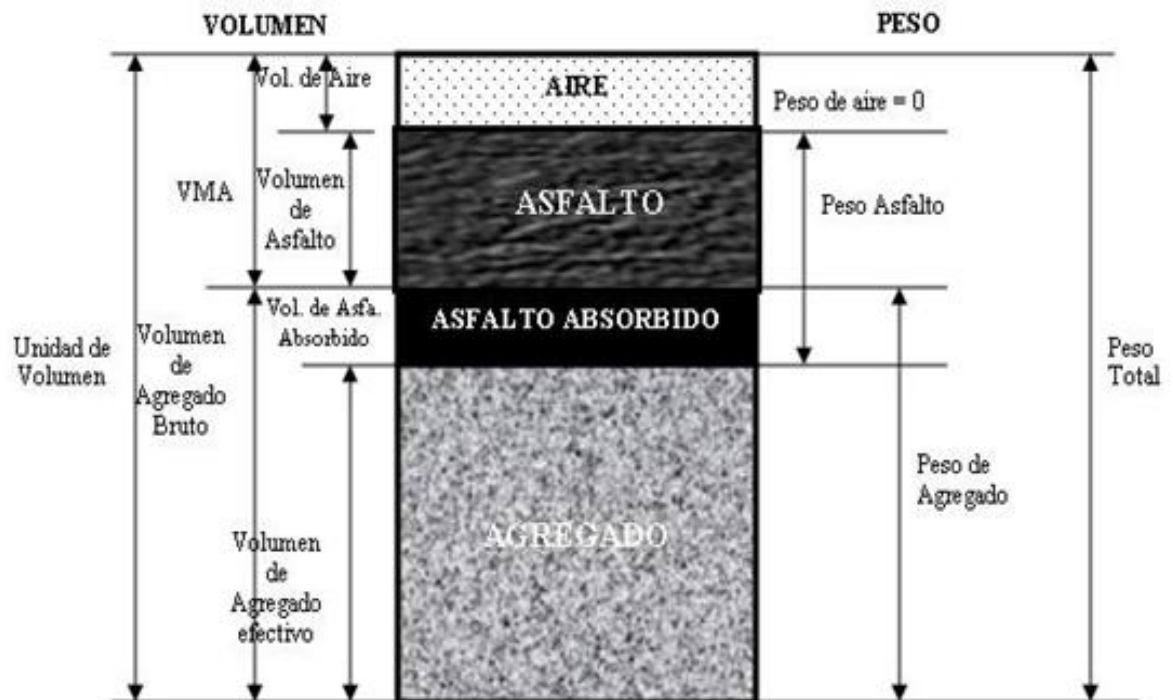


Figura 4.1 Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica en caliente (HMA)

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el

contenido óptimo de asfalto. Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto: volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla.

4.4.5 Vacíos Llenos de Asfalto VFA: son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire del VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando su valor como un porcentaje.

4.5. METODO DE ILLINOIS.

4.5.1 Metodología.

Este método fue desarrollado en la Universidad de Illinois (E.E.U.U) por Michael Darter, Pactick Wilkey, Steven Ahlfield y Richard Wasill, en Febrero de 1978.

Este método de diseño para mezclas en frio; emulsión asfáltica-agregado, está basado en una investigación adelantada en la Universidad de Illinois, usando el método de diseño de mezclas Marshall modificado y el ensayo de durabilidad húmeda.

El método y los criterios de ensayo recomendados, son aplicables a mezclas que contengan cualquier grado de emulsión asfáltica y agregado mineral con gradación densa y tamaños máximos de 1 pulgada (25 mm) o menos, que se vayan a emplear en capas de base en pavimentos con alto volumen de tráfico y para capas de rodamiento en pavimentos con bajo volumen de tráfico.

4.5.2 Propósito de la metodología.

El objetivo del método es proveer una cantidad adecuada de asfalto residual que económicamente estabilice el material granular con el fin de dar la resistencia o estabilidad requerida para soportar las aplicaciones de cargas repetidas (compresión y flexión) sin una deformación permanente excesiva o rotura por fatiga y volver la mezcla suficientemente resistente a los efectos de cambio de humedad.

Se recomienda este método de diseño para mezclas en vía o en planta preparadas a temperatura ambiente. El procedimiento intenta simular lo más aproximadamente posible las condiciones reales de campo.

4.5.3 Descripción general del método.

Básicamente la metodología comprende las siguientes etapas de diseño:

- ✓ Caracterización de materiales componentes.
- ✓ Determinación del porcentaje óptimo teórico de emulsión a utilizar.
- ✓ Ensayo de recubrimiento o cobertura.
- ✓ Determinación del contenido óptimo de humedad de compactación.
- ✓ Variación del contenido de asfalto residual en la mezcla.
- ✓ Análisis e interpretación de los resultados de ensayo.
- ✓ Selección del contenido óptimo de emulsión a utilizar en el diseño.

Las etapas de diseño señaladas anteriormente, son las básicas para el diseño de mezclas asfálticas en frío, sin embargo; en nuestro caso particular de mezcla asfáltica templada, hubo necesidad de omitir algunas de estas etapas, como por ejemplo la determinación del contenido óptimo de humedad de compactación, debido a que nuestra mezcla, no considera humedad en los agregados, ni humedad adicional para llevar a cabo el mezclado de los materiales componentes.

El método de Illinois, utiliza el mismo procedimiento que el método Marshall estándar, ensayando briquetas de 64 mm (2.5 pulg) de espesor por 102 mm (4

pulg) de diámetro, cada una con una misma combinación de agregados, pero con diferentes porcentajes de asfalto, preparadas y compactadas según lo especificado en el ensayo de estabilidad y fluencia (AASHTO T 245).

Esta metodología de diseño difiere del método Marshall tradicional básicamente en aspectos tales como: el uso de emulsión asfáltica como ligante de la mezcla, variación en la preparación de la mezcla (al buscar una humedad óptima de compactación), y la determinación de pérdida de estabilidad de las briquetas al ensayar briquetas en estado seco y briquetas saturadas luego de inmersión y vacío parcial.

4.5.4 Especificaciones de la metodología.

Como se mencionó anteriormente; la metodología en cuestión es usada específicamente para diseños de mezclas en frío, sin embargo para mezclas asfálticas templadas debido a que no existe aún una metodología específica de diseño, se consideró tomar en cuenta tanto especificaciones de mezclas en frío, como especificaciones de mezclas en caliente, las cuales se muestran a continuación:

Tabla 4.1. Criterios del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRANSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		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 (0.01 pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver Tabla 4.2					
% 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 °C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38 °C, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas mas bajas de ensayo.

² Clasificaciones del Transito

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

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

Pesado Condiciones de transito 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 transito.

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

⁵ Cuando se este 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 4.2. Porcentaje mínimo de VMA.

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	½	13.0	14.0	15.0
19.0	¾	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

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 mas grande que el primer tamiz que retiene mas del 10% del material.

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

4.6 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TEMPLADA.

Una mezcla asfáltica se puede presentar según su tamaño máximo, por ejemplo mezcla de 1 pulg, indica que su tamaño máximo es de una pulgada y que dicho material pasará por completo el tamiz de 1 pulg ó según su tamaño máximo nominal, que suele ser la más utilizada; por ejemplo una mezcla con designación de ½ pulg implica que su agregado tiene un tamaño máximo de ¾ pulg y todo el agregado pasará el tamiz de tres cuartos de pulgadas.

El proceso que se explica seguidamente es para diseñar una mezcla densa.

Un diseño de mezcla asfáltica en caliente es un proceso muy amplio y complementario en el cual intervienen varios factores de estudio, los cuales comprenden: primeramente

- Establecer la designación de la mezcla que se desea diseñar.
- Para nuestro caso es una Mezcla de 3/4" en base al tamaño máximo nominal del agregado.
- Elección de la especificación bajo la cual se regirá la granulometría, ésta dependerá del tamaño máximo nominal. La banda de control puede ser definida por el contratante, el diseñador o ser tomado de las especificaciones vigentes en la región donde se realiza el diseño, para nuestro caso se utilizarán las especificaciones granulométricas que establece el método de diseño de mezclas SUPERPAVE.

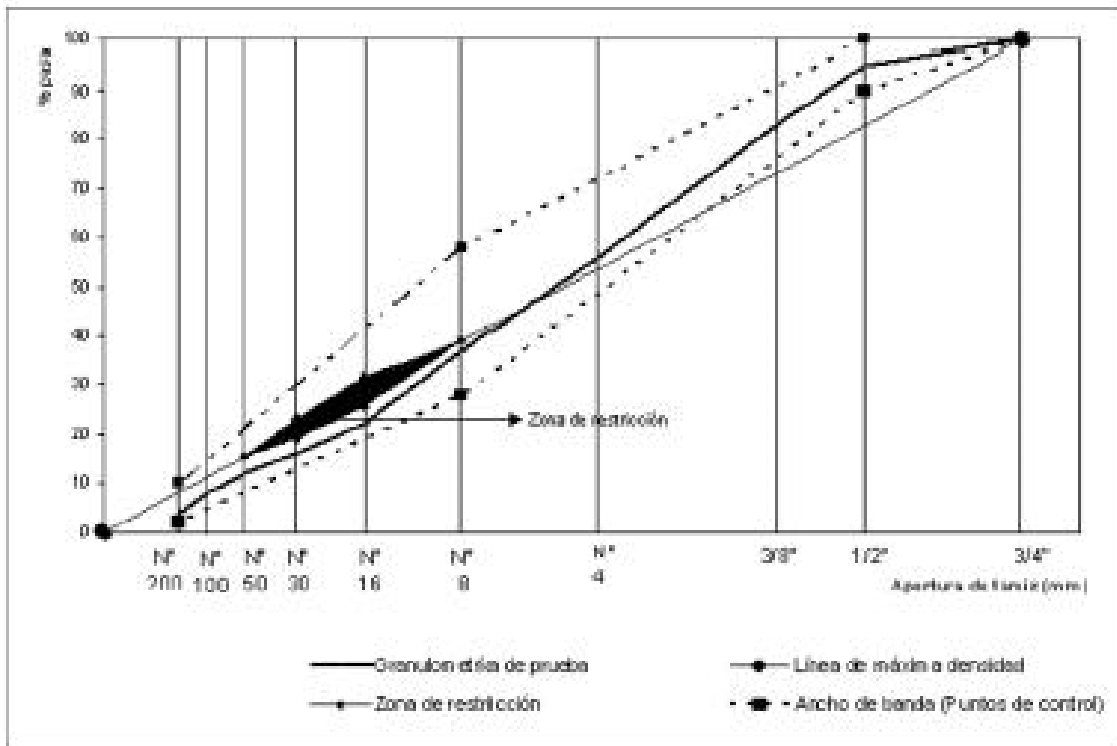


Figura 4.2. Gráfica que muestra la granulometría SUPERPAVE para agregados de tamaño máximo nominal de 3/4".

Tomado del libro "Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE" Primera edición, 1998.

➤ Estudio de los materiales que conformarán la mezcla.

a) El estudio de los materiales pétreos comprenderá una serie de ensayos para cada tipo de agregado que se utilice (las especificaciones de la SIECA, exigen no menos de tres agregados acopiados en la planta, cada uno con granulometría distinta), los cuales se detallaron en el capítulo II referente a agregados pétreos, todos los ensayos son muy importantes, pero el que más influye a la hora de realizar el diseño es el ensayo de análisis granulométrico, ya que la granulometría que presentan las muestras de los diferentes

agregados debe ser la que realmente tiene el agregado en bruto apilado en la planta, y ésta información es la que se utiliza para establecer una combinación de los diferentes agregados para que estos cumplan con una determinada especificación que esté de acuerdo a la designación de la mezcla. Si el resultado del análisis granulométrico de los diferentes agregados ó tan sólo de uno de ellos es erróneo, y no es el que realmente presenta el material en bruto apilado, este resultado influirá grandemente a la hora de realizar el diseño. Por lo general nunca se acierta en el diseño a la primera vez, y por lo tanto, habrá que realizar correcciones las cuales se hacen en base a las dosificaciones de los agregados.



Figura 4.3. Tamizado de agregados pétreos para determinación de su granulometría.



Figura 4.4. Lavado de agregados para determinar granulometría por vía húmeda.



Figura 4.5. Realización del ensayo de gravedad específica al agregado fino.

- Establecimiento de las proporciones de los diferentes tamaños de agregados que intervendrán en el diseño, realizándose una combinación teórica, siendo esta calculada por un método adecuado de combinación, o un método por tanteos; y posteriormente la comprobación granulométrica.
- Ya establecidas las proporciones de cada agregado y las diferentes dosificaciones de emulsión que se utilizarán se inicia el mezclado en laboratorio para la realización de las briquetas.



Figura 4.6. Mezcla elaborada, lista para compactar.

- Después que se elaboran las briquetas se da seguimiento a lo que es la esencia del método Marshall, el cual consiste en tres procedimientos: determinación del peso específico total; determinado según ensayo, medición

de la estabilidad y fluencia, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las briquetas (éste análisis es enfocado hacia las cuatro características de la mezcla y su influencia en el comportamiento de la mezcla compactada: Densidad, vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y contenido de asfalto).



Figura 4.7. Elaboración de briquetas con distintos contenidos de asfalto residual.

- Por último y después de ciertas correcciones en las dosificaciones se logra establecer la fórmula de trabajo, la cual contiene las dosificaciones finales de

cada agregado y el porcentaje de emulsión o cemento asfáltico para que la planta reproduzca la mezcla.

