



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

INCIDENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y DE LA CANTIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS PRINCIPALMENTE EN LA DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS SEGÚN LA DIVISIÓN 400, SECCIÓN 401, TABLAS 401-1, 401-2 Y 401-16 DEL LIBRO DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES, DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, EDICIÓN SEPTIEMBRE 2001

Pedro Roberto Ávila Martínez

Asesorado por el Ing. Irvin Benjamín Martínez Quevedo

Guatemala, febrero de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



INCIDENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y DE LA CANTIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS PRINCIPALMENTE EN LA DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS SEGÚN LA DIVISIÓN 400, SECCIÓN 401, TABLAS 401-1, 401-2 Y 401-16 DEL LIBRO DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES, DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, EDICIÓN SEPTIEMBRE 2001

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

PEDRO ROBERTO AVILA MARTÍNEZ

ASESORADO POR EL ING. IRVIN BENJAMÍN MARTINEZ QUEVEDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO

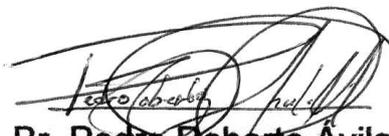
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Melini Salguero
EXAMINADORA	Ing. Jeovanni Miranda Castañon
EXAMINADORA	Ing. María del Mar Girón Cordón
SECRETARIA	Ing. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento de los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

INCIDENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y DE LA CANTIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS PRINCIPALMENTE EN LA DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS SEGÚN LA DIVISIÓN 400, SECCIÓN 401, TABLAS 401-1, 401-2 Y 401-16 DEL LIBRO DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES, DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, EDICIÓN SEPTIEMBRE 2001

Tema asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 27 de octubre de 2009.



Br. Pedro Roberto Ávila Martínez

Guatemala, 25 de octubre de 2010

Ing. José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

Estimado Ingeniero

Por medio de la presente informo a usted que he asesorado y revisado el trabajo de graduación titulado **INCIDENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y DE LA CANTIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS PRINCIPALMENTE EN LA DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS SEGÚN LA DIVISIÓN 400, SECCIÓN 401, TABLAS 401-1, 401-2 Y 401-16 DEL LIBRO DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES, DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, EDICIÓN SEPTIEMBRE 2001**, el cual fue presentado por el estudiante Pedro Roberto Ávila Martínez, manifestando que el mismo cumple satisfactoriamente con los propósitos planteados en el programa del mismo y por la importancia en la rama del diseño de carreteras, la doy por aprobada.

Sin otro particular, me suscribo de usted atentamente,


Ing. Irvin Benjamín Martínez Quevedo

Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
10 de noviembre de 2010

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

Estimado Ing. Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación INCIDENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y DE LA CANTIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS PRINCIPALMENTE EN LA DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS SEGÚN LA DIVISIÓN 400, SECCIÓN 401, TABLAS 401-1, 401-2 Y 401-16 DEL LIBRO DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES, DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, EDICIÓN SEPTIEMBRE 2001, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Pedro Roberto Ávila Martínez, quien contó con la asesoría del Ing. Irvin Benjamín Martínez Quevedo.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Ávila Martínez, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua



PROGRAMA DE INGENIERÍA
CIVIL ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de
Acreditación de Programas de
Arquitectura e Ingeniería
PERÍODO 2009 - 2012



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Irvin Benjamín Martínez Quevedo y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Pedro Roberto Ávila Martínez, titulado INCIDENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y DE LA CANTIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS PRINCIPALMENTE EN LA DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS SEGÚN LA DIVISIÓN 400, SECCIÓN 401, TABLAS 401-1, 401-2 Y 401-16 DEL LIBRO DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES, DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, EDICIÓN SEPTIEMBRE 2001, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, febrero de 2011

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **INCIDENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y DE LA CANTIDAD DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS PRINCIPALMENTE EN LA DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS SEGÚN LA DIVISIÓN 400, SECCIÓN 401, TABLAS 401-1, 401-2 Y 401-16 DEL LIBRO DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES, DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, EDICIÓN SEPTIEMBRE 2001,** presentado por el estudiante universitario **Pedro Roberto Ávila Martínez,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 23 de febrero de 2011

/gdech



AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme vida y los dones para haber llegado hasta este momento.
Mis padres	Gracias por todo su apoyo, consejos, sacrificios y paciencia mostrados durante toda mi vida y en especial en este momento tan importante.
Mis hermanos	Por su apoyo incondicional.
Mi familia	Por darme ánimos para seguir con la lucha.
La Facultad de Ingeniería	Por los conocimientos adquiridos.
Mi asesor	Ing. Irvin Benjamín Martínez Quevedo, por el apoyo y tiempo brindado para realizar este trabajo de graduación.
A la empresa Solel Boneh	Por haberme brindado la oportunidad de realizar mis ensayos de laboratorio en sus instalaciones.

Todas las personas que de alguna manera colaboraron con el desarrollo del presente trabajo.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Ya que con Él todo es posible, por darme todas las virtudes necesarias para alcanzar una nueva meta en mi vida.

Mis padres

Luis Alfonso Ávila Santos y María Teresa Martínez Quevedo, ya que sin su ayuda no sería la persona que soy, por darme su incondicional apoyo durante la realización de todos mis estudios hasta el día de hoy.

Mis hermanos

Luis, Gerson, Benjamín, Samuel y Ana Lucia, por compartir este momento tan importante en mi vida.

Mis amigos(as)

En especial a mi grupo de estudio, Teresa, Giovanni, Eddy, Oswaldo, Sac, entre otros, ya que siempre me mostraron su apoyo para poder seguir y ver hacia adelante.

Mi familia

Quienes de alguna manera siempre han mostrado su apoyo durante la realización de mis estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
GLOSARIO.....	XIX
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. MEZCLAS ASFÁLTICAS	
1.1. Definición de mezcla asfáltica en caliente.....	1
1.2. Empleo y función de las mezclas asfálticas en la construcción de pavimentos.....	1
1.2.1. Capas o superficies de rodadura.....	2
1.2.2. Capas interiores o intermedias de un pavimento.....	4
1.3. Clasificación de las mezclas asfálticas.....	4
1.3.1. Su función.....	4
1.3.2. La temperatura de puesta en obra.....	4
1.3.3. La proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.....	5
1.3.4. El tamaño máximo del agregado pétreo.....	5
1.3.5. La estructura del agregado pétreo.....	5

1.3.6.	La granulometría.....	6
1.3.7.	El tipo de ligante.....	6
1.4.	Tipología de las mezclas asfálticas en caliente.....	6
1.4.1.	Concreto asfáltico en caliente.....	6
1.4.1.1.	Mezclas asfálticas en caliente cerradas.....	7
1.4.1.1.	Mezclas asfálticas en caliente semicerradas.....	7
1.4.2.	Mezcla porosa o drenante.....	8
1.4.3.	Tratamiento superficiales.....	8
1.4.4.	Arena asfalto.....	9
1.4.5.	Sello asfáltico	9
1.4.5.1.	Sello de brisa (<i>Fog seal</i>).....	10
1.4.5.2.	Sello ordinario (<i>Sand seal</i>).....	10
1.4.5.3.	Sello de de lechada (<i>Slurry seal</i>).....	10
1.4.5.4.	Sello de lechada modificada con polímeros (<i>Micro surfacing</i>).....	10
1.4.6.	Mezclas de alto módulo (SMA).....	10
1.5.	Consideraciones para la selección del tipo de mezcla a utilizar.....	11
2.	COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	
2.1.	Cemento asfáltico.....	13
2.1.1.	Historia del asfalto.....	13
2.1.2.	Definición de asfalto.....	14
2.1.3.	Función del asfalto.....	15

2.1.4.	Origen de los asfaltos.....	15
2.1.4.1.	Asfaltos naturales.....	15
2.1.4.2.	Derivados del petróleo.....	16
2.1.5.	Composición del asfalto.....	18
2.1.6.	Propiedades de los asfaltos.....	20
2.1.7.	Ensayos para determinar las propiedades de los cementos asfálticos.....	21
2.1.7.1.	Gravedad específica de materiales asfálticos sólidos y semisólidos.....	21
2.1.7.2.	Viscosidad cinemática de asfaltos.....	22
2.1.7.3.	Viscosidad del asfalto mediante viscosímetros capilares de vacío.....	22
2.1.7.4.	Penetración de los materiales asfálticos..	23
2.1.7.5.	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos, aparato de anillo y bola.....	23
2.1.7.6.	Ductilidad de los materiales asfálticos.....	24
2.1.7.7.	Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.....	25
2.1.7.8.	Ensayo al horno lámina asfáltica delgada..	26
2.1.7.9.	Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno o tricloroetano.....	27
2.1.7.10.	Puntos de ignición y de llama mediante la Copa Abierta Cleveland.....	27
2.1.8.	Clasificación de los cementos asfálticos.....	28
2.1.9.	Especificaciones del cemento asfáltico.....	29

2.2.	Agregados pétreos.....	30
2.2.1.	Definición de agregados pétreos.....	30
2.2.2.	Tipos de agregados pétreos.....	31
2.2.2.1.	Agregados naturales.....	31
2.2.2.2.	Agregados procesados.....	31
2.2.2.3.	Agregados artificiales.....	31
2.2.3.	Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a su tamaño.....	32
2.2.3.1.	Agregados grueso	32
2.2.3.2.	Agregados fino	32
2.2.3.3.	Polvo mineral ó filler.....	32
2.2.4.	Características de los agregados gruesos para su utilización en mezclas asfálticas.....	32
2.2.4.1.	Abrasión.....	32
2.2.4.2.	Desintegración al sulfato de sodio.....	33
2.2.4.3.	Partículas trituradas.....	33
2.2.4.4.	Partículas planas y alargadas.....	33
2.2.5.	Características de los agregados finos para su utilización en mezclas asfálticas.....	33
2.2.5.1.	Abrasión.....	33
2.2.5.2.	Equivalente de arena.....	33
2.2.5.3.	Índice plástico.....	33
2.2.6.	Características deseables o de mayor interés acerca del polvo mineral.....	34
2.2.6.1.	Finura.....	34