➤ En nuestro caso en primer lugar hicimos pruebas de mezclado, realizando dicha mezcla a diferentes temperaturas de la emulsión y de los agregados pétreos, siempre respetando el rango de 80-100 °C para los agregados y de 40-80 °C para la emulsión asfáltica, se realizaron pruebas calentando los agregados pétreos a 100°C y la emulsión a 40 °C, no obteniendo buenos resultados respecto al recubrimiento esperado por parte del asfalto en los agregados, otra prueba calentando los agregados a 90°C y la emulsión a 40°C, también obteniendo malos resultados; así se realizaron más pruebas variando las temperaturas hasta determinar que la mejor combinación de temperaturas es de 80°C para los agregados y 60°C para la emulsión asfáltica, con estas temperaturas el recubrimiento fue satisfactorio, cabe recalcar que experimentamos con varios de tipos de emulsión, con una de rompimiento rápido (CQS), otra de rompiendo medio (CMS) y con una de rompimiento lento (CSS), obteniendo mejores resultados con la última.

Nota: Las temperaturas de 80°C para los agregados y de 60°C para la emulsión para el mezclado, podrían variar si se utiliza otro tipo de emulsión y otro tipo de agregados.

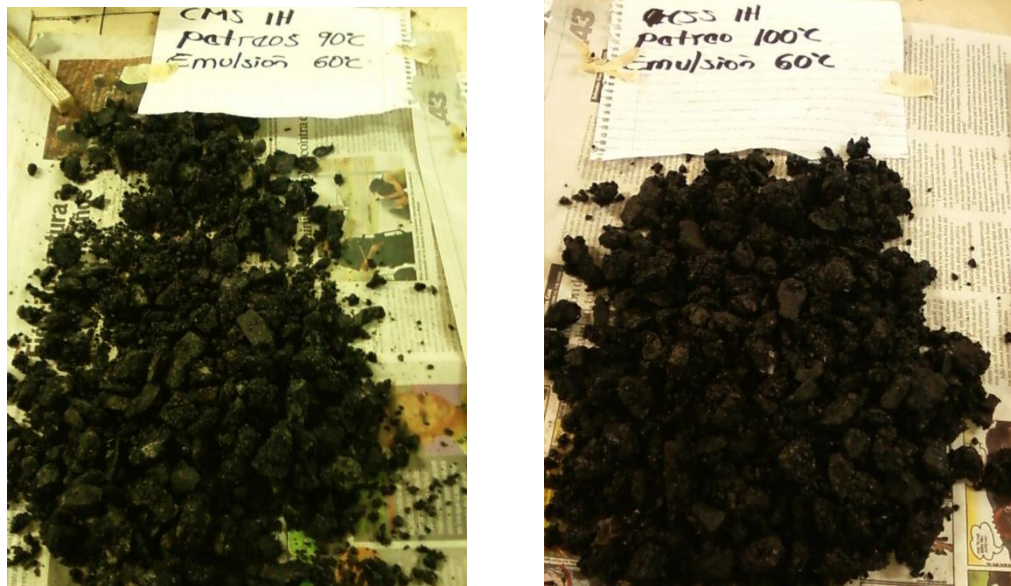


Figura 4.8. Pruebas de recubrimiento a diferente temperatura.

Ya realizados los ensayos a los agregados pétreos y conociendo su granulometría se prosiguió a los cálculos teóricos del contenido óptimo de asfalto y de la combinación a utilizar en los agregados, utilizando como primera combinación para el diseño la de 52% grava y 48% de arena triturada.

Se optó realizar pruebas a briquetas que estén 2% de asfalto por arriba del óptimo y 2% por debajo, variando en 0.5% de asfalto cada grupo de briquetas y haciendo 6 briquetas por punto de asfalto.

Con la combinación definida y nuestras bandas de trabajo, se determinaron los pesos que se requerían de material por cada tamiz utilizado, siempre respetando las especificaciones de la granulometría del método de diseño SUPERPAVE.

Ya con los pesos de cada tamiz mezclados proseguimos a realizar la mezcla para las briquetas, antes calculando el contenido de emulsión a agregar a dichos agregados para obtener el residuo asfáltico deseado, utilizando la siguiente fórmula.

$C.A. = C.E. * 0.6$; donde

C.A.: Es el contenido de asfalto de la mezcla

C.E. Es el contenido de emulsión que se requiere en la mezcla

0.6: Factor de conversión ya que la emulsión tiene un 60% de residuo asfáltico.

Ejemplo: Para obtener un residuo asfáltico de 5.5% en nuestras briquetas, teniendo una masa de agregados pétreos de 1200 g. la cantidad de asfalto a agregarle a los agregados es:

$1200 \text{ g} * 0.055 = 66 \text{ gr}$ de cemento asfáltico.

Ahora utilizando la fórmula anterior:

$66 \text{ g} = C.E. * 0.6$

$C.E. = 66 / 0.6 = 110 \text{ gr.}$ de emulsión asfáltica a agregar a los agregados pétreos.

Conociendo la cantidad de emulsión que tenemos que agregar para realizar la mezcla, proseguimos a calentar los pétreos y la emulsión a las temperaturas antes mencionadas, llegando a dicha temperatura se agrega la emulsión a los

agregados y se mezcla vigorosamente por un promedio de 1min. Luego la mezcla se coloca en el molde para proceder inmediatamente a compactarla en el compactador Marshall, para nuestro caso aplicándole una energía de compactación de 75 golpes por cara.

Ya con las briquetas compactadas procedemos al curado de las mismas, dejándolas en el molde por aproximadamente 24 horas, al pasar dicho tiempo sacamos del molde las briquetas y las continuamos secando al aire libre, determinando su peso cada día, hasta obtener peso constante, es decir la mayoría de agua contenida en la briqueta se ha evaporado o ha sido expulsada de la misma.

Cuando le dimos el curado apropiado a las briquetas, aproximadamente de diez días, procedimos a ensayarlas en la máquina Marshall para obtener la estabilidad y el flujo de cada briqueta, con dichos resultados realizamos los cálculos y gráficos que establece el diseño Marshall, para determinar el porcentaje óptimo de asfalto para nuestro diseño.



Figura 4.9. Briquetas listas para ensayarlas, después de su respectivo curado.

4.7 DOSIFICACION DE AGREGADOS

La dosificación de agregados tiene por objeto lograr una mezcla cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada que para nuestro caso es la graduación SUPERPAVE en la que se evita que la granulometría propuesta entre en los rangos de la zona prohibida que se indican en los gráficos presentes. Para hacer la combinación de agregados se cuenta con procedimientos analíticos y gráficos; dentro de estos el método de prueba y error es el más utilizado, ya que con la ayuda de programas de computación como Excel es muy fácil elaborar tablas de cálculos y establecer una combinación de varios agregados, por su puesto se debe tener la granulometría de cada agregado a ser combinado. El método descrito a

continuación es el método analítico el cual es más utilizado y el que se llevo a cabo para la realización del trabajo de graduación.

4.7.1 METODO ANALÍTICO.

4.7.1.1 Dosificación para Dos Agregados

La fórmula general básica para la combinación de agregados, sin importar el número de agregados o el método utilizado para establecer las proporciones, es la siguiente:

$$P = G \times a + F \times b + M \times c \dots \text{etc}, \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

P = es el porcentaje de material que pasa un tamiz dado para la combinación de agregados, G, F, M, etc...

G, F, M, etc...= porcentaje de material que pasa un tamiz dado para los agregados.

a, b, c, etc...= proporciones de agregados G, F, M, etc. Usadas en la combinación y cuyo total es 1.

El proceso de dosificación resulta relativamente simple cuando se trata de la mezcla de dos agregados; tal es el caso uno grueso y por consiguiente el otro fino, identificados como G y F respectivamente.

Una primera aproximación se obtiene al calcular el porcentaje que se requiere del material fino (F) de forma tal que se cumpla con la media de la especificación para el tamiz No. 200.

Por lo tanto la Ecuación para dos agregados es:

$$G \times a + F \times b = P \quad \text{Ec. 2}$$

Debido a que:

$$a + b = 1 \quad \text{Ec. 3}$$

Sustituyendo y despejando b tenemos:

$$b = \frac{P - G}{F - G} \quad \text{Ec. 4}$$

También tenemos para a:

$$a = \frac{P - F}{G - F} \quad \text{Ec. 5}$$

4.7.1.2 Granulometría de los dos agregados a ser combinados

Para el diseño de la mezcla asfáltica templada se utilizarán dos tipos de agregados, una grava con tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " y una arena triturada cuyos resultados granulométricos se muestran a continuación.

Tabla 4.3 Granulometría de los agregados a ser combinados.

TAMIZ	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
TAMIZ (mm)	25,00	19,00	12,50	9,50	4,75	2,36	1,18	0,600	0,300	0,15	0,075
% PASA GRAVA	100,0	100,0	49,0	17,0	3,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
% PASA ARENA	100,0	100,0	100,0	100,0	95,0	62,0	40,0	27,0	18,0	12,0	8,0

4.7.1.3 Límites de graduación granulométrica para mezcla con tamaño máximo nominal de 19.0mm.

ITEM DE CONTROL	TAMAÑO DEL TAMIZ, MM	MINIMO, %	MAXIMO,%
PUNTOS DE CONTROL	25	100	100
	19	90	100
	2,36	23	49
	0,075	2	8
ZONA RESTRINGIDA	2,36	34,6	34,6
	1,18	22,3	28,3
	0,6	16,7	20,7
	0,3	13,7	13,7

Tabla 4.4 Puntos de control y zona restringida de la gráfica granulométrica.

Tomado del libro "Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE"

Página 49, primera edición, 1998.

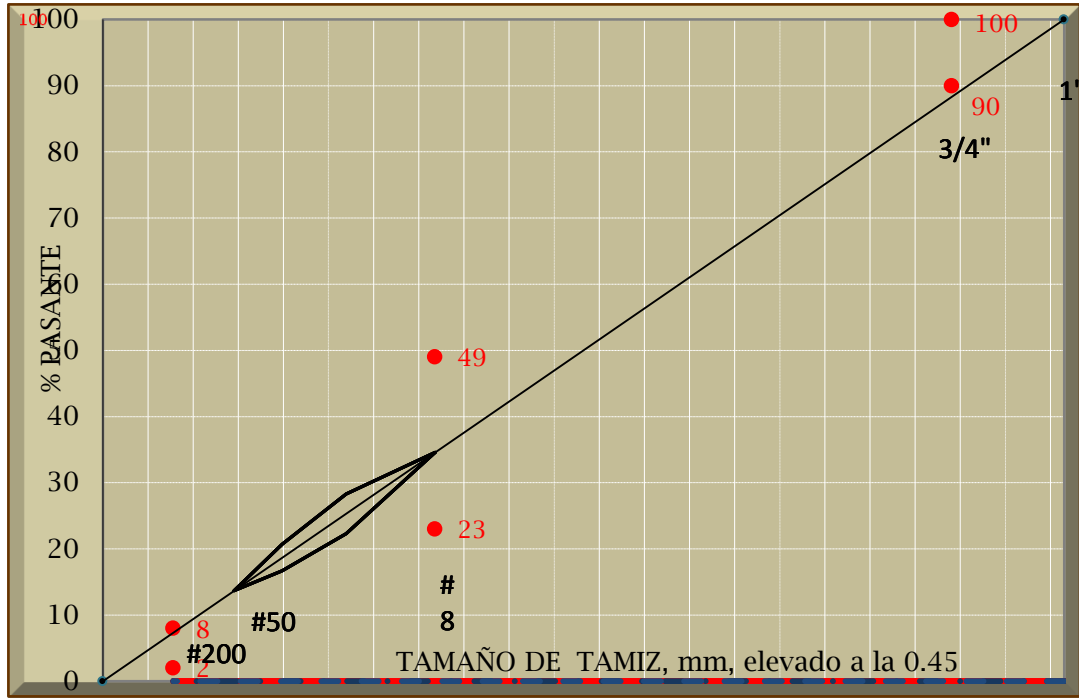


Figura 4.10. Curva de máxima densidad establecida según la metodología SUPERPAVE, Para un tamaño máximo nominal de 19.0mm.

4.7.1.4 Combinación de diseño para mezcla asfáltica templada.

Tomando la ecuación N° 1.

$$P = G \times a + F \times b + M \times c \dots \text{etc,} \quad \text{Ec. 1}$$

Para nuestro caso la ecuación de combinación se reduce a dos agregados quedando de la siguiente manera:

$$G \times a + F \times b = P \quad \text{Ec. 2}$$

$$a + b = 1 \quad \text{Ec. 3}$$

Tomando la ecuación 4 para encontrar el factor para los agregados finos y considerando el tamiz N°8 que servirá de parámetro del valor P para sacar la combinación.

Tenemos que para el tamiz numero N° 8 de la tabla 4.5 establece un valor P de combinación que debe ser mayor a 23% pero menor a 34.6% para garantizar de esta manera que la combinación propuesta está bajo la curva de máxima densidad del método SUPERPAVE y evite el límite de la zona prohibida. Pero que además no debe de alejarse demasiado la combinación propuesta porque se estaría diseñando una mezcla asfáltica demasiado gruesa.

Se considera un valor de $P = 31.0\%$

$P = 31.0$, $G = 2$, $F = 62$

$$b = \frac{P - G}{F - G} \quad \text{Ec. 4}$$

$$b = \frac{31 - 2}{62 - 2} \quad b = 0.48$$

De ecuación N°3

$$a + 0.48 = 1 \quad a = 0.52$$

Con los factores de a y b se prosigue a la realización de la combinación teórica tal como se muestra en la tabla 4.5

4.7.1.5 Combinación teórica.

ANÁLISIS DE COMBINACIONES												
TAMIZ		1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
TAMIZ (mm)		25,00	19,00	12,50	9,50	4,75	2,36	1,18	0,600	0,300	0,15	0,075
% PASA GRAVA		100,0	100,0	49,0	17,0	3,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
% PASA ARENA		100,0	100,0	100,0	100,0	95,0	62,0	40,0	27,0	18,0	12,0	8,0
F.GRAVA	0,52	52	52	26	9,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0
F.ARENA	0,48	48	48	48,0	48,0	46,0	30,0	19,5	13,0	8,6	5,8	4,0
CURVA TEORICA		100,0	100,0	74	57,0	47,0	31,0	20,0	14,0	9,0	6,0	4,0

Tabla 4.5 Combinación teórica de dos agregados

Ejemplo:

Para el tamiz de 1" se tiene que el porcentaje de material que pasa tanto el agregado grueso como fino es de 100% por lo que al multiplicar el valor de 100% por cada uno de los factores se reduce.

$$100 \times 0.52 \text{ (factor de combinación para grava)} = 52\%$$

$$100 \times 0.48 \text{ (factor de combinación para grava)} = 48\%$$

De esta misma manera se multiplica el porcentaje que pasa de cada tamiz por cada uno de los factores de combinación.

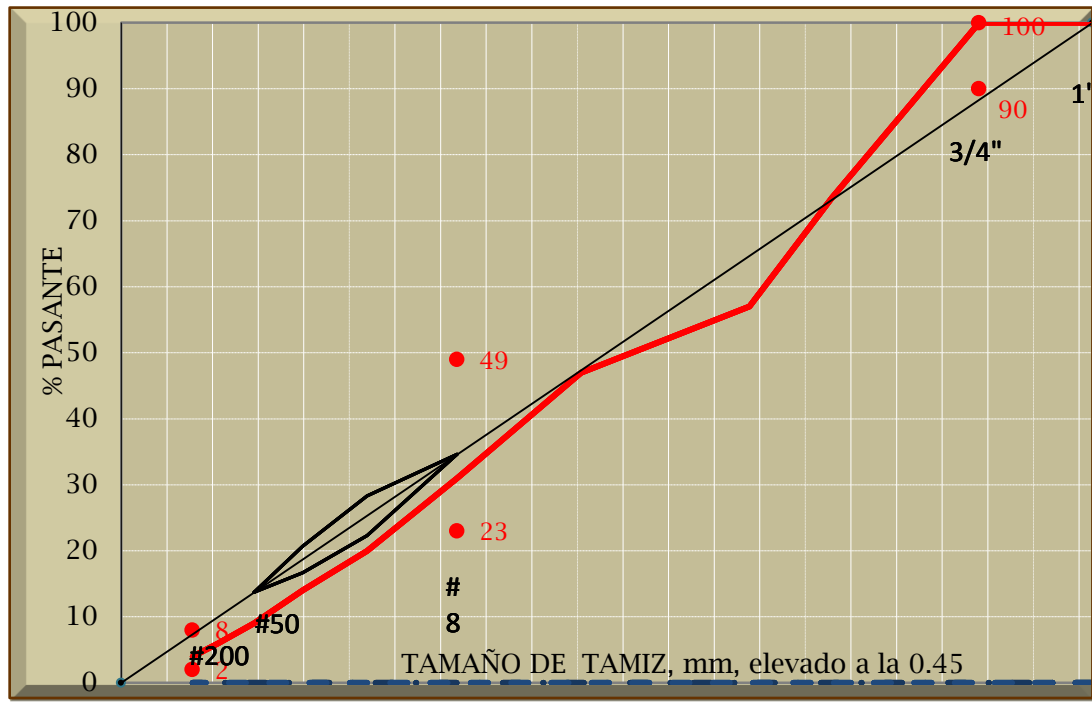


Figura 4.11 Gráfico de combinación teórica propuesta (bajo la curva de máxima densidad).

4.7.1.6 Análisis de la combinación.

Con la combinación teórica realizada se tiene que establecer bandas de control que servirán de parámetro para garantizar que la mezcla asfáltica tendrá resultados aceptables siempre y cuando este dentro los límites establecidos. Además se prosigue a la realización de una combinación en laboratorio a la cual se le hará una granulometría de la combinación con la finalidad de verificar si la combinación teórica se reproduce en laboratorio.

Tabla 4.6 Análisis de las combinaciones de dos agregados

ANÁLISIS DE COMBINACIONES												
TAMIZ	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N°30	N°50	N°100	N°200	
TAMIZ (mm)	25,00	19,00	12,50	9,50	4,75	2,36	1,18	0,600	0,300	0,15	0,075	
% PASA GRAVA	100,0	100,0	49,0	17,0	3,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	
% PASA ARENA	100,0	100,0	100,0	100,0	95,0	62,0	40,0	27,0	18,0	12,0	8,0	
F.GRAVA	0,52	52	52	26,0	9,0	1,0	1,0	0,5	0,6	0,6	0,6	0,0
F.ARENA	0,48	48	48	48,0	48,0	46,0	30,0	19,5	13,4	8,1	5,4	3,6
CURVA TEORICA	100	100	74	53,0	47,0	31,0	20,0	14,0	9,0	6,0	4,0	
BANDA 1	100	100	69,0	50,0	40,0	26,0	17,0	11,0	8,0	5,0	3,0	
BANDA 2	100	100	76,0	60,0	51,0	33,0	21,0	15,0	10,0	7,0	4,0	

Bandas de control según la variaciones de la tabla SIECA

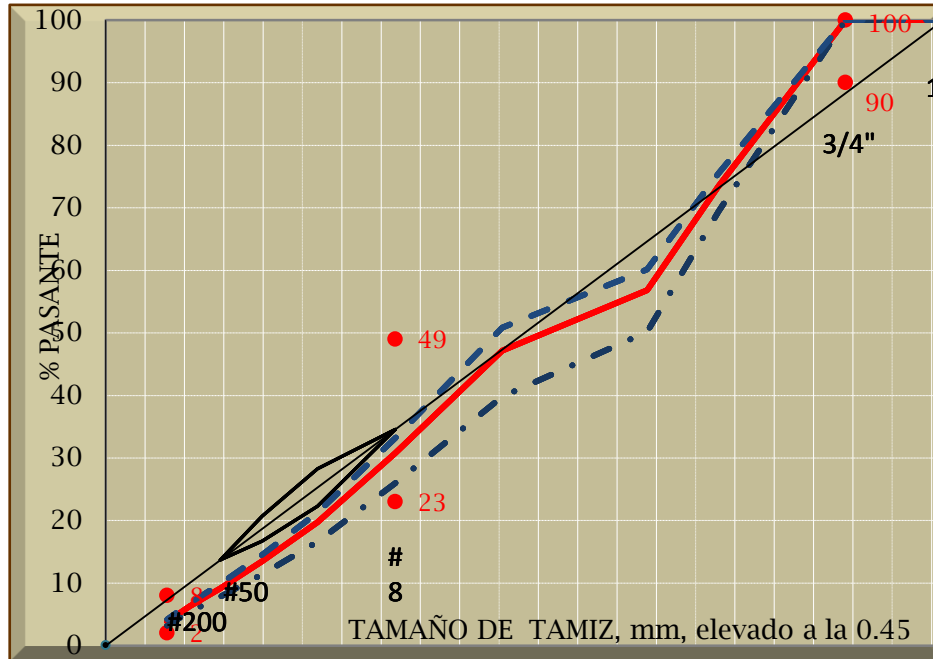


Figura 4.12 Gráfico de bandas de trabajo y curva de combinación.

4.7.2 Combinación de laboratorio.

Para comprobar que la combinación propuesta puede reproducirse en planta y garantizar con ello el control de la granulometría de producción se procede a una comprobación que consiste en:

Se hará una granulometría según la norma AASHTO T-11 para una cantidad de material que en total será de 2500gr. La cual será afectada por los factores de combinación de 0.48 para arena y 0.52 para grava y de esta manera se

tomarán los pesos respectivos y procederá a combinarlos y posterior a ello se les hará el ensayo de granulometría.

Peso de arena a combinación = $2500\text{gr} \times 0.48 = 1200.0\text{gr}$

Peso de grava a combinación = $2500\text{gr} \times 0.52 = 1300.0\text{gr}$

TAMIZ	PESO RETENIDO(gr)	% RETENIDO	% ACUMULADO	% QUE PASA	% QUE PASA DE COMBINACION TEORICA
3/4"	0	0,0	0,0	100,0	100,0
1/2"	777,2	31,0	31,0	69,0	74,0
3/8"	373,2	15,0	46,0	54,0	53,0
Nº4	263,4	10,0	56,0	44,0	47,0
Nº8	417,6	17,0	73,0	27,0	31,0
Nº16	258,2	10,0	83,0	17,0	20,0
Nº30	146,6	6,0	89,0	11,0	14,0
Nº50	92	4,0	93,0	7,0	9,0
Nº100	64,9	2,0	95,0	5,0	6,0
Nº200	41,9	2,0	97,0	3,0	4,0
PASA Nº200	63,9	3,0	100,0	0,0	

Tabla 4.7 Análisis granulométrico según la norma AASHTO T-11.

Por lo que se observa en el cuadro de granulométrico de la combinación realizada, vemos que la combinación de laboratorio es muy similar a la combinación teórica por lo que se da por aceptado los factores de combinación.

4.7.3 Estimación del porcentaje óptimo de asfalto.

La estimación del porcentaje óptimo de asfalto es de gran ayuda, y se realiza utilizando la relación propuesta por manual básico de mezclas en frío MS-19 y también por la metodología SUPERPAVE, estas dos metodologías proporcionan un valor de asfalto óptimo teórico y a partir de éste se establecen los demás porcentajes de asfalto para el diseño, tomando como referencia el valor de contenido de asfalto que dé como resultado de la fórmula, se tomarán dos puntos arriba y dos puntos abajo del valor obtenido variando en 0.5% para cada punto.

4.7.3.1 Relación propuesta por el manual básico de mezclas en frío MS-14.

$$P = 0.05a + 0.1b + 0.5c \quad \text{Ec 6}$$

Donde:

P = porcentaje de asfalto estimado por peso total de la mezcla

a = porcentaje de material pétreo que pasa el tamiz N° 8.

b = porcentaje de material que pasa el tamiz No. 8 y se retiene en la No. 200.

c = porcentaje de material que pasa la malla No. 200.

Utilizando la tabla 4.8 que contiene la granulometría de la combinación de diseño.

$$a = 29\%$$

$$b = (\% \text{ pasa No. 8}) - (\% \text{ pasa No. 200}) = 29 - 4 = 25$$

$$c = (\% \text{ pasa No. 200}) = 4$$

Sustituyendo en la ecuación Ec 6; tenemos:

$$P = 0.05a + 0.1b + 0.5c$$

$$P = 0.05 (29) + 0.1(25) + 0.5(4)$$

$$P = 5.9\% , \text{ se aproxima a}$$

$$P = 6.0 \% \text{ de Cemento Asfáltico,}$$

4.7.3.2 Relación propuesta por el Manual de Diseño de Mezclas Asfálticas SUPERPAVE.

SUPERPAVE para el diseño de mezclas asfálticas considera más valores y relaciones por lo que se indican una serie de fórmulas propuestas para obtener el contenido óptimo de asfalto estimado de la mezcla de diseño.

4.7.3.3 Procedimiento para la obtención del contenido óptimo de asfalto SUPERPAVE.

Primero se calcula la gravedad específica aparente combinada de la mezcla de los agregados.

Gsa = gravedad especifica aparente

$$Gsa.g(\text{grava}) = 2.708$$

$$Gsa.a (\text{arena}) = 2.689$$

$$Gsa (\text{combinada}) = \frac{1}{\frac{P_1}{100G_1} + \frac{P_2}{100G_2} + \dots + \frac{P_n}{100G_n}}$$

$$Gsa (\text{combinada}) = \frac{1}{\frac{55}{100(2.708)} + \frac{45}{100(2.689)}} = 2.696$$

Gravedad especifica bulk combinada de la mezcla de los agregados.

Gsb = gravedad especifica bulk

$$Gsb.g (\text{grava}) = 2.556$$

$$Gsb.a (\text{arena}) = 2.474$$

$$Gsb (\text{combinada}) = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

$$Gsb (\text{combinada}) = \frac{55 + 45}{\frac{55}{2.556} + \frac{45}{2.474}} = 2.516$$

Con las aparentes y bulk combinadas se procede a calcular:

Gravedad especifica efectiva (Gse) de la mezcla de diseño.

$$Gse = Gsb + 0.8 (Gsa - Gsb)$$

$$Gse = 2.516 + 0.8 (2.696 - 2.516)$$

$$Gse = 2.66$$

Se necesita calcular el volumen de ligante asfáltico (V_{ba}) absorbido en el agregado para su posterior utilización en otra fórmula.

$$V_{ba} = \frac{P_s (1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}} \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right)$$

Donde:

V_{ba} = es el volumen absorbido del ligante, cm^3/cm^3 de mezcla

P_b = es el porcentaje de ligante (se ha supuesto 5% solo como parámetro).

P_s = es el porcentaje de agregado (considerando para ello 95%).

G_b = gravedad especifica del ligante (gravedad especifica de emulsión para nuestro caso).

Va = es el volumen de vacios de aire (se fija el valor de 0.04cm³/cm³ porque es el valor ideal de diseño a obtener).