2.2.6.2.	Acción estabilizante frente al agua.....	34
2.2.7.	Ensayo a los materiales.....	34
2.2.7.1.	Muestreo de materiales construcción de carreteras.....	36
2.2.7.2.	Reducción del tamaño de las muestras transportadas.....	37
2.2.7.3.	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.....	38
2.2.7.4.	Cantidad de material fino que pasa el tamiz No.200 en los agregados.....	39
2.2.7.5.	Índice de partículas planas y alargadas.....	40
2.2.7.6.	Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.....	41
2.2.7.7.	Ensayo de abrasión por medio de la Máquina de Los Ángeles.....	42
2.2.7.8.	Desintegración al sulfato de sodio.....	43
2.2.7.9.	Ensayo de equivalente de arenas y agregados finos.....	44
2.2.7.10.	Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.....	45
2.2.7.11.	Peso unitario de los agregados compactados o sueltos.....	46
2.2.7.12.	Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua.....	47

2.2.7.13.	Gravedad específica y absorción en agregados gruesos.....	48
2.2.7.14.	Gravedad específica y absorción en agregados finos.....	48
2.2.7.15.	Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral.....	49
3.	DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	
3.1.	Métodos de diseño de mezclas asfálticas.....	51
3.2.	Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.....	52
3.2.1.	Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.....	53
3.3.	Gravedad específica de las mezclas asfálticas.....	63
3.3.1.	Gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas.....	63
3.3.2.	Gravedad específica teórica máxima.....	64
3.4.	Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas.....	65
3.4.1.	Definiciones.....	66
3.4.2.	Gravedad específica bulk de la combinación de agregados.....	68
3.4.3.	Gravedad específica efectiva del agregado.....	68
3.4.4.	Porcentaje de asfalto absorbido.....	69
3.4.5.	Porcentaje de asfalto efectivo.....	70

3.4.6.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	71
3.4.7.	Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada.....	72
3.4.8.	Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.....	73
3.5.	Criterios para la selección del diseño final de mezcla asfáltica en caliente.....	73
3.5.1.	Evaluación de la curva de vacíos en el agregado mineral.....	74
3.5.2.	Efecto del nivel de compactación.....	77
3.5.3.	Efecto de los vacíos de aire.....	79
3.5.4.	Efecto de los vacíos llenos de asfalto.....	80
4.	CASO PRÁCTICO	
4.1.	Generalidades.....	83
4.2.	Graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico.....	83
4.3.	Diseño de mezclas asfálticas en caliente.....	84
4.3.1.	Diseño de mezcla en caliente con granulometría B.....	85
4.3.2.	Diseño de mezcla en caliente con granulometría C.....	123
4.3.3.	Diseño de mezcla en caliente con granulometría D.....	133
4.3.4.	Diseño de mezcla en caliente con granulometría E.....	142

4.5.3. Diseño de mezcla en caliente con granulometría F.....	151
4.4. Selección del diseño final de mezcla.....	160
4.5. Matriz de resultados.....	168
CONCLUSIONES.....	169
RECOMENDACIONES.....	171
BIBLIOGRAFÍA.....	173
ANEXOS.....	175

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada.....	67
2	Relación entre VMA y límite de especificación para el rango de contenido de asfalto.....	77
3	Efecto del esfuerzo de compactación Marshall en los VMA y los Va.....	79
4	Gráfica del análisis granulométrico de agregado grueso y fino.....	88
5	Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría B.....	90
6	Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo B	90
7	Secado de los agregados en horno para elaboración de briqueta.....	105
8	Peso de los materiales secos para elaboración de briqueta.....	106
9	Adición de asfalto por peso para elaboración de briqueta.....	106
10	Mezclado de asfalto y agregados para elaboración de briqueta.....	107
11	Determinación de la temperatura durante mezclado.....	107
12	Colocación de la mezcla en el molde para elaboración de briqueta.....	108
13	Apisonamiento de la mezcla en el molde para elaboración de briqueta.....	108
14	Compactación de la mezcla con martillo.....	109
15	Colocación de briquetas en baño de María.....	109

16	Determinación de estabilidad y flujo con prensa Marshall.....	110
17	Separación de la mezcla para ensayo Rice.....	113
18	Extracción de aire a la mezcla por medio de bomba de vacío.....	113
19	Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	118
20	Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	118
21	Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	119
22	Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	119
23	Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	120
24	Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	120
25	Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	121
26	Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	121
27	Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría C.....	124
28	Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo C..	124
29	Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	128

30	Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	128
31	Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	129
32	Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	129
33	Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	130
34	Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	130
35	Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	131
36	Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	131
37	Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría D.....	134
38	Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo D..	134
39	Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	137
40	Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	138
41	Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	138
42	Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	139

43	Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	139
44	Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	140
45	Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	140
46	Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	141
47	Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría E.....	143
48	Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo E..	143
49	Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	146
50	Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	147
51	Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	147
52	Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	148
53	Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	148
54	Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	149
55	Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	149

56	Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	150
57	Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría F.....	152
58	Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo F...	152
59	Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	155
60	Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	156
61	Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	156
62	Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	157
63	Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	157
64	Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	158
65	Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	158
66	Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	159

TABLAS

I	Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas.....	3
II	Especificaciones del cemento asfáltico.....	29
III	Tabla resumen de ensayos de caracterización con su respectiva Norma.....	30
IV	Evolución de los métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente.....	51
V	Fracciones para secado de agregado para preparación de probetas.....	59
VI	Graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico.....	84
VII	Análisis granulométrico agregado de 1 1/4" a 3/4".....	85
VIII	Análisis granulométrico agregado de 3/4" a 1/2".....	86
IX	Análisis granulométrico agregado de 1/2" a 1/4".....	87
X	Análisis granulométrico agregado de 1/4" a 0.....	87
XI	Cálculo para integración de curva granulométrica tipo B.....	89
XII	Graduación integrada tipo B.....	89
XIII	Cálculo de abrasión tipo A para agregado de 1 1/2" a 3/8".....	92
XIV	Cálculo de abrasión tipo B para agregado de 3/4" a 3/8.....	92
XV	Cálculo de abrasión tipo C para agregado de 3/8" a No. 4.....	92
XVI	Cálculo de abrasión tipo D para agregado de No. 4 a No. 8.....	93
XVII	Cálculo de la desintegración al sulfato de sodio de los agregados después de 5 ciclos.....	93

XXVIII	Cálculo para evaluación de 1 cara fracturada.....	94
XIX	Cálculo para evaluación de más de 1 cara fracturada.....	95
XX	Cálculo para evaluación de partículas planas.....	96
XXI	Cálculo para evaluación de partículas alargadas.....	96
XXII	Cálculo para evaluación del equivalente de arena.....	97
XXIII	Cálculo para evaluación del peso unitario.....	98
XXIV	Evaluación de adherencia y desvestimiento de los agregados.....	99
XXV	Cálculo de las gravedades específicas y absorción de los agregados gruesos con graduación tipo B.....	99
XXVI	Cálculo de las gravedades específicas y absorción de los agregados finos con graduación tipo B.....	101
XXVII	Cálculo de la gravedad específica del filler.....	102
XXVIII	Cálculo de la gravedad específica teórica máxima de agregados con graduación tipo B.....	103
XXIX	Resumen de características agregados con graduación tipo B.....	103
XXX	Cálculo de gravedad específica Bulk de briquetas elaboradas con mezcla asfáltica de graduación tipo B.....	110
XXXI	Cálculo de gravedad específica máxima de mezcla asfáltica con graduación tipo B.....	112
XXXII	Cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica con granulometría tipo B.....	114
XXXIII	Cálculo de estabilidad y fluencia Marshall.....	116
XXXIV	Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con	

	granulometría tipo B.....	117
XXXV	Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo B al 4% de vacíos.....	122
XXXVI	Cálculo para integración de curva granulométrica tipo C.....	123
XXXVII	Graduación integrada tipo C.....	123
XXXVIII	Resumen de características de agregados con graduación tipo C.....	125
XXXIX	Datos de briquetas de mezcla asfáltica con graduación tipo C.....	126
XL	Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo C.....	127
XLI	Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo C al 4% de vacíos.....	132
XLII	Cálculo para integración de curva granulométrica tipo D.....	133
XLIII	Graduación integrada tipo D.....	133
XLIV	Resumen de características de agregados con graduación tipo D.....	135
XLV	Datos de briquetas de mezcla asfáltica con graduación tipo D.....	136
XLVI	Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo D.....	137
XLVII	Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo D al 4% de vacíos.....	141
XLVIII	Cálculo para integración de curva granulométrica tipo E.....	142
XLIX	Graduación integrada tipo E.....	142
L	Resumen de características de agregados con graduación tipo E.....	144

LI	Datos de briquetas de mezcla asfáltica con graduación tipo E.....	145
LII	Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo E.....	146
LIII	Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo E al 4% de vacíos.....	150
LIV	Cálculo para integración de curva granulométrica tipo F.....	151
LV	Graduación integrada tipo F.....	151
LVI	Resumen de características de agregados con graduación tipo F.....	153
LVII	Datos de briquetas de mezcla asfáltica con graduación tipo F.....	154
LVIII	Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo F.....	155
LIX	Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo F al 4% de vacíos.....	159
LX	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo B.....	160
LXI	Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo B.....	161
LXII	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo C.....	162
LXIII	Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo C.....	163
LXIV	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo D.....	163
LXV	Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo D.....	164
LXVI	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo E.....	165

LXVII	Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo E.....	166
LXVIII	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo F.....	166
LXIX	Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo F.....	167
LXX	Matriz de resultados.....	168

GLOSARIO

AASHTO	Siglas que corresponden a la entidad Americana <i>American Association For State Highway And Transportation Official</i> .
Absorción	Es la masa de agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado, sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado después de secado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
AC	Cemento asfáltico. Es un material procedente del petróleo.
Aditivo	Sustancias que mejoran o incluyen características a los materiales.
Agregado	Un material granular duro, de composición mineralógica como la arena, grava, escoria, roca triturada usada para ser mezclado en diferentes tamaños.
Asfalto	Sustancia de color negro que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo, se utiliza frecuentemente en de la pavimentación de calles y carreteras.

ASTM	Siglas que corresponden a la entidad <i>American Society For Testing And Materials</i> .
Bitumen	Un tipo de sustancia cementante de color negro obscuro (sólida, semisólida, o viscosa), natural o fabricada, compuesta generalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, son típicos los asfaltos, las breas y betunes.
Cantera	Lugar donde la roca se separa de sus lechos naturales y se prepara para su utilización en la industria de la construcción. Lugar donde se extrae y se tritura el material pétreo usado en la elaboración de mezclas asfálticas.
Caras fracturadas	Una superficie angular, áspera o quebrada de una partícula de agregado, formada por trituración por medios artificiales o por la naturaleza.
Concreto asfáltico	Una mezcla en caliente, muy bien controlada, de cemento asfáltico de alta calidad y agregado bien graduado (también de alta calidad) compactada para formar una masa densa y uniforme.
Densidad	Es la masa por unidad de volumen.
Ductilidad	Capacidad que posee un asfalto de deformarse por alargamiento sin que su masa se disgregue.
Filler	Material fino que pasa el tamiz No. 200.
Gravedad específica	Relación entre la masa (o peso en el aire) de un volumen de sólidos y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida, cuyo valor no tiene dimensionales.