Sustituyendo datos:

$$Vba = \frac{0.95(1 - 0.04)}{\frac{0.05}{1.012} + \frac{0.95}{2.66}} \left(\frac{1}{2.516} - \frac{1}{2.66} \right)$$

$$Vba = 0.04826$$

Volumen de ligante efectivo (vbe)

$$Vbe = 0.081 - 0.02931 \times (\ln(Sn))$$

Donde:

Sn = es el tamaño máximo nominal de la mezcla de agregados (en pulgadas).

$$Sn = \frac{3}{4} \text{ in}$$

$$Vbe = 0.081 - 0.02931 \times (\ln(3/4))$$

$$Vbe = 0.0894$$

Finalmente, el contenido de prueba inicial del ligante asfáltico se calcula con:

$$P_{bi} = \frac{G_b(V_{be}+V_{ba})}{G_b(V_{be}+V_{ba})+W_s} * 100$$

Donde:

P_{bi} = es el porcentaje del ligante óptimo SUPERPAVE (en peso de la mezcla)

W_s = es el peso del agregado en gramos

$$W_s = (P_s*(1-V_a))/(P_b/G_b+P_s/G_s)$$

Encontrando W_s :

$$W_s = (0.95*(1-0.04))/(0.05/1.012 + 0.95/2.66) = 2.245$$

Sustituyendo datos:

$$P_{bi} = \frac{1.012(0.0894+0.04826)}{1.012(0.0894+0.04826)+2.245} * 100 = 5.84\% \text{ (en peso de la mezcla)}$$

Por lo que se puede apreciar las variaciones del contenido teórico óptimo de asfalto calculado según la metodología del manual básico de mezclas en frío MS-14 y el calculado según SUPERPAVE son muy similares y queda por comprobar cual se acercará más al contenido óptimo que resulte de los ensayos de laboratorio del diseño a reproducir.

4.7.4 Dosificación para las briquetas de prueba.

Se realizarán cinco puntos de contenidos de ligante asfáltico que variarán en un valor de 0.5% para cada punto, para ello se ha tomado de base el contenido óptimo de asfalto obtenido de la metodología SUPERPAVE.

NOTA: Según la metodología SUPERPAVE el contenido óptimo de ligante asfáltico es de 5.8%, pero este dato nos parece muy alto por lo que se redondeara su valor a 5.5% y se realizarán las pruebas con 4.5%, 5%, 5.5%, 6.0%, 6.5% de ligante asfáltico, cumpliendo para ello con los dos puntos abajo y dos arriba del contenido óptimo obtenido de la metodología SUPERPAVE.

4.8 PROCEDIMIENTO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MEZCLAS EN FRÍO PROPUESTA POR LA UNIVERSIDAD DE ILLINOIS.

La metodología de diseño de mezclas asfálticas en frío propuesta por la Universidad de Illinois establece que se realizarán 6 briquetas por cada punto de ligante asfáltico.

NOTA: Para nuestro caso el ligante asfáltico es una emulsión asfáltica Catiónica de Rompimiento Lento CSS-1H modificada con EVOTHERM (aditivo especial mejorador de adherencia) y tiene un contenido de agua de 40%, por lo que se tiene que considerar para ello que se tendrá que agregar más emulsión a cada punto para que una vez pierda la humedad quede de residuo para cada punto solo el ligante asfáltico.

4.8.1 Procedimiento de dosificación para cada briqueta.

Para este diseño la dosificación se hará por peso por lo que se realizará una separación de cada material tanto grava como arena por cada tamaño de tamiz, y según el porcentaje de ligante asfáltico y peso de agregado, se agregará a cada briqueta el peso de cada tamiz correspondiente.

Tabla 4.8 Dosificación para el contenido de ligante asfáltico de 4.5%

PORCENTAJE DE LIGANTE ASFÁLTICO DE 4,5%			PESO DE BRIQUETA DE 1200gr		
AGREGADO GRUESO			AGREGADO FINO		
TAMIZ (Pulg)	TAMIZ (mm)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)
1"	25,00				
3/4"	19,00				
1/2"	12,50	50,60	301,5		
3/8"	9,50	31,90	190,1		
4	4,75	14,90	88,8	5,00	27,5
8	2,36			33,00	188,3
16	1,18			22,00	124,4
30	0,600			13,00	73,5
50	0,300			9,00	50,9
100	0,150			6,00	34,4
200	0,075			4,00	23,4
FONDO				8,00	45,4
		SUMA	580,4	SUMA	567,7
TOTAL DE AGREGADO gr					1148,1

Ejemplo:

Primer paso: Como se tiene que el porcentaje de ligante es de 4.5%, este porcentaje es correspondiente al peso de la briqueta que para nuestro caso es de 1200gr.

NOTA: El peso de las briquetas es de 1200gr porque según ensayos realizados este es el peso con el que se logra obtener una briqueta compactada con una altura de 63mm, valor que nos establece la norma AASHTO T- 245 para el ensayo de Estabilidad y Flujo de cada briqueta.

El porcentaje en peso de ligante asfáltico se calcula de la siguiente manera:

Para 4.5% de ligante el peso correspondiente es de $1200\text{gr} \times 4.5\% = 54\text{gr}$

NOTA: Como para este caso el ligante asfáltico que usaremos es una emulsión con un 40% de agua tenemos que agregar más emulsión para cuando pierda el agua, el ligante residual sea de 54gr de asfalto.

Eso se calcula de la siguiente manera $54\text{gr}/0.6 = 90\text{gr}$ de emulsión.

Ahora bien de 90gr de emulsión el 40% es agua y 60% es asfalto. Este procedimiento se realizará para 4.5%,5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5% correspondiente a cada punto de ligante a evaluar.

Para los agregados se calcula de la siguiente manera:

El porcentaje de agregado es de 95.5% por lo que se tiene que $1200\text{gr} \times 95.5\%$
 $= 1146\text{gr}$

Para la dosificación:

Para este ejemplo tomaremos de base el tamiz de $\frac{1}{2}$ Pulg. del agregado grueso, en el cual tenemos que 12.50% es el porcentaje retenido en el tamiz de $\frac{1}{2}$ pulg y el factor de combinación para las gravas es de 0.52 entonces tenemos:

$50.6\% \times 0.52$ (factor de combinación para gravas) $\times 1146$ (peso de agregados para cada briqueta) $= 301.5\text{gr}$ peso a agregar de agregado grueso retenido en el tamiz de $\frac{1}{2}$ pulg.

Para el caso de las arenas es el mismo procedimiento según el ejemplo que a continuación se muestra.

Tomaremos de base el tamiz N° 50 del agregado fino, el en cual tenemos que 9.0% es el porcentaje retenido en el tamiz N°50 y el factor de combinación de para la arena es de 0.48.

$9.0\% \times 0.48 \times 1146\text{gr} = 50.9\text{gr}$

Este mismo procedimiento se sigue para cada briqueta de diseño.

Tabla 4.9 Combinación de agregado grueso y fino para 5.0% asfalto.

PORCENTAJE DE LIGANTE ASFALTICO DE 5,0%			PESO DE BRIQUETA DE 1200gr		
AGREGADO GRUESO			AGREGADO FINO		
TAMIZ (Pulg)	TAMIZ (mm)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)
1"	25,00				
3/4"	19,00				
1/2"	12,50	50,60	300,0		
3/8"	9,50	31,90	189,1		
4	4,75	14,90	88,3	5,00	27,4
8	2,36			33,00	187,4
16	1,18			22,00	123,8
30	0,600			13,00	73,2
50	0,300			9,00	50,6
100	0,150			6,00	34,2
200	0,075			4,00	23,2
FONDO				8,00	45,1
		SUMA	577,4	SUMA	564,8
TOTAL DE AGREGADO gr					1142,2

Tabla 4.10 Combinación de agregado grueso y fino para 5.5% asfalto.

PORCENTAJE DE LIGANTE ASFALTICO DE 5,5%			PESO DE BRIQUETA DE 1200gr		
AGREGADO GRUESO			AGREGADO FINO		
TAMIZ (Pulg)	TAMIZ (mm)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)
1"	25,00				
3/4"	19,00				
1/2"	12,50	50,60	298,4		
3/8"	9,50	31,90	188,1		
4	4,75	14,90	87,9	5,00	27,2
8	2,36			33,00	186,4
16	1,18			22,00	123,1
30	0,600			13,00	72,8
50	0,300			9,00	50,3
100	0,150			6,00	34,0
200	0,075			4,00	23,1
FONDO				8,00	44,9
		SUMA	574,3	SUMA	561,9
TOTAL DE AGREGADO gr					1136,3

Tabla 4.11 Combinación de agregado grueso y fino para 6.0% asfalto.

PORCENTAJE DE LIGANTE ASFALTICO DE 6,0%			PESO DE BRIQUETA DE 1200gr		
AGREGADO GRUESO			AGREGADO FINO		
TAMIZ (Pulg)	TAMIZ (mm)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)
1"	25,00				
3/4"	19,00				
1/2"	12,50	50,60	296,8		
3/8"	9,50	31,90	187,1		
4	4,75	14,90	87,4	5,00	27,1
8	2,36			33,00	185,5
16	1,18			22,00	122,5
30	0,600			13,00	72,4
50	0,300			9,00	50,1
100	0,150			6,00	33,8
200	0,075			4,00	23,0
FONDO				8,00	44,7
		SUMA	571,3	SUMA	559,1
TOTAL DE AGREGADO gr					1130,4

Tabla 4.12 Combinación de agregado grueso y fino para 6.5% asfalto.

PORCENTAJE DE LIGANTE ASFALTICO DE 6,5%			PESO DE BRIQUETA DE 1200gr		
AGREGADO GRUESO			AGREGADO FINO		
TAMIZ (Pulg)	TAMIZ (mm)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)	%RETENIDO	PESO AGREGAR (gr)
1"	25,00				
3/4"	19,00				
1/2"	12,50	50,60	295,2		
3/8"	9,50	31,90	186,1		
4	4,75	14,90	86,9	5,00	26,9
8	2,36			33,00	184,5
16	1,18			22,00	121,9
30	0,600			13,00	72,0
50	0,300			9,00	49,8
100	0,150			6,00	33,7
200	0,075			4,00	22,9
FONDO				8,00	44,4
		SUMA	568,3	SUMA	556,2
		TOTAL DE AGREGADO gr			1124,5

CAPITULO V
ANÁLISIS E
INTERPRETACIÓN DE
RESULTADOS

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El procedimiento de la mezcla asfáltica, abarca trabajo de laboratorio y el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados a la mezcla, a continuación se describe cada uno de los procedimientos empleados en laboratorio.

5.1 TRABAJO DE LABORATORIO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA.

Luego de la elaboración de briquetas, el método Marshall comprende la realización de los siguientes ensayos:

- ✓ Gravedad Especifica Bulk de Mezclas Asfálticas Compactadas Utilizando Especímenes Saturados Superficialmente Secos, AASHTO T 166
- ✓ Gravedad Especifica Teórica Máxima y Densidad de Mezclas Bituminosas para Pavimentación, AASHTO T 209
- ✓ Resistencia al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Utilizando Equipo Marshall, AASHTO T 245

5.1.1 Gravedad Específica Bulk.

El método de ensayo cubre la determinación de la gravedad específica bulk de especímenes de mezclas asfálticas compactados. Se define de la siguiente forma:

Gravedad específica bulk (de sólidos), es la relación del peso en aire por unidad de volumen de un material permeable (incluyendo los poros permeables e impermeables del material) a una temperatura determinada al peso en aire de igual densidad, de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura especificada.

Este ensayo es aplicable luego de la compactación, extracción de los moldes y posterior enfriamiento de las briquetas de mezcla asfáltica y se procede según lo indicado en la norma AASHTO T 166 "Gravedad Específica Bulk de Mezclas Asfálticas Compactadas Utilizando Especímenes Saturados Superficialmente Secos".

A continuación se presentan los datos necesarios y los cálculos de la gravedad específica bulk de cada punto porcentual de residuo asfáltico de las briquetas ensayadas.



Figura 5.1 Ensayo de Gravedad Específica Bulk

Tabla 5.1 Gravedad Específica Bulk de briquetas con 4.5%, 5.0%, 5.5% de residuo asfáltico.

Residuo asfáltico (%)	No de briqueta	Peso seco en aire,(grs)	Peso saturado superficialmente seco (grs)	Peso sumergido (grs)	Gravedad específica Bulk (Gsb)
4.5	I	1057.6	1076.1	594.5	2.196
	II	1050.3	1071.4	578.5	2.131
	III	1025.8	1039.8	571.7	2.191
	IV	1030.1	1053.3	574.5	2.151
	V	1054.8	1073.5	587.7	2.171
	VI	1039.3	1062.6	578.4	2.146
				Promedio	2.158
5.0	I	1036.5	1051.4	575.1	2.176
	II	1010.3	1022.5	560.3	2.186
	III	1048.1	1060.3	578.9	2.177
	IV	1050.9	1064.8	581.4	2.174
	V	1056.4	1070.4	583.7	2.171
	VI	1019.7	1034.8	564.7	2.169
				Promedio	2.175
5.5	I	1040.9	1049.8	576.9	2.201
	II	1074.9	1084.3	590.9	2.179
	III	1047.9	1058.4	579.0	2.186
	IV	1041.3	1051.3	577.6	2.198
	V	1046.3	1057.0	576.6	2.178
	VI	1085.0	1090.7	603.7	2.228
				Promedio	2.188

Tabla 5.2 Gravedad Específica Bulk de briquetas con 6.0%, 6.5% de residuo asfáltico.

Residuo asfáltico (%)	No de briqueta	Peso seco en aire,(grs)	Peso saturado superficialmente seco (grs)	Peso sumergido (grs)	Gravedad específica Bulk (Gsb)
6.0	I	1087.4	1101.4	607.0	2.199
	II	1045.8	1056.2	576.4	2.180
	III	1094.3	1107.3	605.0	2.179
	IV	1058.6	1072.8	589.3	2.189
	V	1043.5	1050.8	575.5	2.195
	VI	1058.1	1061.9	587.4	2.230
				Promedio	2.189
6.5	I	1055.9	1059.4	583.2	2.217
	II	1057.2	1055.5	583.8	2.241
	III	1039.9	1044.7	569.9	2.190
	IV	1036.1	1036.2	573.8	2.241
	V	1037.8	1039.0	570.5	2.215
	VI	1050.1	1049.4	581.4	2.244
				Promedio	2.232

5.1.2 Gravedad Específica Teórica Máxima.

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, se necesitará de la determinación de la Gravedad Específica Teórica Máxima, para cada contenido residual de asfalto, el procedimiento adoptado es el sugerido en la norma AASHTO T 209. La precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño, además es preferible medir la gravedad específica teórica máxima por duplicado o triplicado.