Gravedad específica bulk	Es la relación entre el peso en el aire del volumen de agregado (incluyendo los vacíos permeables e impermeables de sus partículas, pero no los vacíos entre partículas) a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.
Gravedad específica bulk, aparente	Es la relación entre el peso en el aire del volumen de la porción impermeable del agregado a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.
Gravedad específica bulk en condición saturada y superficialmente seca	Es la relación entre el peso en el aire en condición saturada y superficialmente seca, incluyendo el peso del agua que ocupa los vacíos de las partículas luego inmersión durante 15 horas (sin incluir los vacíos entre partículas) y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.
Impermeabilidad	Capacidad de un pavimento asfáltico de resistir el paso de aire y agua dentro o a través del mismo.
IRI	Índice de Rugosidad Internacional.
Mezcla asfáltica en caliente	Mezclas de cemento asfáltico con agregados que cumplen con cierta granulometría fabricadas en planta que deben ser colocadas y compactadas a temperaturas elevadas.
Partícula fracturada	Es una partícula de agregado que tenga al menos el mínimo de caras fracturadas especificadas (generalmente una o dos)

Partículas planas o alargadas de agregados	Son aquellas partículas de agregado que tienen una relación ancho/espesor o longitud/ancho mayor que un valor especificado.
Peso unitario	Peso (masa) de un volumen unitario.
Polímeros	Son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.
Reología	Ciencia del flujo que estudia la deformación de un fluido sometido a esfuerzos externos.
Tamaño máximo nominal (tmn)	Es el menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado.
Trabajabilidad	Facilidad con que las mezclas de pavimentación pueden ser colocadas y compactadas.
Viscosidad	Oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en la elaboración de un estudio teórico-práctico sobre cómo incide en la durabilidad y en las propiedades físico-mecánicas de una mezcla de concreto asfáltico la granulometría y la cantidad de ligante. El trabajo, en sí, consiste en muestrear y cuartear agregados de los apilamientos de trituración de la cantera explotada por SOLEL BONEH ubicada en el Km. 165.700 de la Ruta CA-1 W procesados en cuatro tipos de agregados, de (1 1/4" a 3/4"), (3/4" a 1/2"), (1/2" a 1/4"), (1/4" a 0) combinándolos para formar un material clasificado, con el fin de cumplir con las especificaciones del Libro Azul de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de La Dirección General de Caminos, Septiembre 2001, la cual, se basa en el porcentaje en masa que pasa el tamiz designado, AASHTO T 27 Y T 11 y el tamaño máximo nominal, y designa el huso granulométricos para los tipos **A**, **B**, **C**, **D**, **E** y **F**. A los materiales de cada huso granulométrico se le practicaron, en el laboratorio, los ensayos respectivos. Con los resultados de laboratorio se procedió a integrar las granulometrías tipo, para hacer el diseño respectivo de cada una, desde el huso tipo **B** hasta el tipo **F**, utilizando para ello cemento asfáltico AC-20 PERERNCO; asimismo, se aplicó el Método de Diseño de Mezclas en Caliente Marshall. El huso granulométrico tipo **A** se descartó, porque el tamaño máximo nominal,

designado en las especificaciones es de 2” y el Método Marshall, permite un tamaño máximo de 1”.

OBJETIVOS

GENERAL:

Establecer una matriz de las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente, acorde con las especificaciones dadas por organismos internacionales, para la realización de los ensayos en los materiales que cumplan las características que el ingeniero a cargo de un proyecto de pavimentación necesite alcanzar, en los concretos asfálticos.

ESPECÍFICOS:

1. Proporcionar, al ingeniero encargado de construcción de pavimentos flexibles, una herramienta que le sirva para tomar decisiones en cuanto al tipo de graduación, contenido de asfalto y especificaciones que debe utilizar, dependiendo de las exigencias a las que va a ser sometida, de acuerdo con las necesidades del proyecto.

INTRODUCCIÓN

La red vial de Guatemala, en su mayoría, está constituida por estructuras de pavimento flexible, los cuales utilizan como contribución estructural en su parte superior mezclas de concreto asfáltico en caliente, ya sea como capas intermedias o como superficies de desgaste o rodadura, por lo que el Estado invierte año con año cantidades significativas de quetzales en la construcción de nuevas carreteras y en el mantenimiento y rehabilitación de dichas carreteras. Estos gastos hacen importante evaluar el comportamiento de las mezclas de concreto asfáltico en caliente más utilizadas en la construcción de pavimentos flexibles en nuestro medio.

Este trabajo de graduación consiste en la elaboración de un estudio teórico-práctico sobre cómo incide en la durabilidad y en las propiedades físico-mecánicas de una mezcla de concreto asfáltico, la granulometría y la cantidad de cemento asfáltico.

Para el desarrollo se da a conocer teoría sobre lo que son las mezclas asfálticas en caliente, su funcionamiento, clasificación y los tipos que existen. Se describen los distintos materiales que componen las mezclas asfálticas, desde su obtención hasta las normas (AASHTO y ASTM) que deben de seguir para evaluar su aceptación. Los materiales a utilizar en la mezcla deberán cumplir los requisitos indicados en la División 400, Sección 401 del Libro de Especificaciones Generales Para la Construcción de Carreteras y Puentes de la

Dirección General de Caminos, (Libro Azul), principalmente lo indicado en las tablas 401-1 y 401-2 Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515), (AASHTO T 27 Y T 11) y Requisitos de graduación para el polvo mineral (AASHTO T 37) respectivamente, y Tabla 401-16 Cantidad de cemento asfáltico (ASTM D 3515), (AASHTO T164).

Teniendo el concepto claro de lo que es una mezcla asfáltica en caliente y las características de los materiales necesarios para su elaboración, se procede a dar una breve explicación de los métodos de diseño para mezclas asfálticas. En este caso se utilizará el Método de Diseño Marshall (AASHTO T 245) ya que es un método ampliamente usado y reconocido tanto a nivel nacional como a nivel internacional para el diseño de mezclas de concreto asfáltico en caliente. Luego se dan a conocer los lineamientos necesarios para el cálculo de las distintas propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas.

Finalmente se da un caso práctico, donde se realizaron 5 diseños de mezclas de concreto asfáltico en caliente, usando las granulometrías dadas en la tabla 401-1 del Libro Azul, con agregados provenientes de la cantera ubicada en el Km. 165.700 de la ruta CA-1 Occidente y asfalto PERENCO AC-20 proveniente de la refinería La Libertad.

1. MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

1.1 Definición de mezcla asfáltica en caliente

Es la elaboración en planta, en caliente, de una mezcla de proporciones estrictamente controladas de agregados pétreos de distintas graduaciones, polvo mineral, cemento asfáltico virgen o modificado con polímeros y, si es necesario, agregando aditivos por medio de plantas fijas o móviles hasta obtener un producto de alta resistencia, durable y con características de calidad uniformes, el cual se pueda colocar y compactar de inmediato en una carretera o superficie previamente preparada para ello

La correcta selección de los componentes mencionados anteriormente es de vital importancia para el futuro desempeño de la mezcla asfáltica, principalmente del cemento asfáltico y el polvo mineral, dado que son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en el costo de la misma.

1.2 Empleo y función de las mezclas asfálticas en la construcción de pavimentos

Las mezclas asfálticas en caliente son ampliamente usadas en la construcción de pavimentos flexibles; funcionando, ya sea como superficies de rodadura o como capas interiores o intermedias dentro de la estructura de un pavimento, donde su función primordial es estructural. Cuando se usan como superficies de rodadura, soportan directamente sobre ellas las acciones de la intemperie y el desgaste que ejerce la presión de inflado de los neumáticos,

principalmente de los vehículos pesados, y cuando se usan como capas inferiores o dentro de la estructura de un pavimento, transmiten las cargas a las capas inferiores de éste.

Para el diseño de una mezcla de concreto asfáltico se tienen que considerar dos aspectos fundamentales de acuerdo a su función:

- Como superficie de rodadura
- Como capa interior o intermedia de un pavimento

1.2.1 Capas o superficies de rodadura

Las cualidades funcionales de un pavimento residen fundamentalmente en su superficie de rodadura dado que es la que debe proporcionar una superficie segura, confortable y estética, así como reunir características de durabilidad, rugosidad, permeabilidad, sonoridad, y color, entre otras. Debido a que todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse y lograrse simultáneamente, hay que equilibrar las propiedades anteriores para llegar a las soluciones más satisfactorias, de acuerdo a las necesidades que se pretendan atender.

De las proporciones relativas de los materiales que se hayan empleado en la fabricación y del acabado que se haya logrado en la construcción, dependen las propiedades físicas y mecánicas de las superficies de rodadura, y de éstas dependen los aspectos funcionales siguientes:

- Adherencia del neumático a la superficie de rodadura
- Desgaste de los neumáticos
- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo

- La comodidad y estabilidad en marcha
- La resistencia a la rodadura (consumo de combustible)
- Las propiedades ópticas

Estos aspectos funcionales del pavimento están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial (IRI).

Tabla I. Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas

Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas
Seguridad Resistencia al deslizamiento Regularidad transversal Visibilidad (marcas viales)
Comodidad Regularidad longitudinal Regularidad transversal Visibilidad Ruido
Durabilidad Capacidad soporte Resistencia a la desintegración superficial
Medio ambiente Ruido Capacidad de ser reciclado
Trabajabilidad

FUENTE: La Calidad y la Seguridad en las Infraestructuras. Artículo. Control de Mezclas Bituminosas en el Borrador de la Normativa CEN. Revista: Ingeniería Civil No. 124/2001. España.

1.2.2 Capas interiores o intermedias de un pavimento

Las capas interiores o intermedias de un pavimento tienen la función estructural fundamental de absorber la mayor parte de los esfuerzos inducidos por el tránsito vehicular, de forma que éstos lleguen convenientemente disminuidos a las capas inferiores, base, subbase y subrasante.