Este ensayo representa la máxima densidad que puede presentar una mezcla asfáltica, ya que no considera vacíos en la muestra por estar en condición suelta, únicamente es la densidad de solo las partículas de agregado cubiertas de asfalto. El ensayo además es complementario de la gravedad específica bulk, ya que con dichos valores de gravedades específicas, se determina el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica.

La gravedad específica teórica máxima para cada diferente contenido de asfalto residual se determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Gravedad Específica Teórica Máxima} = \frac{A}{A+D-E}$$

Dónde:

A= masa de muestra seca en horno, en aire, g.

D= masa de picnómetro lleno con agua a 25 °C (77 °F), g.

E= masa de picnómetro lleno con agua y muestra a 25 °C (77 °F), g.

A continuación se presentan los datos obtenidos de laboratorio para la determinación de la gravedad específica teórica máxima.

Ejemplo de cálculo para una briqueta de 4.5 % de residuo asfáltico.

Briqueta I:

Los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio son los siguientes:

Peso de picnómetro aforado : 3536.1 grs.

Peso de muestra seca en horno: 1439.2 grs.

Peso de pic. Aforado +muestra +agua: 4362.9 grs

Realizando el cálculo mediante la ecuación:

$$\text{Gravedad Especifica Teórica Máxima} = \frac{1439.2}{1439.2 + 3536.1 - 4362.9}$$

Gravedad Especifica Teórica Máxima= 2.35

En la Tabla 5.3 se muestra un resumen de la gravedad específica teórica máxima calculada con los demás puntos de residuo asfáltico.

Residuo asfáltico (%)	Peso picnómetro aforado, grs	Peso de muestra, grs	Peso pic+agua+muestra, grs	Gravedad específica teórica máx.
4.5	3536.1	1439.2	4362.9	2.35
5.0	3536.1	1355.9	4311.1	2.33
5.5	3536.1	1140.5	4183.5	2.31
6.0	3536.1	1418.1	4335.2	2.29
6.5	3536.1	1382.5	4310.9	2.27

Tabla 5.3 Resultados de Gravedad Específica Teórica Máxima.



Figura 5.2 Mezclas con diferente porcentaje de asfalto para ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima.

5.1.3 Resistencia al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Utilizando el Equipo Marshall, AASHTO T 245.

El ensayo cubre la determinación de la resistencia al flujo plástico de especímenes cilíndricos de mezclas bituminosas para pavimentación, los cuales son cargados en la superficie lateral por medio del equipo Marshall.

El valor de la estabilidad Marshall es una medida de la carga, bajo la cual un espécimen cede o falla totalmente. Durante el ensayo, la carga se aplica lentamente a una razón de movimiento constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min), mientras las quijadas (cabezales) superior e inferior del aparato se acercan, hasta que la carga máxima es alcanzada y la carga decrece como es indicada por el dial.

Se registra la carga máxima indicada por el dial, la cual corresponde al valor de estabilidad Marshall y representa la resistencia que presenta una mezcla asfáltica a la deformación.

Por otro lado, el valor de la fluencia Marshall, es obtenido a través de un medidor de flujo, el cual registra la deformación de la briqueta en centésimas de pulgada.

La metodología Marshall Modificada, sugiere la elaboración de un total de 30 briquetas, de las cuales 15 se les determina su estabilidad y fluencia en condición seca, mientras las 15 briquetas restantes, se someten a un ensayo de inmersión y vacío parcial, para luego determinar su estabilidad y flujo

Los resultados del ensayo de estabilidad y flujo que fueron obtenidos con las 15 briquetas en estado seco, son los que se presentan en la Tabla 5.4



Figura 5.3 Ensayo de estabilidad y flujo.



Figura 5.4 Briquetas sometidas a saturación y vacío parcial, antes de determinar su estabilidad y flujo.

Residuo asfáltico	No Briqueta	Lect. Dial	Flujo (0.01 pulg)
4.5%	I	148	10
	III	130	12
	V	117	14
5.0%	I	125	12
	II	120	11
	III	110	15
5.5%	I	110	12
	IV	120	13
	VI	140	16
6.0%	I	112	13
	V	110	15
	VI	128	15
6.5%	II	90	15
	IV	115	13
	VI	107	16

Tabla 5.4 Resultados estabilidad y flujo de briquetas ensayadas en seco.

Cabe mencionar, que de las 30 briquetas que se realizaron, luego de haber determinado la densidad Bulk de cada briqueta, éstas se agruparon según su valor de dicha densidad. De esta manera se definió para cada punto porcentual de residuo asfáltico, ensayar en estado seco aquellas briquetas que presentaran los valores de densidad Bulk más altos, dejando los valores bajos para ser ensayadas luego en estado saturado tal como lo indica la metodología de diseño.

Los resultados del ensayo de estabilidad y flujo con briquetas saturadas luego de inmersión y vacío parcial, son los de la Tabla 5.5

Residuo asfáltico	No Briqueta	Lect. Dial	Flujo (0.01 pulg)
4.5%	II	106	13
	IV	dañada	---
	VI	105	7
5.0%	IV	110	9
	V	102	13
	VI	115	11
5.5%	II	115	10
	III	113	12
	V	120	14
6.0%	II	92	12
	III	110	15
	IV	114	15
6.5%	I	105	16
	III	98	13
	V	102	14

Tabla 5.5 Resultados de estabilidad y flujo de briquetas ensayadas en condición saturada.

Como puede observarse en las tablas anteriores, se ha obtenido directamente el valor de flujo (en centésimas de pulgada), y una lectura del dial del aparato Marshall. Esta lectura debe ser convertida mediante una ecuación para obtener el verdadero valor de estabilidad Marshall.

A continuación se presenta un ejemplo, de cómo se convierten las lecturas obtenidas, en los valores verdaderos de estabilidad.

La ecuación del anillo de carga es la siguiente:

$$\text{Estabilidad} = \text{Lect.}^2 \times A + \text{Lect.} \times B + C \quad (\text{Lbs})$$

Dónde:

Lect. = son los valores leídos en el dial.

A= - 0.0036

B= 33.05043

C= -84.7057

Para una briqueta con 4.5% de residuo asfáltico se tiene:

Briqueta I:

Lect. = 148

Flujo = 10

Evaluando la ecuación anterior:

$$\text{Estabilidad} = \text{Lect.}^2 \times A + \text{Lect.} \times B + C \quad (\text{Lbs})$$

$$\text{Estabilidad} = (148)^2 \times (-0.0036) + 148 \times (33.05043) + (-84.7057)$$

$$\text{Estabilidad} = 4727.90 \text{ Lbs}$$

De esta forma se obtienen los valores de estabilidad de cada una de las briquetas ensayadas. Sin embargo debido a que cada una de las briquetas presenta variación respecto a la altura de 63.5 mm que se especifica en la norma para una briqueta, estos valores de estabilidad es necesario afectarlos por un factor de corrección de estabilidad, dichos factores son los que se presentan en la Tabla 5.6

Volumen de Espécimen, cm ³	Espesor Aproximado de Espécimen, 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

Tabla 5.6 Factores de corrección de estabilidad para briquetas de diferente volumen.

5.1.3.1 Cálculo de estabilidad corregida.

La corrección se realiza de la siguiente manera:

Para una briqueta de 4.5 % de residuo asfáltico.

Briqueta I:

Se restan el peso saturado superficialmente seco y el peso sumergido de la briqueta.

$$W_{sss} - W_{sum} = 1076.1 - 594.5 = 481.6$$

Este valor representa el volumen en cm^3 de la briqueta ensayada, comparando con los valores de volumen de la Tabla 5.6 Se observa que está en el rango de 471 a 482 cm^3 . Por lo que le corresponde un factor de corrección de 1.14

La estabilidad corregida se obtiene, multiplicando dicho factor de corrección por el valor de estabilidad obtenido anteriormente, de la siguiente forma:

$$\text{Estabilidad corregida} = 4727.90 \times 1.14$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 5389.81 \text{ Lbs.}$$

Y así se calcula para cada una de las briquetas ensayadas, luego se procede a calcular la estabilidad y el flujo promedio para cada punto porcentual de residuo asfáltico, valores que servirán posteriormente en el diseño.

Tabla 5.7 Estabilidades Corregidas para 4.5%, 5.0%, 5.5% de residuo asfáltico.

Residuo Asfáltico	No Briqueta	Lectura Estabilidad	Volumen de briqueta (cm ³)	Rango de Volumen	Espesor aproximado de especimen, pulg.	mm	Factor de Corrección	Estabilidad Corregida (Lbs)
4.5%	I	4727.90	481.60	471-482	2 5/16	58.7	1.14	5389.81
	II	3378.19	492.90	483-495	2 3/8	60.3	1.09	3682.23
	III	4151.01	468.10	457-470	2 1/4	57.2	1.19	4939.70
	IV	---	---	---	---	---	---	---
	V	3732.91	485.80	483-495	2 3/8	60.3	1.09	4068.87
	VI	3345.90	484.20	483-495	2 3/8	60.3	1.09	3647.03
5.0%	I	3990.35	476.30	471-482	2 5/16	58.7	1.14	4549.00
	II	3829.51	462.20	457-470	2 1/4	57.2	1.19	4557.12
	III	3507.28	481.40	471-482	2 5/16	58.7	1.14	3998.30
	IV	3507.28	483.40	483-495	2 3/8	60.3	1.09	3822.94
	V	3248.98	486.70	483-495	2 3/8	60.3	1.09	3541.39
	VI	3668.48	470.10	457-470	2 1/4	57.2	1.19	4365.49
5.5%	I	3507.28	472.90	471-482	2 5/16	58.7	1.14	3998.30
	II	3668.48	493.40	483-495	2 3/8	60.3	1.09	3998.64
	III	3604.02	479.40	471-482	2 5/16	58.7	1.14	4108.58
	IV	3829.51	473.70	471-482	2 5/16	58.7	1.14	4365.64
	V	3829.51	480.40	471-482	2 5/16	58.7	1.14	4365.64
	VI	4471.79	487.00	483-495	2 3/8	60.3	1.09	4874.25

Residuo Asfáltico	No Briqueta	Lectura Estabilidad	Volumen de briqueta (cm ³)	Rango de Volumen	Espesor aproximado de espécimen, pulg.	mm	Factor de Corrección	Estabilidad Corregida (Lbs)
6.0%	I	3571.78	494.40	483-495	2 3/8	60.3	1.09	3893.24
	II	2925.46	479.80	471-482	2 5/16	58.7	1.14	3335.02
	III	3507.28	502.30	496-508	2 7/16	61.9	1.04	3647.57
	IV	3636.26	483.50	483-495	2 3/8	60.3	1.09	3963.52
	V	3507.28	475.30	471-482	2 5/16	58.7	1.14	3998.30
	VI	4086.77	474.50	471-482	2 5/16	58.7	1.14	4658.92
6.5%	I	3345.90	476.20	471-482	2 5/16	58.7	1.14	3814.33
	II	2860.67	471.70	471-482	2 5/16	58.7	1.14	3261.16
	III	3119.66	474.80	471-482	2 5/16	58.7	1.14	3556.41
	IV	3668.48	462.40	457-470	2 1/4	57.2	1.19	4365.49
	V	3248.98	468.50	457-470	2 1/4	57.2	1.19	3866.29
	VI	3410.47	468.00	457-470	2 1/4	57.2	1.19	4058.46

Tabla 5.8 Estabilidades Corregidas para 6.0%, 6.5% de residuo asfáltico.

Tabla 5.9 Estabilidad corregida briquetas ensayadas en estado seco.

Residuo asfáltico	No briqueta	Volumen de briqueta (cm3)	lectura de estabilidad	Factor de corrección	Estabilidad corregida (Lbs)	Flujo (0.01 pulg)
4.5%	I	481.60	4727.90	1.14	5389.81	10.0
	III	468.10	4151.01	1.19	4939.70	12.0
	V	485.80	3732.91	1.09	4068.87	14.0
	Promedio				4799.46	12.0
5.0%	I	476.30	3507.28	1.14	3998.30	12.0
	II	462.20	3248.98	1.19	3866.29	11.0
	III	481.40	3668.48	1.14	4182.07	15.0
	Promedio				4015.55	12.7
5.5%	I	472.90	3507.28	1.14	3998.30	12.0
	IV	473.70	3829.51	1.14	4365.64	13.0
	VI	487.00	4471.79	1.09	4874.25	16.0
	Promedio				4412.73	13.7
6.0%	I	494.40	3571.78	1.09	3893.24	13.0
	V	475.30	3507.28	1.14	3998.30	15.0
	VI	474.50	4086.77	1.14	4658.92	15.0
	Promedio				4183.49	14.3
6.5%	II	471.70	2860.67	1.14	3261.16	15.0
	IV	462.40	3668.48	1.19	4365.49	13.0
	VI	468.00	3410.47	1.19	4058.46	16.0
	Promedio				3895.04	14.7

Tabla 5.10 Estabilidad corregida briquetas ensayadas en estado saturado

Residuo asfáltico	No briqueta	Volumen de briqueta (cm3)	Lectura de estabilidad	Factor de corrección	Estabilidad corregida (Lbs)	Flujo (0.01 pulg)
4.5%	II	492.90	3378.19	1.09	3682.23	13.0
	IV	----	----	----	----	----
	VI	484.20	3345.90	1.09	3647.03	7.0
	Promedio				3664.63	10.0
5.0%	IV	483.40	3990.35	1.09	4349.48	9.0
	V	486.70	3829.51	1.09	4174.17	13.0
	VI	470.10	3507.28	1.19	4173.66	11.0
	Promedio				4232.44	11.0
5.5%	II	493.40	3668.48	1.09	3998.64	10.0
	III	479.40	3604.02	1.14	4108.58	12.0
	V	480.40	3829.51	1.14	4365.64	14.0
	Promedio				4157.62	12.0
6.0%	II	479.80	2925.46	1.14	3335.02	12.0
	III	502.30	3507.28	1.04	3647.57	15.0
	IV	483.50	3636.26	1.09	3963.52	15.0
	Promedio				3648.71	14.0
6.5%	I	476.20	3345.90	1.14	3814.33	16.0
	III	474.80	3119.66	1.14	3556.41	13.0
	V	468.50	3248.98	1.19	3866.29	14.0
	Promedio				3745.67	14.3

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO.

Esta etapa del diseño comprende específicamente el análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las briquetas ensayadas, para tal fin es necesaria la realización de una serie de cálculos con los datos obtenidos en laboratorio para obtener de esta forma ciertos valores que nos permitirán elaborar los gráficos correspondientes y necesarios para obtener el contenido óptimo de asfalto de diseño de la mezcla.

El análisis comprende principalmente la determinación de:

- ✓ Densidad
- ✓ Vacíos de aire
- ✓ Vacíos en el agregado mineral
- ✓ Vacíos llenos de asfalto

5.2.1 Análisis de la densidad.

Para cada serie de briquetas, la densidad es calculada multiplicando la Gravedad Específica Bulk por el valor de la densidad del agua a la temperatura de ensayo (25 °C), el cual tiene un valor de 1000 kg/m³ ó 62.4 Lb/pe³.

Los valores de densidad obtenidos para cada punto porcentual de residuo asfáltico, se muestran en la Tabla 5.11.

Residuo asfáltico (%)	Grav. Esp. Bulk (Gsb)	Densidad del agua (Lb/pie3)	Densidad (Lb/pie3)
4,5	2,158	62,4	134,6592
5,0	2,176	62,4	135,7824
5,5	2,188	62,4	136,5312
6,0	2,189	62,4	136,5936
6,5	2,232	62,4	139,2768

Tabla 5.11 Densidad por cada punto de residuo asfáltico.

5.2.2 Análisis de vacíos de aire.

Los vacíos de aire se pueden definir como el volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactada, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla de pavimento compactado.

En mezclas asfálticas densas, este valor de vacíos según las especificaciones, debe estar en el rango de 3 a 5%.

Existe una relación entre la gravedad específica bulk y la teórica máxima, esta última no contempla vacíos en su muestra, mientras que una briqueta compactada si posee vacíos en su interior, por lo tanto si el procedimiento se ha efectuado correctamente, la gravedad específica bulk siempre será menor que la gravedad específica teórica máxima.

La fórmula para calcular el porcentaje de vacíos es la siguiente:

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

Dónde:

Pa= vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Gmt= Gravedad específica máxima teórica de la mezcla de pavimentación.

Gmb= Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

Como ejemplo de cálculo para una briqueta con 4.5% de asfalto residual se tiene:

Briqueta I:

Gmt= 2.35

Gmb= 2.158

Haciendo uso de la ecuación, se tiene:

$$P_a = 100 \times \frac{2.35 - 2.158}{2.35} = 8.2$$

En la Tabla 5.12. Se presentan los porcentajes de vacíos (Pa) según el contenido de asfalto residual.

Residuo asfáltico (%)	Gravedad Esp. Teórica máx. (Gmt)	Gravedad Específica bulk (Gsb)	Porcentaje de vacíos (Pa)
4.5	2.35	2.158	8.2
5.0	2.33	2.176	6.6
5.5	2.31	2.188	5.3
6.0	2.29	2.189	4.4
6.5	2.27	2.232	1.7

Tabla 5.12 Porcentajes de vacíos para cada contenido de residuo asfáltico.

5.2.3 Análisis de vacíos en el agregado mineral.

Los vacíos en el agregado mineral (VMA), se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total.

El VMA puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado, y expresarse como un porcentaje del volumen de mezcla asfáltica compactada. Por tanto, el VMA puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

La ecuación utilizada para determinar los vacíos en el agregado mineral (VMA) es la siguiente:

$$VMA= 100 - \left(\frac{Gsb \times Ps}{Gmb}\right)$$

Dónde:

VMA= vacíos en el agregado mineral (porcentaje del total de la mezcla)

Gsb= Gravedad específica bulk de la combinación de agregados.

Gmb= Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

Ps= Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

Como ejemplo de cálculo, para un contenido de asfalto residual de 4.5% se tiene:

$$Gsb= 2.158$$

$$Gmb= 2.516$$

$$Ps= 95.5$$

Haciendo uso de la ecuación anterior:

$$VMA= 100 - \left(\frac{2.158 \times 95.5}{2.516}\right)= 18.09$$

En la Tabla 5.13. Se presentan los valores calculados para los demás contenidos de asfalto residual.

Residuo asfáltico (%)	Porcentaje de agregado (Ps)	Grav. Esp. Bulk de briqueta (Gsb)	Grav. Esp. Bulk combinada (Gmb)	VMA (%)
4.5	95.5	2.158	2.516	18.09
5.0	95.0	2.176	2.516	17.84
5.5	94.5	2.188	2.516	17.82
6.0	94.0	2.189	2.516	18.22
6.5	93.5	2.232	2.516	17.05

Tabla 5.13 Resultados de Vacíos de Agregado Mineral.

5.2.4 Análisis de vacíos llenos de asfalto (VFA).

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

El VMA abarca asfalto y aire, mientras que el VFA solamente abarca el asfalto que une a los agregados (asfalto efectivo), el valor de VFA se expresa generalmente como un porcentaje.

La ecuación que determina el VFA es la siguiente:

$$VFA = \frac{VMA - Pa}{VMA} \times 100$$

Dónde:

VFA= Vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VMA.

VMA= Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del total de la mezcla.

Pa= Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Como ejemplo de cálculo para un contenido de 4.5% de asfalto residual se tiene:

VMA= 18.09

Pa= 8.17

Haciendo uso de la ecuación anterior se tiene:

$$VFA = \frac{18.09 - 8.17}{18.09} \times 100 = 54.83\%$$

En la Tabla 5.14 se presentan los valores obtenidos para los demás contenidos de asfalto residual.

Residuo asfáltico (%)	VMA (%)	Vacíos (Pa)%	VFA (%)
4.5	18.09	8.17	54.83
5.0	17.84	6.61	62.95
5.5	17.82	5.28	70.36
6.0	18.22	4.41	75.79
6.5	17.05	1.67	90.18

Tabla 5.14 Resultados de Vacíos llenos de Asfalto (VFA).

Con todos los datos anteriormente calculados, ya es posible elaborar los gráficos que contempla el método Marshall, para la elección del contenido óptimo de asfalto.

5.3 ANÁLISIS Y GRÁFICOS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

La metodología de diseño exige que luego de obtener los resultados de todos los ensayos realizados a la mezcla asfáltica; estos sean graficados para poder comprender las características particulares que cada briqueta ensayada presentó al momento del ensayo.

Los gráficos que serán elaborados son los que se mencionan a continuación:

- ✓ Estabilidad seca y húmeda (en Lbs) vs Contenido de asfalto residual (%)
- ✓ Pérdida de estabilidad (%) vs Contenido de asfalto residual (%)
- ✓ Vacíos (%) vs Contenido de asfalto residual (%)
- ✓ VMA (%) vs Contenido de asfalto residual (%)
- ✓ VFA (%) vs Contenido de asfalto residual (%)
- ✓ Densidad vs Contenido de asfalto residual (%)
- ✓ Flujo (0.01 pulg) vs Contenido de asfalto residual (%)
- ✓ Estabilidad retenida (%) vs Contenido de asfalto residual (%)

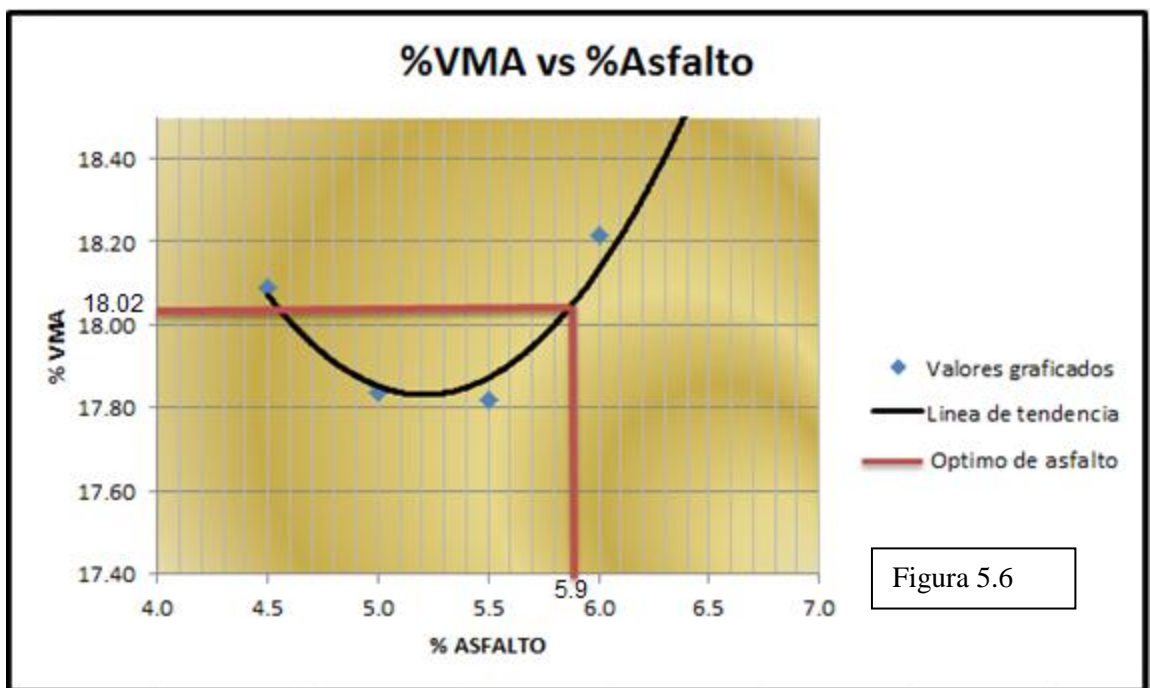
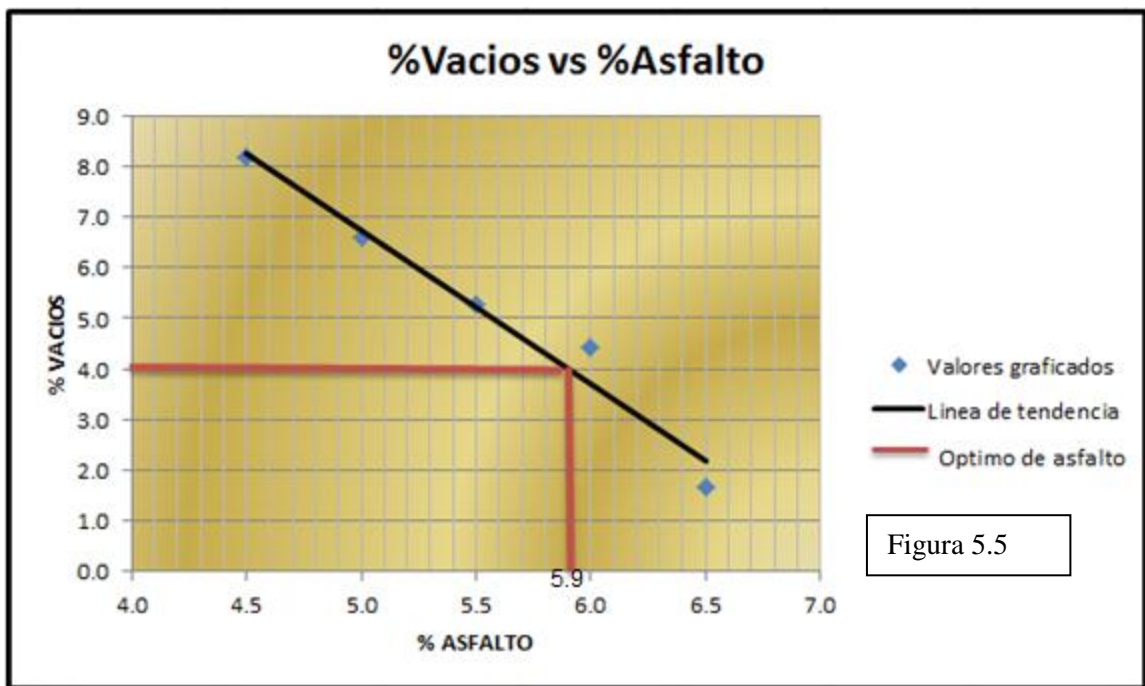


Figura 5.5 y 5.6 Gráfico de Porcentaje de Vacíos vs Asfalto y Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral vs Porcentaje de asfalto.