1.3 Clasificación de las mezclas asfálticas.

Según Kraemer¹ existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas, así:

1.3.1 Por la función.

- Como capa de rodadura o de desgaste
- Como capa intermedia del pavimento

1.3.2 Por la temperatura de puesta en obra

- Mezclas asfálticas en caliente: se fabrican con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150-165 grados centígrados, según la viscosidad del asfalto, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, los materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente

¹ Carlos Kraemer, Ingeniería de Carreteras, Volumen II, Editorial Mc Graw Hill, 2004, pág. 314 y 315

- Mezclas asfálticas en frío: se fabrican con asfaltos emulsificados o fluidificados y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente

1.3.3 Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

- Mezclas cerradas o densas: la proporción de vacíos varía entre 3% y 5%
- Mezclas semi-cerradas o semi-densas: la proporción de vacíos varía entre el 5 % y el 10 %
- Mezclas abiertas: la proporción de vacíos supera el 10 % pero es inferior a 20%
- Mezclas porosas o drenantes: la proporción de vacíos es superior al 20 %

1.3.4 Por el tamaño máximo del agregado pétreo

- Mezclas gruesas: donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 20 mm
- Mezclas finas: donde el tamaño máximo del agregado pétreo no excede los 20 mm

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

1.3.5 Por la estructura del agregado pétreo

- Mezclas con esqueleto mineral: poseen un esqueleto pétreo bastante resistente debido al rozamiento interno de los agregados

- Mezclas sin esqueleto mineral: no poseen un esqueleto pétreo resistente, la resistencia se logra por la cohesión causada entre el polvo mineral y el asfalto

1.3.6 Por la granulometría

- Mezclas continuas: una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico
- Mezclas discontinuas: una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico

1.3.7 Por el tipo de ligante

- Mezclas con asfaltos convencionales
- Mezclas con asfaltos modificados
- Mezclas con asfaltos rebajados o emulsificados

1.4 Tipología de las mezclas asfálticas en caliente

Con base en los criterios mencionados anteriormente se puede generar una amplia gama de mezclas asfálticas, a continuación se mencionaran las más utilizadas en nuestro medio:

1.4.1 Concreto asfáltico en caliente

Este tipo de mezcla es el más usado en Guatemala. Consiste en la elaboración en planta, en caliente, de una mezcla de proporciones estrictamente controladas de materiales pétreos, polvo mineral, cemento

asfáltico y, si es necesario, aditivos o polímeros, para obtener un producto de alta resistencia y duración, con características de calidad uniformes, que se puede tender y compactar en la carretera, en una o en varias capas, de ser requerido, para proporcionar las características de resistencia y textura a las capas de soporte o de superficie.

1.4.1.1 Mezclas asfálticas en caliente cerradas

Son las más empleadas para las superficies de rodadura debido a su pequeña proporción de vacíos (3 - 5 %), lo que las vuelve prácticamente impermeables, cumpliendo así su misión de proteger a las capas inferiores de la estructura del pavimento de la filtración de agua. Lo permeable o impermeable que sea esta mezcla depende de la densidad que se alcance en la compactación, pues una variación en la densidad puede hacer que el porcentaje de vacíos en la mezcla esté por arriba o por abajo del rango, lo que provoca mayor infiltración de agua o mayor rigidez de la mezcla, respectivamente.

1.4.1.2 Mezclas asfálticas en caliente semicerradas

Se utilizan principalmente en las capas inferiores por su bajo precio y por su alta resistencia a las deformaciones plásticas. Esta resistencia se debe a que sus curvas granulométricas son más abiertas, absorbiendo de mejor manera los esfuerzos inducidos por el tráfico, y requieren un menor contenido de asfalto porque la cantidad de filler en la mezcla es menor. Estas mezclas no pueden ser utilizadas como superficie de rodadura por su alta permeabilidad, así como por su bajo contenido de asfalto, que las hace menos resistentes al envejecimiento y muy vulnerables al desgaste provocado por los neumáticos del tránsito usuario.

Las mezclas antes mencionadas, tanto la indicada en el inciso **a)** como en el **b)**, son concretos asfálticos en caliente, de granulometría continua. En este tipo de granulometría las partículas más finas rellenan los vacíos que dejan las más gruesas y todas ellas están recubiertas por una película continua de asfalto. Algunos inconvenientes de estas graduaciones es su sensibilidad al contenido de asfalto y filler, ya que pequeñas variaciones de estos, pueden producir cambios importantes en el comportamiento físico-mecánico de estas.

1.4.2 Mezcla porosa o drenante

Las mezclas drenantes o porosas se diseñan con el Método Español Cantabro, son mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, comúnmente llamada capa drenante. Son fabricadas en plantas asfálticas en caliente y colocadas en obra a temperatura muy superior a la de ambiente (145 - 155) grados centígrados y en espesores menor o igual a 4 cm. Para su fabricación se usan granulometrías discontinuas, con contenidos bajos de agregado fino, de tal forma que el porcentaje de vacíos de aire de la mezcla sea igual o mayor a 20 % para permitir la filtración del agua de lluvia con rapidez y pueda ser evacuada hacia las cunetas, evitando así la formación de la película continua de agua sobre la superficie del pavimento que provoca el hidropneumático en los pavimentos.

1.4.3 Tratamientos superficiales

Es una capa de revestimiento formada por riegos sucesivos y alternados de material bituminoso y agregados pétreos triturados de tamaño uniforme esparcidos uniformemente que, mediante el proceso de compactación, son acomodados y orientados en su posición más densa. Esta capa está destinada principalmente a recibir, directamente, la acción del tránsito proporcionando al

pavimento las condiciones necesarias de impermeabilidad, resistencia al desgaste y suavidad para el rodaje.

Existen 3 tipos de tratamientos superficiales:

- Tratamientos superficiales simples
- Tratamientos superficiales dobles
- Tratamientos superficiales triples

1.4.4 Arena asfalto

Es la capa del pavimento usada como base de una carpeta o como capa de superficie del pavimento, constituida de arena de trituración, arena de río o una mezcla de ambas, combinadas con material bituminoso, mezcladas en frío o en caliente en planta o en frío en la carretera con una graduación determinada.

1.4.5 Sello asfáltico

Es el revestimiento con emulsiones asfálticas o, emulsiones asfálticas y agregado fino, destinado principalmente a impermeabilizar una superficie asfáltica existente, por medio del llenado de los vacíos y grietas y/o evitar la desintegración de superficies asfálticas desgastadas y mejorar su resistencia contra el deslizamiento aumentando la durabilidad del pavimento

El sello asfáltico puede ser de cuatro tipos:

1.4.5.1 Sello de brisa (*Fog seal*)

Consiste en la aplicación de un riego liviano de una emulsión asfáltica de fraguado lento, diluida con agua.

1.4.5.2 Sello ordinario (*Sand seal*)

Consiste de un riego de una emulsión asfáltica seguido de un esparcimiento de agregado pétreo fino.

1.4.5.3 Sello de lechada (*Slurry seal*)

Consiste en la colocación de una mezcla de emulsión asfáltica, agregado fino, material de relleno y agua.

1.4.5.4 Sello de lechada modificada con polímeros (*Micro surfacing*)

Consiste en la colocación de una mezcla de emulsión asfáltica catiónica modificada con polímeros, agregado fino producido exclusivamente por trituración, material de relleno y agua.

1.4.6 Mezclas de alto módulo (*SMA*)

Su proceso de elaboración es en caliente, citando específicamente las mezclas de alto módulo para capas de base, se fabrican con asfaltos muy duros. A veces modificados, con contenidos asfálticos próximos al 6 % de la masa de los agregados pétreos, la proporción del polvo mineral también es alta, entre el 8% - 10%. Son mezclas con un elevado módulo de elasticidad, del

orden de los 13,000 Mpa. a 20 grados centígrados y una resistencia a la fatiga relativamente elevada. Se utilizan en capas de espesores de entre 8cm y 15 cm., tanto para rehabilitaciones como para la construcción de pavimentos nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta. Su principal ventaja frente a las bases de suelo-cemento es la ausencia de agrietamiento debido a la retracción, o como las mezclas convencionales en gran espesor, la ventaja es su mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga, permitiendo ahorrar espesor.

1.5 Consideraciones para la selección del tipo de mezcla a utilizar

Para la selección del tipo de mezcla a utilizar se han de tomar en cuenta varios factores, entre los que se pueden mencionar:

- a)** Condiciones de trabajo de la mezcla
 - Tipo de tráfico e intensidad del mismo
 - Tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, etc.)
 - Parte de la estructura de pavimento donde funcionará y espesor
 - Si es capa nueva o rehabilitación

- b)** Determinación de las propiedades fundamentales que ha de tener la mezcla, dadas las condiciones en las que ha de trabajar

- c)** Elección del tipo de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, incorporando en este análisis las consideraciones económicas o de puesta en obra

- d)** Materiales disponibles, elección de los agregados pétreos, los cuales deben cumplir con las especificaciones, pero que en general serán los disponibles en una distancia de acarreo dada y por lo tanto, a un costo razonable. Asimismo, debe elegir el polvo mineral si se necesita aportación
- e)** Elección del tipo de cemento asfáltico: asfalto convencional, asfalto modificado
- f)** Dosificación o determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico, según el método que se use como función del tipo de mezcla, ya que el costo es siempre un factor relevante
- g)** Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: exigencias de seguridad vial, estructura del pavimento, técnicas de diseño y ejecución, sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo de lluvias, trazado de la vía, entre otros), condiciones de drenaje y consideraciones económicas

2. COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

2.1 Cemento asfáltico

2.1.1 Historia del asfalto

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos. La palabra asfalto, deriva del acadio, lengua hablada en Asiria, en las orillas del Tigris superior, entre los años 1400 y 600 A.C. en esta zona se encuentra en efecto la palabra Sphalto que significa lo que hace caer. Luego la palabra fue adoptada por el griego, pasó a latín y, más adelante, al francés (asphalte), al español (asfalto) y al inglés (asphalt)².

En el año 3800 a. C., los habitantes de Mesopotamia y del valle del Indo emplearán el asfalto natural como material aglomerante en albañilería, en la construcción de caminos y como impermeabilizante de estanques y depósitos de agua. En la protección de un embarcadero de piedra en el Tigris se empleó asfalto natural mezclado con arena y grava. En Egipto se emplearon los betunes para silos, cisternas, momificación, así como en sus pirámides.

El asfalto natural fue descubierto a mediados del siglo XVI, en la isla de Trinidad, por Cristóbal Colón, un siglo más tarde, Sir Walter Raleigh quedó asombrado ante este lago de asfalto y tomó posesión de él para la Corona Británica. Mientras tanto, en 1712, el griego Eirini D'Eyrinis hizo otro

² *Historia del asfalto* [en línea]. [ref. de 9 diciembre 2009]. Disponible en World Wide Web:
< http://www.e-asfalto.com/go/?orig_asf/historia_del_asfalto.htm>

descubrimiento: el yacimiento de asfalto de Val de Travers en Suiza y luego el yacimiento de Seyssel en el Valle del Ródano. A partir de estos yacimientos se elaboró el mastic de asfalto, aplicado al revestimiento de caminos y senderos.