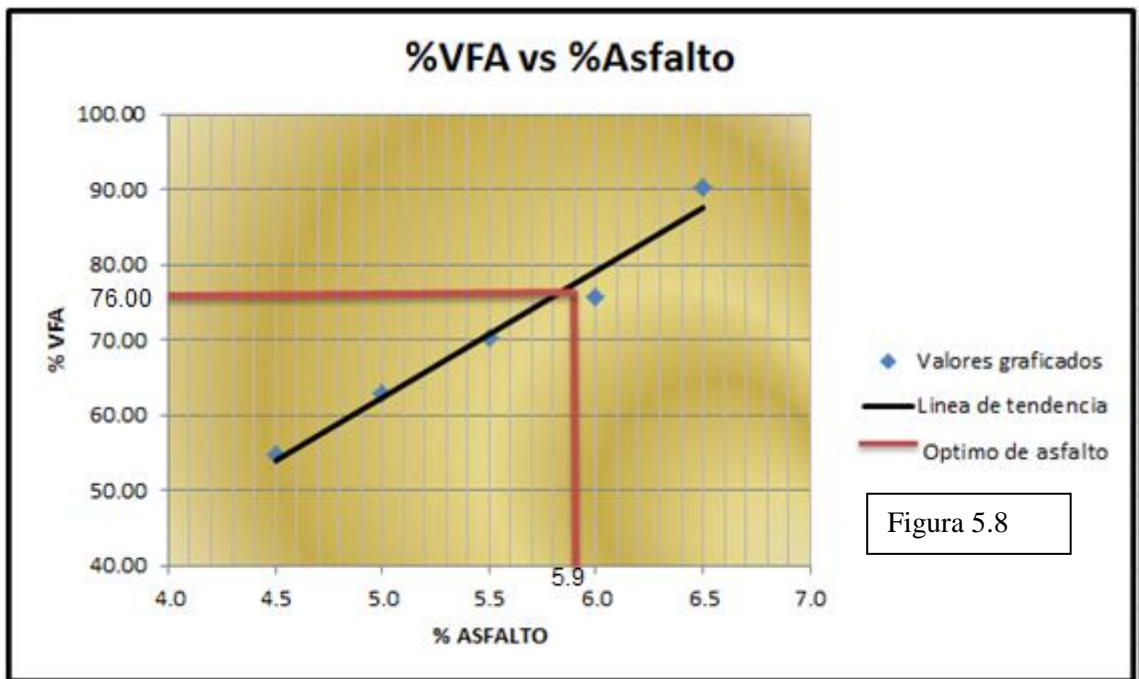
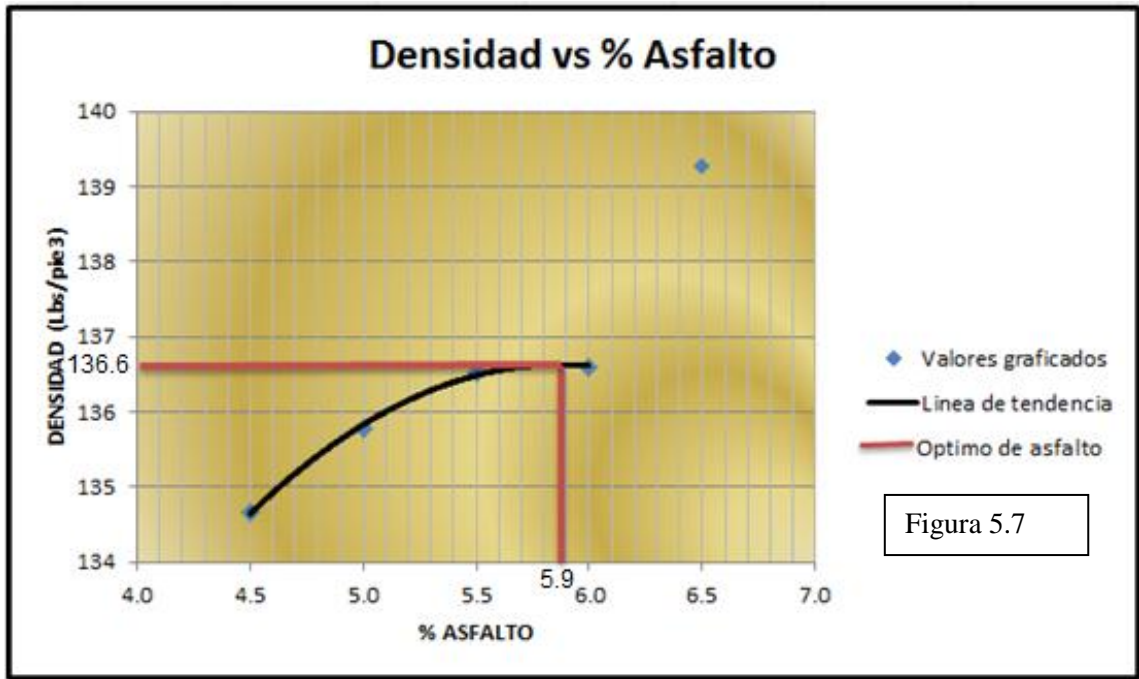


Figura 5.7 y 5.8 Gráficos de Densidad vs Porcentaje de asfalto y Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto vs Porcentaje de asfalto.

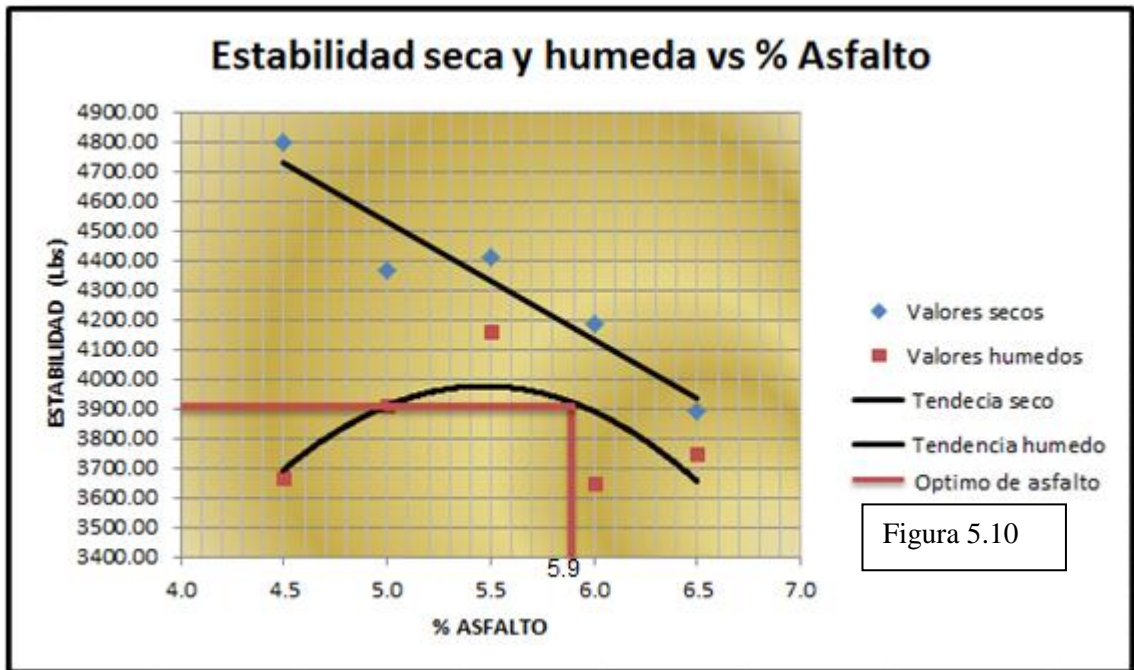
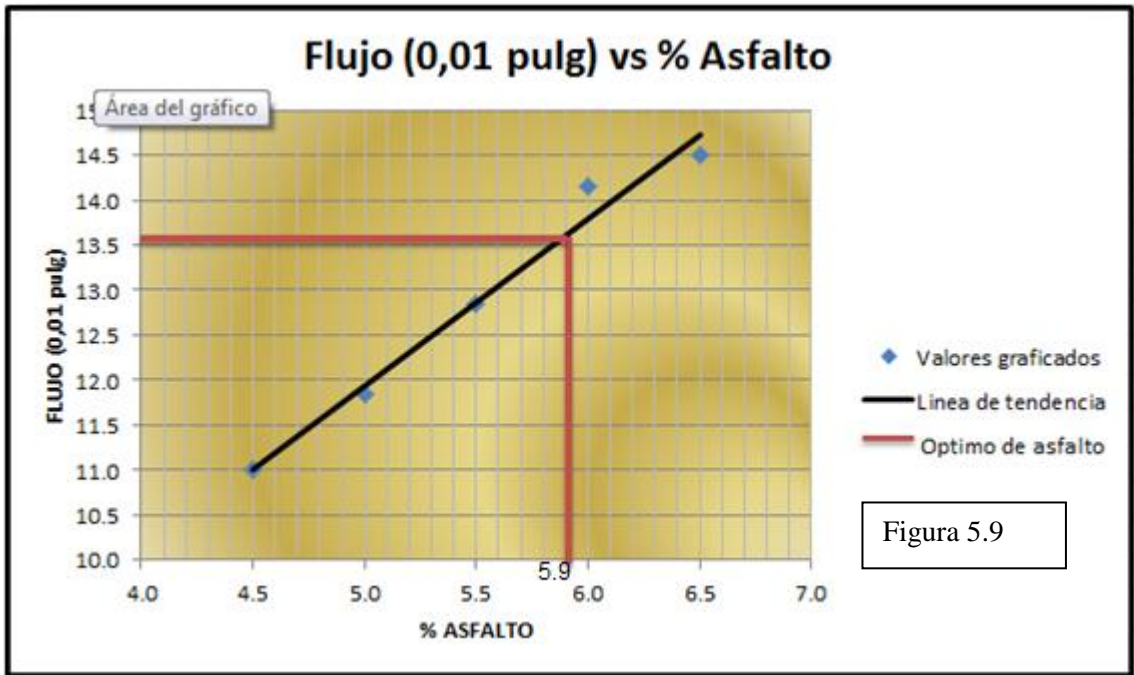


Figura 5.9 y 5.10 Gráficos de Flujo vs Porcentaje de asfalto y Estabilidad seca y húmeda vs Porcentaje de asfalto.

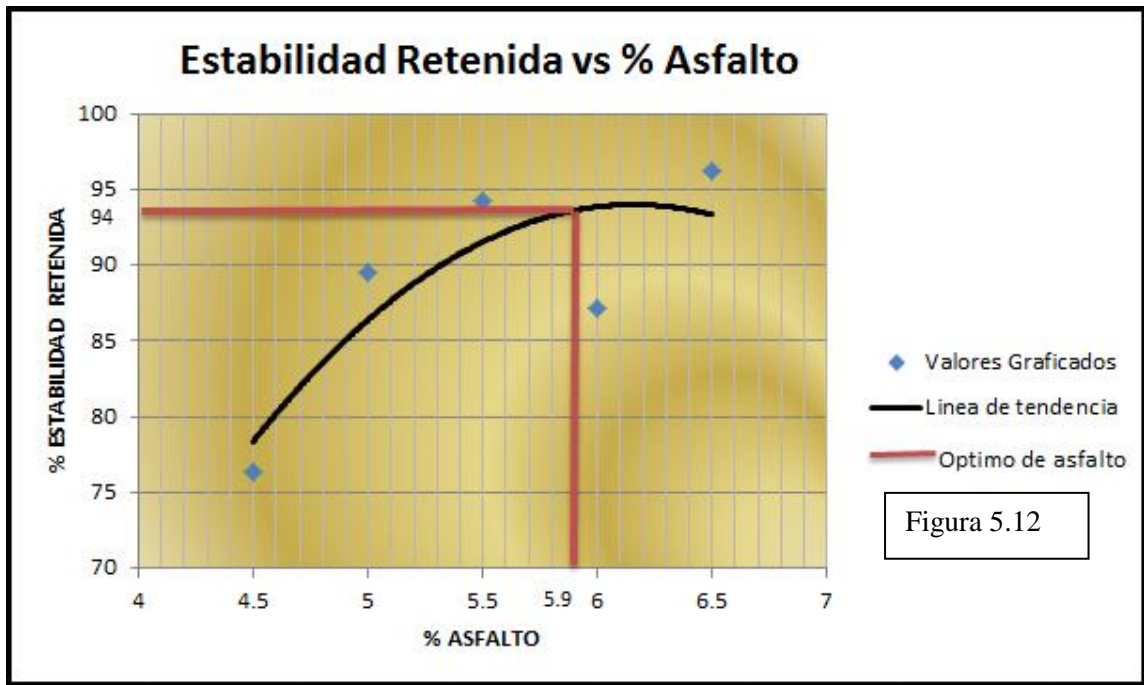
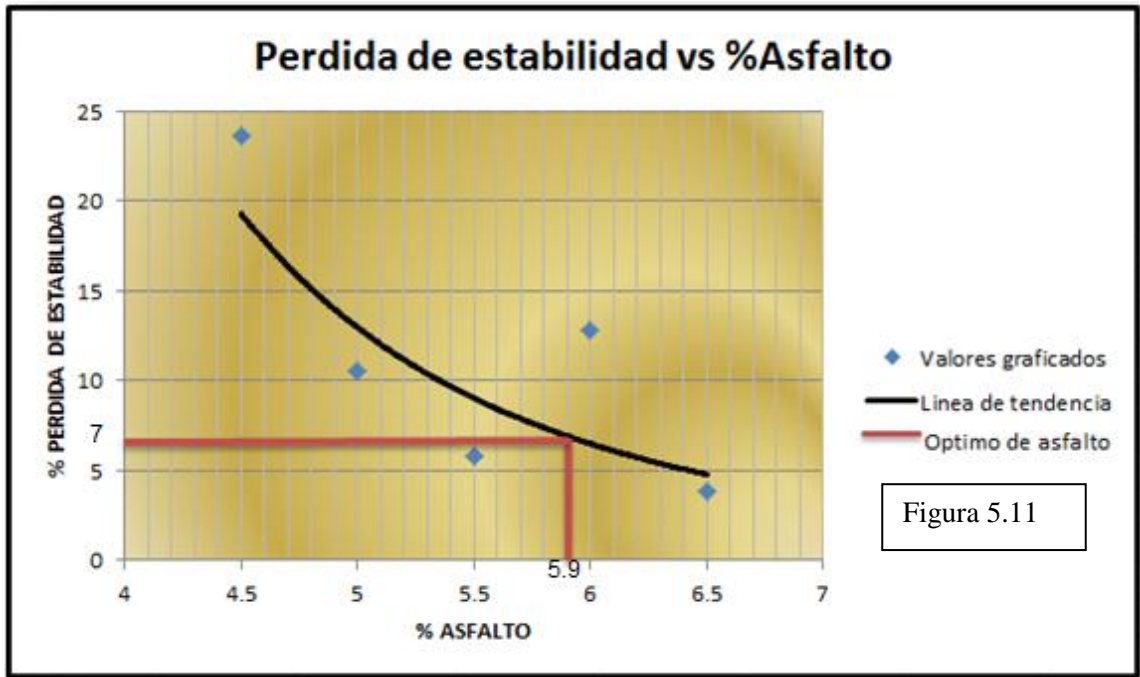


Figura 5.11 y 5.12 Gráfico de pérdida de Estabilidad vs Porcentaje de asfalto y Estabilidad retenida vs Porcentaje de asfalto.