Su empleo en la construcción de las carreteras modernas se remonta a los primeros años del siglo XIX. En Francia en 1802 se emplearon, por primera vez, rocas asfálticas para la construcción de carreteras, pavimentos de puentes y aceras. En 1859 se perfora el primer pozo de petróleo y en 1870 se construye en Newark, N. Jersey (EEUU), el primer pavimento asfáltico. Desde esta época el asfalto se implantó sólidamente en las vías urbanas y propició su uso vial. La construcción del primer pavimento, tipo Sheet Asphalt, se da en 1876 en Washington D.C., con asfalto natural importado. En 1900 aparece la primera mezcla en caliente, utilizada en la Rue du Louvre y en la Avenue Victoria en París, la cual fue construida con asfalto natural de la isla de Trinidad. A partir del año 1902 se inicia el empleo de asfaltos destilados de petróleo en los Estados Unidos, que por sus características de pureza y economía, en relación a los asfaltos naturales, constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento.

2.1.2 Definición de asfalto

La American Society for Testin and Materials (ASTM) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido, principalmente, por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente ligante para unir.

2.1.3 Función del asfalto

El asfalto trabaja como un cementante que une los distintos elementos del agregado pétreo, logrando una mezcla que es capaz de resistir eficazmente las cargas del tráfico y los agentes atmosféricos. Esto es posible debido a la cohesión brindada por el asfalto y al rozamiento interno entre las partículas del agregado.

Por lo tanto el asfalto debe ser suficientemente consistente y viscoso para que el concreto asfáltico resista las altas temperaturas sin deformarse, y debe ser suficientemente flexible para que el concreto asfáltico no se vuelva frágil.

2.1.4 Origen de los asfaltos

Según su origen pueden clasificarse en:

2.1.4.1 Asfaltos Naturales

Se han formado en la naturaleza por un fenómeno de migración de determinados petróleos naturales hacia la superficie terrestre, a través de fisuras y rocas porosas, seguido de una volatización de sus componentes más ligeros. Algunos se encuentran en estado bastante puro, formados casi exclusivamente por sustancias hidrocarbonadas con poca materia mineral, aunque lo más usual es que estén mezclados con sustancias minerales en mayor o menor proporción.

2.1.4.2 Derivados del petróleo

Son productos derivados del petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Dependiendo del tipo de petróleo y del proceso de refinación que se le dé, así serán los asfaltos artificiales que se tengan.

Los petróleos que se encuentran en la naturaleza pueden ser:

- **Parafínicos**, los residuos asfálticos que de ellos se obtienen son de poco poder adhesivo y bastante susceptibles a los cambios de temperatura, y por ello no es recomendable su empleo en construcción de pavimentos, si no se adoptan medidas especiales en el proceso de destilación o se les da un tratamiento posterior
- **Asfálticos**, normalmente, los petróleos asfálticos tienen un elevado peso específico y producen como residuo de la destilación gran cantidad de productos semisólidos, muy semejantes a los asfaltos naturales desde el punto de vista físico y químico; estos residuos tienen un gran poder aglomerante y aunque no son tan estables como los obtenidos de los petróleos parafínicos, son los más apropiados para la construcción de pavimentos
- **Semiasfálticos**, son aquellos que ocupan una posición intermedia entre los dos anteriores; los productos asfálticos obtenidos de ellos se emplean en la construcción de pavimentos

Obtención del asfalto en refinerías

Existen tres procesos por los cuales puede ser producido un asfalto: destilación primaria, destilación por vacío y extracción con solventes.

- Destilación primaria

Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375° C. En este proceso se separan los componentes livianos como la nafta, kerosene, gas oil. Al residuo que se produce de la destilación primaria se le practica la destilación al vacío.

- Destilación al vacío

Es un proceso, muy parecido al de la destilación primaria, en que las fracciones pesadas hierven a menor temperatura que a la que hervirían a presión atmosférica, esto se debe a que mediante equipos especiales se baja la presión, aumentando el vacío en la columna fraccionada. El fondo de la destilación al vacío es un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente.

De la cantidad de vacío que se aplique en la columna de destilación, dependerán los distintos cortes de asfalto que se pueden obtener y que pueden ser utilizados como cementos asfálticos.

- Extracción con solventes

El residuo de la destilación al vacío obtenido, es un aceite muy pesado que contiene asfáltenos dispersos, los cuales no se lograron separar en la destilación al vacío, donde fueron sometidos a bajas presiones y altas temperaturas. Una forma de separarlos es agregando gas licuado de petróleo, como propano o butano líquido, al residuo asfáltico, a presión alta y temperaturas relativamente moderadas (70 a 120°C). Mediante este proceso se extrae el aceite y queda un residuo semisólido llamado bitumen.

Una vez se tengan los bitúmenes, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia. Este proceso de mezcla también es llevado a cabo a nivel de crudos, los cuales se mezclan para producir un bitumen con mejores características.

2.1.5 Composición del asfalto

Dentro de la amplia variedad de grupos químicos que entran en su composición, puede considerarse, según casi todos los autores, a los compuestos que forman los bitúmenes como pertenecientes a uno de los siguientes grupos:

- Asfaltenos
- Maltenos
 - Resinas
 - Saturados, o parafinas

- Aceites aromáticos
 - Aceites resinosos
 - Aceites no resinosos

Desde el punto de vista físico, los bitúmenes forman un sistema coloidal, cuya fase continua es un medio fluido aceitoso, máltenos, y una fase discontinua, asfáltenos, que son sustancias precipitables de los crudos del petróleo y otros productos orgánicos. Los ácidos asfálticos libres y las resinas asfálticas, son compuestos del medio aceitosos que actúan como coloides protectores y mantienen la estabilidad del sistema coloidal.

Tanto la composición como las propiedades de ambas fracciones tienen una marcada relación con el comportamiento y propiedades de los bitúmenes. Dependiendo del grado de aromaticidad de los máltenos y de la concentración de los asfáltenos, la estructura coloidal de los bitúmenes puede ser del tipo **sol** o del tipo **gel**, siendo este estado coloidal del sistema el que condiciona el comportamiento reológico del asfalto.

- Tipo sol: son los que tienen una menor proporción de asfáltenos y resinas, poseen un comportamiento reológico newtoniano y por tanto una gran susceptibilidad a los cambios de temperatura. Son poco apropiados para soportar los esfuerzos que originan las deformaciones plásticas cuando se utilizan como cemento asfáltico de una mezcla de concreto asfáltico.
- Tipo gel: son los que tienen una mayor proporción de asfáltenos y resinas. La estructura de este tipo es similar a una esponja formada por los asfáltenos y resinas, ocupando los poros los máltenos. El comportamiento reológico es mucho más complejo que en el caso de los asfaltos tipo sol, aproximándose al de un sólido visco-elástico no lineal. Es, por tanto,

menos susceptible a la temperatura y más adecuado para soportar los esfuerzos que producen las deformaciones plásticas.

2.1.6 Propiedades de los asfaltos

Por el gran número de propiedades que posee el asfalto, éstas se pueden clasificar dentro de cinco grupos:

- Propiedades físicas: son aquéllas que hacen referencia al estado del cemento asfáltico o la variación de éste por efecto principalmente de la temperatura
- Propiedades mecánicas: son aquéllas que se refieren a la fluencia o deformación que sufre un cemento asfáltico frente a esfuerzos, cuando se hace variar la temperatura y el tiempo de aplicación de los mismos
- Propiedades de adhesividad: son las que toman en cuenta a la capacidad que tiene los cementos asfálticos para adherirse al agregado, aún en presencia de agua
- Propiedades de durabilidad: éstas estudian la capacidad que tiene el cemento asfáltico para mantener sus propiedades con el paso del tiempo y la acción de los agentes envejecedores u oxidación
- Propiedades químicas: son las que tratan acerca de composición y estructura coloidal

2.1.7 Ensayos para determinar las propiedades de los cementos asfálticos

Para determinar las propiedades de los cementos asfálticos antes mencionadas es necesario realizar una serie de ensayos normados a los que se somete el material bajo distintas condiciones, tomando lo más representativo de lo que luego será su trabajo en servicio, evaluando principalmente la respuesta del mismo.

2.1.7.1 Gravedad específica de materiales asfálticos sólidos y semisólidos (ASTM D 70, AASHTO T 228)

Resumen del método

La muestra es colocada en un picnómetro calibrado. El picnómetro y la muestra son pesados, luego queda un de volumen (si se trata de materiales sólidos o semisólidos, en caso contrario no hay remanente) el cual es completado con agua. El picnómetro lleno es colocado en un baño de María a una temperatura controlada especificada y se le determina su masa. La densidad de la muestra se calcula considerando la masa de la muestra y la masa del agua desalojada por la muestra en el picnómetro lleno.

Uso y significado

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

2.1.7.2 Viscosidad cinemática de asfaltos (ASTM 2170, AASTHO T 201)

Resumen del método

En este método se mide el tiempo necesario para que un volumen fijo de líquido fluya, por capilaridad, a través de un viscosímetro capilar de vidrio, bajo una cabeza exactamente reproducible y a una temperatura muy bien controlada. La viscosidad cinemática se calcula multiplicando el tiempo de flujo en segundos por el factor de calibración del viscosímetro.

Uso y Significado

La viscosidad cinemática caracteriza el comportamiento de un flujo. El método es usado para determinar la consistencia de un ligante bituminoso, como un elemento para establecer la uniformidad de embarques, o de proveedores o de fuentes. Se especifica usualmente a la temperatura de 60° C y 135° C.

2.1.7.3 Viscosidad del asfalto mediante viscosímetros capilares de vacío (ASTM 2171, AASHTO T 202)

Resumen del método

Se mide el tiempo necesario para inducir, por medio del vacío, un volumen fijo de líquido a través de un tubo capilar bajo condiciones estrechamente controladas de vacío y temperatura. La viscosidad en Poises, se calcula, multiplicando el tiempo de flujo, en segundos, por el factor de calibración del viscosímetro.

Uso y significado

La viscosidad a 60° C (140° F) caracteriza el comportamiento del flujo y puede ser usada para requerimientos específicos de asfaltos líquidos y cementos asfálticos.

2.1.7.4 Penetración de los materiales asfálticos (ASTM D 5, AASHTO T 49)

Resumen del método

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

Uso y significado

El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia. Altos valores de penetración indican consistencias más blandas.

2.1.7.5 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos, aparato de anillo y bola, (ASTM D 36, AASHTO T 53)

Resumen del método

Dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos de bronce, se calientan a una tasa controlada en un baño líquido, mientras cada

uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor promedio de las temperaturas, a la cuales los dos discos se ablandan lo suficiente para permitir que cada bola envuelta en material bituminoso, caiga desde una distancia de 25 mm (1").

Uso y significado

Los productos bituminosos son materiales viscoelásticos y no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura definida, sino que gradualmente se tornan más blandos y menos viscosos cuando la temperatura se eleva. Por esta razón, el punto de ablandamiento se debe determinar por medio de un método arbitrario fijo, pero definido, que produzca resultados reproducibles y comparables.

El punto de ablandamiento es útil para clasificar productos bituminosos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas, durante su vida de servicio. También, puede servir para establecer la uniformidad de los embarques o fuentes de abastecimiento.

2.1.7.6 Ductilidad de los materiales asfálticos (ASTM D 113, AASHTO T 51)

Resumen del método

El procedimiento consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima, en cm, que se estira la probeta hasta el instante de la rotura.

Normalmente, el ensayo se realiza con una velocidad de tracción de 50 ± 2.5 mm por minuto y la temperatura de $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 1.0^{\circ}\text{F}$); aunque se puede realizar en otras condiciones de temperatura, debiendo concretarse en este caso la velocidad correspondiente.

2.1.7.7 Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento (ASTM D 2872, AASHTO T 240)

Resumen del método

Se calienta la película de material asfáltico en movimiento en un horno a 163°C (325°F), durante 85 minutos. Los efectos del calor y del aire se determinan a partir de los cambios, en los valores de los ensayos físicos efectuados antes y después del tratamiento en el horno. Se proporciona un procedimiento opcional para determinar el cambio con base en el peso de la muestra.

Uso y significado

Este método indica el cambio producido en las propiedades del asfalto durante el proceso convencional de mezclado en caliente, aproximadamente a una temperatura de 150°C (302°F), mediante medición de la viscosidad. Si se desea, se pueden efectuar también medidas de la penetración o de la ductilidad. Lo anterior produce un residuo que se aproxima a la condición del asfalto, cuando se incorpora en el pavimento. Si la temperatura de mezclado difiere apreciablemente de 150°C (300°F), se presentará sobre las propiedades un efecto mayor o menor.

2.1.7.8 Ensayo al horno lámina asfáltica delgada (ASTM D 1754, AASHTO T 179)

Resumen del Método

Se calienta una lámina de material asfáltico en un horno a 163° C (325°F) durante 5 horas. Los efectos del calor y del aire se determinarán a partir de los cambios en las propiedades físicas, medidas antes y después del tratamiento en el horno. Se presenta, además, un procedimiento alternativo para determinar el cambio en la masa de la muestra.

Uso y Significado

Este método indica el cambio aproximado producido en las propiedades del asfalto, durante el proceso convencional de mezclado en caliente a temperaturas alrededor de 150° C (300° F), mediante la medición de la viscosidad, de la penetración o de la ductilidad. Lo anterior produce un residuo que se aproxima a la condición del asfalto cuando se incorpora al pavimento. Si la temperatura de mezclado difiere apreciablemente de 150°C (300° F), se presentará sobre dichas propiedades, un efecto mayor o menor.

2.1.7.9 Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno o tricloroetano (ASTM D 2042, AASHTO T 44)

Resumen del método

La muestra se disuelve en tricloroetileno o tricloroetano y se pasa a través de un filtro de papel o almohadilla de fibra de vidrio. El material insoluble es lavado, secado y pesado.

Uso y significado

Este método es una medida de la solubilidad del asfalto en tricloroetileno o tricloroetano donde la parte que sea soluble representa los constituyentes cementantes activos.

2.1.7.10 Puntos de Ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland (ASTM D 92, AASHTO T 48)

Resumen del método

La copa del ensayo se llena con la muestra hasta un nivel especificado. Se aumenta rápidamente la temperatura inicial de la muestra y luego a una tasa constante y lenta, a medida que se aproxima al punto de ignición. A intervalos de tiempo especificados se pasa una pequeña llama de ensayo a través de la copa. La temperatura más baja a la cual la aplicación de la llama de ensayo haga que se incendien los vapores que se encuentran por encima de la superficie del líquido, se toma como el punto de ignición. Para determinar el

punto de llama, se continúa la aplicación de la llama de ensayo hasta cuando ésta haga que el aceite se queme por lo menos durante 5 segundos.

2.1.8 Clasificación de los cementos asfálticos

Los cementos asfálticos se clasifican por tres sistemas diferentes. Los cuales son:

- Por viscosidad
 - Absoluta
 - Después del envejecimiento
- Por penetración

- Por grado de comportamiento (PG): sistema de clasificación del cemento asfáltico basado en las temperaturas máxima y mínima de trabajo a las que se desempeñará la mezcla asfáltica

2.1.9 Especificaciones del cemento asfáltico

Tabla II. Especificaciones del cemento asfáltico

TIPO Y GRADO DEL CEMENTO ASFÁLTICO	ESPECIFICACIÓN
Graduación por viscosidad: <ul style="list-style-type: none">• AC-10• AC-20• AC-40	AASHTO M 226
Graduación por penetración: <ul style="list-style-type: none">• 40-50• 60-70• 85-100• 120-150	AASHTO M 20
Graduación PG: <ul style="list-style-type: none">• 64-22• 70-22• 76-22• 82-22	AASHTO MP 1

FUENTE: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes DGC, Edición 2001, Sección 401

Tabla III. Tabla resumen de ensayos de caracterización con su respectiva norma

PROPIEDADES		ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN	NORMA ASTM	NORMA AASHTO
MASICAS	Peso específico	Picnómetro	D - 70	T - 228
	Viscosidad	Viscosidad cinemática	D - 2170	T - 201
		Viscosidad rotacional	D - 2171	T - 202
Consistencia	Penetración punto de reblandecimiento	D - 5	T - 49	
		D - 36-95	T - 53	
MECÁNICAS	Ductilidad	Ductilómetro	D - 113	T - 51
ADHESIVIDAD	Adhesividad al agregado	Desenvuelta	D - 1664	T - 182
DURABILIDAD	Resistencia al envejecimiento	TFO	D - 1754	T - 179
		RTFO	D - 2872	T - 240
QUÍMICAS	Composición	Solubilidad	D - 2042	T - 44
		punto de inflamación	D - 92	T - 48

FUENTE: Propia

2.2 Agregados pétreos

2.2.1 Definición de agregados pétreos

Son materiales minerales duros e inertes, usados en forma de partículas graduadas o fragmentadas, como el esqueleto mineral que le da la capacidad portante a la capa de pavimento. Este esqueleto mineral constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso de la mezcla de concreto asfáltico en caliente.

2.2.2 Tipos de agregados pétreos

Según el origen y el proceso de manufactura que se les dé se pueden clasificar, en los siguientes tipos:

2.2.2.1 Asfaltos Agregados naturales

Son agregados producidos mediante procesos naturales de intemperización que se encuentran en yacimientos de origen fluvial, eólico, marino y en riberas de ríos. Son usados, con muy poco o ningún procesamiento. Los agregados naturales más utilizados en la construcción de pavimento son las gravas o cantos rodados y las arenas.

2.2.2.2 Agregados procesados

Son aquellos agregados que antes de ser utilizados deben ser triturados y tamizados para que se tenga un tamaño de agregado manejable con cierto rango de tamaño de partícula. Pueden ser de dos tipos de fuentes: a) gravas naturales provenientes de riberas de ríos, b) canteras abiertas.

2.2.2.3 Agregados artificiales

Estos agregados proceden de procesos industriales, de los cuales son un subproducto, o bien del tratamiento industrial de materias primas, para ser usados específicamente como agregado, también pueden proceder de la trituración y posterior clasificación de productos de demolición y del reciclado de concretos asfálticos envejecidos.

2.2.3 Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a su tamaño

2.2.3.1 Agregado grueso

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz No. 4.

2.2.3.2 Agregado fino

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz No. 4 y queda retenido en el tamiz No. 200.

2.2.3.3 Polvo mineral o filler

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz No. 200.

2.2.4 Características de los agregados gruesos para su utilización en las mezclas asfálticas

2.2.4.1 Abrasión (*AASHTO T 96, ASTM C 131, ASTM C 535*)

El coeficiente de desgaste mecánico, realizado por medio de la máquina de los Ángeles, debe ser menor o igual a 35%.

**2.2.4.2 Desintegración al sulfato de sodio
(AASHTO T 104 & ASTM C 88)**

El coeficiente de desgaste químico, por medio del sulfato de sodio a cinco ciclos, debe ser menor o igual a 8%.

2.2.4.3 Partículas trituradas (ASTM D 5821-95)

Como mínimo el 75% de sus partículas debe tener 2 o más caras fracturadas y el 90%, una cara fracturada.

2.2.4.4 Partículas planas y alargadas (ASTM D 4791)

Deben de ser menor o igual a 8%.

**2.2.5 Características de los agregados finos para su utilización
en las mezclas asfálticas**

2.2.5.1 Abrasión (AASHTO T 96)

El coeficiente de desgaste mecánico, realizado por medio de la Máquina de los Ángeles, debe ser menor o igual a 25%.

2.2.5.2 Equivalente de arena (AASHTO T 176, ASTM D 2419)

Debe ser mayor o igual a 35%

2.2.5.3 Índice plástico (AASHTO T 90)

Debe ser menor o igual a 4%.

2.2.6 Características deseables o de mayor interés acerca del polvo mineral

2.2.6.1 Finura

Ocupa parcialmente los espacios libres dejados por el esqueleto mineral compactado, conformado por las partículas mayores, reduciendo así el volumen de vacíos de la mezcla, evitando un aumento de la cantidad de cemento asfáltico. El empleo del polvo mineral, incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del cemento asfáltico, originando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas asfálticas.

2.2.6.2 Acción estabilizante frente al agua

Incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua debido a que se reduce parcialmente la porosidad de la estructura granular evitando el acceso del agua al interior de la capa y, por otro lado, debido a que algunos polvos minerales presentan una mayor afinidad con el cemento asfáltico, mejoran la resistencia a la acción de desplazamiento que ejerce el agua sobre el cemento asfáltico.