5.3.1 Observaciones y tendencias de las gráficas de diseño.

Los datos graficados usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades particulares de la mezcla asfáltica. A continuación se enuncian ciertas tendencias típicas que se observan al construir dichos gráficos.

- ✓ El contenido de vacíos disminuye a medida que se aumenta el contenido de asfalto.
- ✓ El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VMA), generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con incrementos en el contenido de asfalto.
- ✓ El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (%VFA), aumenta con incrementos en el contenido de asfalto.
- ✓ La curva de densidad de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que la densidad máxima se presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad.
- ✓ Los valores de fluencia aumentan con incrementos en el contenido de asfalto.
- ✓ La curva de estabilidad saturada (luego de inmersión) generalmente muestra un pico con un contenido de asfalto residual particular, mientras la curva de estabilidad en seco muestra una tendencia decreciente con aumentos en el contenido de asfalto residual.

- ✓ La curva de pérdida de estabilidad generalmente decrece con aumentos en el contenido de asfalto residual.

5.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO.

El objetivo de este análisis, es determinar aquel contenido de asfalto residual que cumpla con todos los parámetros de diseño que exigen las especificaciones.

Según la metodología de diseño utilizada, el contenido de asfalto óptimo de la mezcla, se basa en el análisis de la curva de estabilidad saturada (luego de inmersión), de la cual se define aquel valor de asfalto con el cual se obtiene una estabilidad óptima y que a la vez sean cumplidos los demás parámetros de diseño.

Uno de los requisitos muy importantes del método Marshall para análisis de vacíos de mezclas asfálticas densas, es que éstas presenten vacíos entre 3% a 5%. Por lo que se analizó primeramente el gráfico de la figura 5.5. (Vacíos vs %Asfalto) entrando a ella con el valor de 4% de vacíos hasta interceptar la gráfica y leer el contenido de asfalto residual que se obtiene con este porcentaje de vacíos, el valor obtenido fue de 5.9% de asfalto residual.

Con este contenido de asfalto, se procedió a analizar la gráfica de la figura 5.10 (Estabilidad seca y húmeda vs % asfalto), y de esta forma con un 5.9% de

asfalto y tomando como referencia principal la curva de estabilidad húmeda, se determinó un valor de estabilidad de 3900 Lbs.

De esta misma forma (entrando al gráfico con el valor de 5.9% de asfalto residual hasta interceptar la línea de tendencia y luego interceptando el eje de las ordenadas hasta leer el valor del parámetro en consideración), se procedió con los gráficos restantes, obteniendo los siguientes valores:

- ✓ Vacíos= 4%
- ✓ Estabilidad= 3900 Lbs.
- ✓ Flujo (0.01 pulg)= 13.5
- ✓ VMA= 18.02%
- ✓ VFA= 76%
- ✓ Densidad= 136.6 Lbs/pie³
- ✓ Perdida de estabilidad= 7%
- ✓ Estabilidad retenida= 94%

A continuación se presenta una tabla resumen con los valores obtenidos a través de los gráficos en comparación con los valores de las especificaciones utilizadas para el diseño.

Tabla 5.15 Comparación de resultados con las especificaciones de diseño.

Criterios para mezcla del Método Marshall	Valores obtenidos	Criterios del Instituto del asfalto	
		Transito mediano, carpeta y base	
		Mínimo	Máximo
Numero de golpes por cara de la probeta	75	50	-----
Estabilidad (Lbs)	3900	1200	-----
Flujo (0.01 pulg)	13.5	8	16
% de vacios	4	3	5
% VFA	76	65	78
% VMA	18.02	12	-----
% Estabilidad retenida	94	50(i)	-----

(i) Según especificación SIECA, después de inmersión.

Como puede observarse, con un contenido de asfalto residual de 5.9% se cumplen todos los criterios exigidos por las especificaciones, por lo tanto este valor se define como el valor óptimo para una combinación 52% grava 48% arena.

Tabla 5.16 Cuadro resumen de diseño de mezcla asfáltica templada con tamaño máximo de agregado de 3/4", utilizando granulometría SUPERPAVE.

No golpes de martillo		75						Grav. Esp. Combinada			2,516		
Grav. Esp. Asfalto		1,014	Residuo asfáltico (%)	Grav. Esp. Bulk	Grav. Esp. T. max	Densidad (Lb/pie3)	% Vacios	% VMA	% VFA	Estabilidad seca (Lbs)	Estabilidad saturada (Lbs)	% Perdida de estabilidad	Flujo (0,01 pulg)
4,5	2,158	2,35	134,66	8,2	18,09	54,83	4799,46	3664,63	23,6	11,00			
5,0	2,175	2,33	135,78	6,6	17,84	62,95	4368,14	3909,94	10,5	11,85			
5,5	2,188	2,31	136,53	5,3	17,82	70,36	4412,73	4157,62	5,8	12,85			
6,0	2,189	2,29	136,59	4,4	18,22	75,79	4183,49	3648,71	12,8	14,15			
6,5	2,232	2,27	139,28	1,7	17,05	90,18	3895,04	3745,67	3,8	14,50			

5.5 EXPERIMENTOS ADICIONALES A LA MEZCLA ASFALTICA

TEMPLADA.

Como una prueba adicional al diseño de mezcla asfáltica presentado; se reprodujeron cinco briquetas con el contenido óptimo de cemento asfáltico definido para el diseño, el cual fue de 5.9%.

El propósito principal de este experimento fue para poder observar, el efecto producido en la estabilidad y el flujo, al someter tres briquetas a una temperatura de 60 °C durante 30 minutos mediante un baño de María, tal como se evalúa para mezclas asfálticas en caliente.

A la vez, se sometieron las dos briquetas restantes al ensayo cántabro a 300 revoluciones, para evaluar de esta forma la cohesión de la mezcla asfáltica templada.



Figura 5.12 Briquetas con contenido óptimo de asfalto para ensayo Cántabro.



Figura 5.13 Pesado de briquetas después de ser ensayadas por Cántabro.

Los resultados de dichas pruebas son los que se presentan a continuación:

Tabla 5.17 Cuadro resumen ensayo Cantabro.

Residuo asfáltico (%)	No briqueta	Peso inicial	Peso a 100 rev.	Peso a 200 rev.	Peso a 300 rev.	Pérdida total (%)
5,9	IV	1065,8	1027,4	984,7	955,2	10,4
	V	1087,3	1065,9	1051,8	1035,8	4,7
					Promedio	7,6



Figura 5.14 Briquetas con contenido óptimo de asfalto para determinar estabilidad y flujo luego de ser sometidas a baño de María.



Figura 5.15 Briquetas en baño de María a 60 °C

Tabla 5.18 Cuadro resumen de valores obtenidos luego de someter las briquetas a un baño de María a 60 ° C.

Residuo asfáltico (%)	No briketa	Lect. Dial	Volumen (cm3)	Factor de correccion	Estabilidad corregida (Lbs)	Flujo (0.01 pulg)	Parámetros de diseño tránsito mediano, carpeta y base.	
							Estabilidad (Lbs)	Flujo (0.01 pulg)
5.9	I	70	533.1	0.96	2122.74	14	1200	8 a 16
	II	65	521.3	1.0	2048.36	13		
	III	68	520.1	1.0	2146.10	15		
					Promedio	2105.73	14	

5.6 CONCLUSIONES

- Se determinó la proporción de agregados pétreos a través de la fórmula de combinación establecida por el Instituto del Asfalto, llegando a establecer que la combinación granulométrica 52% grava y 48% arena triturada usada para realizar el diseño de la mezcla presentó buenos resultados.
- Luego de la realización de experimentos de prueba y error para determinar la temperatura a la cual los agregados pétreos y la emulsión asfáltica deben calentarse para obtener un buen recubrimiento de los agregados, se determinó que calentando los agregados a 80°C y la emulsión asfáltica a 60°C, se obtiene un mejor recubrimiento.
- Para la elección del tipo de emulsión asfáltica a ser utilizada en el diseño, también se realizaron experimentos de prueba y error, haciendo uso de los siguientes tipos de emulsión asfáltica: CSS-1h, CMS -1h, CSS-1h modificada con kerosene y CSS-1h modificada con Evotherm. Observando cada mezcla de prueba se dedujo que la emulsión CSS-1h con Evotherm presentó notablemente una mejor cobertura del agregado, así como mayor tiempo y facilidad de mezclado, siendo éstos factores

determinantes para utilizar este tipo de emulsión en el diseño de la mezcla asfáltica templada.

- Con los resultados obtenidos luego de ensayar cada una de las briquetas elaboradas y su posterior análisis según lo establecido en la metodología de diseño Marshall Modificado, se determinó que para nuestro diseño el contenido óptimo de cemento asfáltico que satisface todos los requerimientos de las especificaciones utilizadas fue de 5.9% del peso de los agregados.
- De la evaluación por medio de fórmulas para encontrar el contenido teórico óptimo de asfalto utilizando la fórmula propuesta por SUPERPAVE y el Manual Básico de Mezclas en Frío (MS-14), se determinó que la fórmula de SUPERPAVE dio un resultado de 5.84%, valor que es muy cercano al contenido óptimo de asfalto obtenido del diseño de laboratorio que fue de 5.9%, esto es debido a que la metodología SUPERPAVE considera en su fórmula los valores de gravedad específica tanto aparente como Bulk de los agregados combinados a ser utilizados en el diseño de la mezcla.

- Con el contenido óptimo de asfalto, se elaboraron y ensayaron 3 briquetas siguiendo la metodología Marshall para mezclas en caliente, dichas briquetas se sumergieron en baño María durante 30 minutos a una temperatura de 60 °C, y posterior a ello se evaluó la estabilidad y flujo de cada biqueta con lo que se obtuvieron resultados de estabilidad superiores a 2100 lb y flujos de 13-15 centésimas de pulgada, demostrando con ello que ésta mezcla asfáltica templada cumple con los valores mínimos requeridos para tráfico pesado y puede ser diseñada siguiendo la metodología Marshall para mezclas asfálticas en caliente.
- Se evaluó el desgaste en la máquina de los ángeles de 3 briquetas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto, por el método cántabro en seco, obteniéndose resultados que cumplen con los requerimientos establecidos en dicho método, por lo tanto se puede afirmar que los agregados pétreos en la mezcla presentan una buena cohesión.

5.7 RECOMENDACIONES

- Realizar un tramo de prueba para evaluar el desempeño de ésta mezcla asfáltica templada, y con ello garantizar que éste tipo de mezcla se puede utilizar como capa de rodadura en una carretera de tráfico medio ó pesado.
- Para estudios posteriores se recomienda realizar el diseño de mezclas asfálticas templadas para una mezcla del tipo abierta o drenante, para conocer los resultados de este tipo de mezcla asfáltica.

BIBLIOGRAFIA

Libros:

- PRINCIPIOS DE CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE, MS 22, ASPHALT INSTITUTE.
- THE ASPHALT COLD MIX MANUAL MS 14, ASPHALT INSTITUTE.
- BASIC ASPHALT EMULSION MANUAL MS 19, ASPHALT INSTITUTE.
- EMULSIONES ASFALTICAS, GUSTAVO RIVERA E. TERCERA EDICION.
- MANUAL DEL ASFALTO, THE ASPHALT INSTITUTE.

TESIS:

- PINEDA MARTINEZ, JOSÉ TULIO; PROPUESTA DE MANUAL PARA LA ASIGNATURA LABORATORIO DE PAVIMENTOS EN LA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL; TRABAJO DE GRADUACION UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, AÑO 1997
- CORTEZ GARCIA, JOSE MAURICIO; GUIA BASICA DE DISEÑO, CONTROL DE PRODUCCION Y COLOCACION DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE; TRABAJO DE GRADUACION UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, AÑO 2007.
- BONILLA SOLÍS, CARLOS MAURICIO; MANUAL DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS PARA PAVIMENTOS DE BAJA INTENSIDAD DE TRAFICO EN EL SALVADOR, UTILIZANDO CONCRETO HIDRAULICO SIMPLE Y EMULSIONES ASFALTICAS; TRABAJO DE GRADUACION UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, AÑO 2008.

MANUALES Y ESPECIFICACIONES.

- MANUAL CENTROAMERICANO DE ESPECIFICACIONES PARA LA CONSTRUCCION DE CARRETERAS Y PUENTES REGIONALES; SECRETARIA DE INTEGRACION ECONOMICA CENTROAMERICANA, SIECA 2000.
- ESPECIFICACIONES Y NORMAS DE LA ASOCIACION AMERICANA DE CARRETERAS ESTATALES Y OFICIALES PARA EL TRANSPORTE (AASHTO). EDICION 2005.
- MANUAL DE CARRETERAS; LUIS BAÑÓN BLÁZQUEZ.