2.2.7 Ensayos a los materiales y normas

- Muestreo de materiales para construcción de carreteras (ASTM D 75 ó AASTHO T 2)
- Reducción del tamaño de las muestras transportadas (ASTM C 702 ó AASHTO T 248)

- Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (ASTM C 136 ó AASHTO T 27)
- Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (No.200) en los agregados (ASTM C 117 ó AASHTO T 11)
- Índice de partículas planas y alargadas (ASTM D 4791)
- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821)
- Ensayo de abrasión por medio de la Máquina de Los Ángeles (ASTM C 131 & ASTM C 535 ó AASHTO T 96)
- Desintegración al sulfato de sodio (ASTM C 88 ó AASHTO T 104)
- Ensayo de equivalente de arenas y agregados finos (ASTM D 2419 ó AASHTO T 196)
- Límite plástico e índice de plasticidad de suelos (ASTM D 4318 ó AASHTO T 90)
- Densidad *bulk* (Peso unitario) de los agregados compactados o sueltos (ASTM C 29)
- Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia de agua (AASHTO T 182)
- Gravedad específica y absorción en agregados gruesos (ASTM C 127 ó AASHTO T 85)
- Gravedad específica y absorción de agregados finos (ASTM C 128 ó AASTHO T 84)
- Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral (ASTM D 854 ó AASHTO T 100)

2.2.7.1 Muestreo de materiales para construcción de carreteras (ASTM D 75 ó AASTHO T 2)

Resumen del método

Este método reúne los procedimientos que se deben seguir para la toma de muestras de roca, escoria, grava, gravilla, arena y llenante mineral, que son utilizados como materiales de construcción de carreteras.

El muestreo de los materiales de construcción contempla los siguientes fines:

- Investigación preliminar de las fuentes de suministro de materiales
- Aceptación o rechazo de las fuentes y control de producción en ellas
- Inspección de los materiales en obra y control de operación de los materiales durante el trabajo

Uso y significado

La toma de muestras es tan importante como los ensayos, y el encargado de ello debe tomar todas las precauciones necesarias, para obtener muestras que indiquen la verdadera naturaleza y las verdaderas características de los materiales que representan.

2.2.7.2 Reducción del tamaño de las muestras transportadas (ASTM C 702 ó AASHTO T 248)

Resumen del método

Esta norma describe tres procedimientos apropiados para reducir el tamaño de las muestras de agregados traídas del terreno, el tamaño apropiado para efectuar los ensayos necesarios, aplicando técnicas con las cuales se pretenden minimizar las posibles variaciones en las características medidas, resultantes de tal reducción.

Uso y significado

Los métodos señalados en esta norma, permiten reducir el gran tamaño obtenido en el campo, a un tamaño conveniente para desarrollar una serie de ensayos útiles para describir el material y medir sus características de calidad; en forma tal, que la porción reducida sea una verdadera representación, no sólo de la muestra de campo, sino de toda la fuente de materiales. Las muestras más grandes, tenderán a ser más representativas del total de la fuente de agregados.

Cada método de ensayo individual señala la cantidad mínima de material que debe ser ensayada.

Bajo ciertas circunstancias, no es recomendable la reducción del tamaño de las muestras de campo, antes de ensayar el material. Algunas veces no es posible evitar diferencias sustanciales entre los resultados de distintas muestras de ensayo escogidas, por ejemplo, en el caso de un agregado que tenga relativamente pocas partículas de tamaño grande en la muestra de campo. La

ley de probabilidades establece que es posible que estas pocas partículas queden desigualmente distribuidas entre muestras de tamaño reducido. Similarmente, si la muestra de ensayo está siendo examinada para comprobar la sola presencia de ciertos contaminantes, presentes como unos pocos pequeños fragmentos en pequeños porcentajes, se deberá tener especial cuidado en la interpretación de los resultados de ensayos sobre muestras reducidas. La probabilidad de la inclusión o exclusión de sólo una o dos partículas en la muestra escogida, puede influir en forma importante sobre la interpretación de las características de la muestra original. En casos como éste, se debe ensayar la muestra completa de campo.

2.2.7.3 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (ASTM C 136 ó AASHTO T-27)

Resumen del método

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente.

Uso y significado

Este método se usa principalmente para determinar la granulometría de los materiales propuestos que serán utilizados como agregados. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones que son aplicables y para suministrar los datos necesarios para la producción de diferentes agregados y mezclas que contengan agregados.

La determinación exacta del material que pasa el tamiz de 75 μm (No.200) no se puede lograr mediante este ensayo. El método de ensayo que se debe emplear es el dado por la norma ASTM C-117. Determinación de la cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (No.200).

2.2.7.4 Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (No.200) en los agregados (*ASTM C 117 ó AASHTO T 11*)

Resumen del método

Durante el ensayo se separan de la superficie del agregado, por lavado, las partículas que pasan el tamiz de 75 μm (No.200), tales como: arcillas, agregados muy finos y materiales solubles en el agua.

Se describen dos procedimientos, uno que utiliza solamente agua en la operación de lavado, y otro que emplea un agente humectante para favorecer el desprendimiento del material más fino que 75 μm (No.200), del material grueso. Si no se especifica lo contrario, se usará el procedimiento de sólo agua.

Con la mayoría de los agregados, el agua natural es adecuada para separar el material más fino del grueso. En algunos casos, sin embargo, el material más fino está adherido a las partículas más gruesas; tal como sucede con algunos materiales arcillosos y de otro tipo que pueden estar cubriendo los agregados extraídos de las mezclas bituminosas. En tales casos, el material fino se separa más fácilmente añadiendo al agua de lavado un agente humectante.

Uso y significado

El material fino que pasa el tamiz de 75 μm (No.200), se puede separar de las partículas mayores en forma mucho más eficiente y completa, mediante tamizado por vía húmeda que a través del tamizado en seco. Por esto, cuando se desean determinaciones precisas del material más fino que 75 μm en los agregados finos o gruesos, se usa este método, antes de efectuar el tamizado en seco de la muestra (norma ASTM C-136).

Los resultados de este ensayo se incluyen en los cálculos obtenidos mediante tamizado en seco (norma ASTM C-136) y se informan junto con los resultados de dicho ensayo.

2.2.7.5 Índice de partículas planas y alargadas (ASTM D 4791)

Resumen del método

Se mide partículas individuales de agregado de una fracción de tamaño específico de tamiz para determinar las relaciones de ancho/espesor, longitud/ancho o longitud/espesor.

Uso y significado

En algunos casos las partículas planas o alargadas de agregados pueden interferir en la colocación y dificultar la compactación del material.

Este método de ensayo provee un mecanismo para verificar el cumplimiento de las especificaciones que limitan tales partículas, o para determinar las características de forma relativa de agregados gruesos.

2.2.7.6 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821)

Objeto

Esta norma describe el procedimiento para determina el porcentaje, en masa o por conteo, de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos.

Uso y significado

Algunas especificaciones contienen requisitos relacionados a un porcentaje de partículas fracturadas en agregados gruesos. Uno de los propósitos de este requisito es incrementar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregado ligadas o no ligadas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y, proporcionar mayor fricción y textura para agregados usados en capas superficiales de pavimento. Este método proporciona un procedimiento estandarizado para determinar la aceptabilidad de los agregados gruesos con respecto a esos requisitos.

Las especificaciones difieren en el número de caras fracturadas requeridas en una partícula fracturada, y también difieren en cual criterio utilizar, si el porcentaje en peso o el porcentaje por conteo de partículas. Si la

especificación no lo define con claridad, utilice el criterio de al menos una cara fracturada y calcule el porcentaje en peso.

2.2.7.7 Ensayo de abrasión por medio de la Máquina de Los Ángeles (ASTM C 131 & ASTM C 535 ó AASHTO T 96)

Objeto

Este método se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½") y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3/4"), por medio de la máquina de los Ángeles.

El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva.

Uso y significado

Este ensayo ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados no brindan automáticamente comparaciones válidas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura.

Los límites de las especificaciones deben ser asignados con extrema precaución, considerando los tipos de agregados disponibles y su comportamiento histórico en aplicaciones finales específicas.

2.2.7.8 Desintegración al sulfato de sodio (*ASTM C 88* ó *AASHTO T 104*)

Objeto

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir, para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados, por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, seguido de secado al horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros permeables. La fuerza de expansión interna derivada de la rehidratación de la sal después de reinmersión, simula la expansión del agua por congelamiento.

Mediante este método se puede obtener una información útil para juzgar la calidad de los agregados, que han de estar sometidos a la acción de los agentes atmosféricos, sobre todo cuando no se dispone de datos sobre el comportamiento de los materiales que se van a emplear, en las condiciones climatológicas de la obra. Se llama la atención sobre el hecho que los resultados que se obtienen varían según la sal que se emplee y que hay que tener cuidado al fijar los límites en las especificaciones en que se incluya este ensayo.

Uso y significado

Este método es un procedimiento para hacer un estimativo preliminar de la sanidad de los agregados a ser usados en concretos y otros propósitos. Los valores obtenidos pueden ser comparados con especificaciones que se han diseñado, para indicar la posibilidad de usar el agregado propuesto. Dado que la precisión de este método es baja, el rechazo de los agregados que no cumplan las especificaciones pertinentes, no puede darse sin confirmar con los

resultados de otros ensayos mejor relacionados con el uso que se le va a dar al material.

Los valores de porcentaje de pérdidas admisibles resultantes de aplicar este método, generalmente difieren para agregados finos y agregados gruesos. Los resultados del ensayo son, generalmente, más severos cuando se utilizan sulfato de magnesio, por lo tanto, los porcentajes de pérdida permitidos cuando se usan sulfatos de magnesio son normalmente mayores que los permitidos cuando se usa sulfato de sodio.

2.2.7.9 Ensayo de equivalente de arenas y agregados finos (ASTM D 2419 ó AASHTO T 196)

Resumen del método

A un volumen determinado de suelo o agregado fino se le adiciona una pequeña cantidad de solución floculante, mezclándolos en un cilindro de plástico graduado y agitándolos para que las partículas de arena pierdan la cobertura arcillosa. La muestra es entonces irrigada, usando una cantidad adicional de solución floculante, para forzar el material arcilloso a quedar en suspensión encima de la arena.

Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas de la arcilla floculada y de la arena en el cilindro. El equivalente de arena es la relación entre la altura de arena y la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Uso y significado

Este ensayo produce como resultado un valor empírico de la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso presente en la muestra de suelo o agregado fino.

Se puede especificar un valor mínimo del equivalente de arena, para limitar la cantidad admisible de finos arcillosos en un agregado.

Este método de ensayo permite determinar rápidamente, en el campo, variaciones de calidad de los agregados durante la producción o la colocación.

2.2.7.10 Límite plástico e índice de plasticidad de suelos (ASTM D 4318 ó AASHTO T 90)

Objeto

El Límite líquido se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso de la muestra, con el cual el suelo cambia de estado líquido al plástico.

El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, con el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

Un valor observado o calculado de un límite de un suelo debe redondearse a la unidad más cercana.

El método de moldeo manual de rollos de suelo debe ser dado por el procedimiento normativo indicado en esta norma. Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la cual pueden formarse rollos de suelo de unos 3mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos rollos se desmoronen.

2.2.7.11 Densidad *bulk* (Peso Unitario) de los agregados compactados o sueltos (ASTM C 29)

Objeto

Esta norma tiene por objeto establecer el método para determinar la densidad *bulk* (peso unitario) y el porcentaje de vacíos de los agregados, ya sean finos, gruesos o una mezcla de ambos.

Este método es aplicable a materiales que tengan tamaño máximo nominal menor o igual a 125mm (5").

Uso y significado

Este método de prueba se emplea a menudo para determinar valores de densidad *bulk*, que son utilizadas por muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de concreto.

La densidad *bulk* puede también ser usada para determinar la relación masa/volumen, para conversiones en acuerdos de compra. Sin embargo, la

relación entre el grado de compactación de los agregados en una unidad de transporte o en una pila de acopio y la lograda con este método de prueba se desconoce. Además, los agregados en las unidades transportadoras y en las pilas de acopio generalmente contienen humedad absorbida o de superficie (esta última afecta el abultamiento), en cambio este método de prueba determina la densidad *bulk* basada en condiciones en seco.

2.2.7.12 Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia de agua (AASHTO T 182)

Resumen del método

El agregado seleccionado y preparado se mezcla con el ligante a la temperatura indicada, según el tipo de ligante asfáltico empleado. En el caso de emplear asfaltos líquidos y alquitranes se debe someter a un periodo de curado a 60° C (140° F). En el caso de utilizar emulsiones asfálticas, el agregado es cubierto por el ligante y sujeto a un periodo de curado a 135° C (275° F). Después del cubrimiento, en el caso de cementos asfálticos, o del curado, en el caso de emulsiones asfálticas, asfaltos líquidos y alquitranes, el agregado cubierto con el ligante se coloca en inmersión en agua destilada de 16 a 18 horas. Al final del periodo de inmersión y con la mezcla bajo el agua, se estima visualmente, el área de agregado que no presenta desprendimiento de ligante y se expresa en porcentaje, por arriba o por debajo del 95%.

Uso y significado

Este método no se debe usar como una medida del comportamiento en el campo porque tal correlación no se ha establecido.

En este procedimiento no se intentará evaluar el porcentaje de superficie que permanece cubierta con niveles de porcentaje inferiores a 95%. Esto es una limitación del método y, consecuentemente, no se podrá deducir que una mezcla de agregado y ligante que presenta, después del ensayo, una superficie cubierta estimada inferior a 95%, tenga necesariamente un comportamiento poco satisfactorio en el campo.

2.2.7.13 Gravedad específica y absorción en agregados gruesos (ASTM C 127 ó AASTHO T 85)

Objeto

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas *bulk*, *bulk* saturada y superficialmente seca y aparente, así como la absorción, después que los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm (tamiz No.4) han estado sumergidos en agua durante 24 horas. Este método de ensayo no se debe aplicar a agregados pétreos livianos.

2.2.7.14 Gravedad específica y absorción de agregados finos (ASTM C 128 ó AASTHO T 84)

Objeto

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas *bulk* y aparente 23 /23°C (73.4/73.4°F), así como la absorción de agregados finos.

Este método determina (después de 24 horas en agua) la gravedad específica *bulk* y la aparente como están definidas en la norma ASTM C 127, la gravedad específica *bulk* basada en la masa saturada y superficialmente seca

2.2.7.15 Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral (ASTM D 854, AASHTO T 100)

Objeto

Este método de ensayo se utiliza para determinar la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral (filler), por medio de un picnómetro. Cuando el suelo está compuesto sólo de partículas mayores que el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se deberá seguir el método de ensayo para determinar la gravedad específica y la absorción del agregado grueso, norma ASTM C 127. Cuando el suelo está compuesto por partículas mayores y menores que el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se utilizará el método de ensayo correspondiente a cada porción (normas ASTM C 128 e ASTM C 127). El valor de gravedad específica para el suelo será el promedio ponderado de los dos valores así obtenidos. Cuando el valor de la gravedad específica sea utilizado en cálculos relacionados con la porción hidrométrica del análisis granulométrico de suelos (norma ASTM D 422), la gravedad específica se debe determinar de la porción de suelo que pasa el tamiz de 2.00 mm (No.10), de acuerdo con el método que se describe en la presente norma.

Los valores de gravedad específica se deben expresar con 3 cifras significativas.

Uso y significado

La gravedad específica de un suelo se usa en casi toda ecuación que exprese relaciones de fase de aire, agua y sólidos en un volumen dado de material.

El término partículas sólidas, como se usa en ingeniería geotécnica, hace relación a las partículas minerales que aparecen naturalmente y que no son prácticamente solubles en agua. Por lo tanto, la gravedad específica de materiales que contengan materias extrañas (tales como cemento, cal, etc.), materia soluble en agua (tal como cloruro de sodio) y suelos conteniendo materia con gravedad específica menor de uno, típicamente requieren un tratamiento especial o una definición particular de gravedad específica.

3. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1 Métodos de diseño de mezclas asfálticas

El diseño de una mezcla asfáltica consiste en establecer las proporciones óptimas de los agregados y el cemento asfáltico, que producirán una mezcla que pueda ser extendida y compactada en una superficie uniforme de textura adecuada, que sea resistente a la deformación e impermeable al agua y aire.

Existen varios métodos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. A continuación se muestra la evolución de estos.

Tabla IV. Evolución de los métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente

	Método	Año	Fundamentos
1	The Hubbard-Field	1920's	Usaba una estabilidad como prueba para medir deformación. Funcionó para evaluar mezclas con granulometría fina, pero no para granulometrías gruesas.
2	Método Marshall	1940's	Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. Cambió las especificaciones en los años 40's.
3	Método Hveem	1940's	Evalúa una estabilidad pseudotriaxial

Continuación tabla IV

4	Método de la WASHTO	1984	Recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia en la formación de roderas
5	Método de la AAMAS	1987	Nuevo método de compactación en laboratorio y de la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.
6	Método SUPERPAVE	1993	Contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo de laboratorio, grietas por fatiga y grietas por temperatura.

FUNTE: Propia

3.2 Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente

El concepto del Método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Bruce Marshall, ex-Ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi. El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y

contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento³.

3.2.1 Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el Aparato Marshall (AASHTO T 245 – 97)

Objeto

- Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall. El procedimiento se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio, como para el control en obra de las mismas. El método es aplicable a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 mm (1")

Resumen del método

- El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, preparadas como se describe en esta norma, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall y determinando su estabilidad y deformación. Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente las gravedades específicas de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura, de acuerdo con las normas correspondientes

³ Asphalt Institute. Manual MS-22 Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla en Caliente, Lexington. KY. EUA, (1998), p. 70.

- El procedimiento se inicia con el adecuado muestreo de los materiales a utilizar y la preparación de las respectivas probetas de ensayo, para lo cual los materiales utilizados deben cumplir con las especificaciones que correspondan, antes mencionadas, de acuerdo a las necesidades del proyecto. Además, se deberá determinar previamente la gravedad específica *bulk* de los agregados, así como la gravedad específica del asfalto, y se deberá efectuar un análisis de densidad - vacíos de las probetas compactadas

Para determinar el contenido óptimo de asfalto para agregados con una granulometría dada o preparada, se deberá elaborar una serie de 18 probetas con distintos porcentajes de asfalto, de tal manera que al graficar los diferentes valores obtenidos después de ser ensayadas, permitan determinar ese valor óptimo.

Equipo y materiales necesarios

- Dispositivo para moldear probetas: consiste en un molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. El molde deberá tener un diámetro interior de 101.6 mm (4") y una altura interna aproximada de 76.2 mm (3")
- Extractor de probetas: elemento de acero en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor
- Martillo de compactación: consiste en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro y un pisón deslizante de 4536 ± 9 g (10 ± 0.02 lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de 457.2 ± 1.524 mm (18 ± 0.06")

- Pedestal de compactación: consistente en una pieza prismática de madera de base cuadrada de 203.2 mm de lado y 457.2 mm de altura (8" x 8" x 18") y provista, en su cara superior, de una platina cuadrada de acero de 304.8 mm de lado x 25.4 mm de espesor (12" x 12" x 1"), firmemente sujeta en la misma
- Sujetador para el molde: consistente en un dispositivo con resorte de tensión diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal

Nota 1.- En lugar del martillo de operación manual y asociado con los equipos hasta ahora descritos, se podrá usar un martillo mecánico, previamente calibrado para ofrecer resultados comparables con los del martillo manual.

- Mordazas y medidor de deformación: las mordazas consisten en dos segmentos cilíndricos, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") maquinado con exactitud. La mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella, que sirven de guía a la mordaza superior. El movimiento de la mordaza superior se debe efectuar sin un rozamiento apreciable

El medidor de deformación consiste en un deformímetro de lectura final fija, con divisiones en 0.25 mm (0.01"). En el momento del ensayo, el medidor deberá estar firmemente apoyado sobre la mordaza superior y su vástago se apoyará en una palanca ajustable.

- Prensa: para la rotura de las probetas se empleará una prensa mecánica o hidráulica capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50.8 mm por minuto (2"/min.). Su capacidad de carga mínima deberá ser de 40 kN
- Medidor de la estabilidad: la resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 22.2 kN (2265 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 44.5 N (4.54 kgf) hasta 4.45 kN (454 kgf) y 111.2 N (11.4 kgf) hasta 22.2 kN (2265 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.0025 mm (0.0001")

Nota 2.- En lugar de medir la estabilidad con un anillo dinamométrico, se puede emplear cualquier otro dispositivo de medida de carga que cumpla los requisitos indicados anteriormente.

- Elementos de calefacción: para calentar los agregados, el material asfáltico, el conjunto de compactación y la muestra, se empleará un horno o placa de calefacción, provisto de control termostático, capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 2.8° C (5° F)
- Mezcladora: es recomendable que la operación de mezclado de los materiales se realice con una mezcladora mecánica capaz de producir, en el menor tiempo posible, una mezcla homogénea a la temperatura requerida. Si la operación de mezclado se realiza a mano, este proceso se debe realizar sobre una placa de calefacción o estufa, para evitar el enfriamiento de los materiales, tomando las precauciones necesarias para evitar los sobrecalentamientos locales

- Tanque para agua: de 152.4 mm (6") de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$ ($140^{\circ} \pm 2.0^{\circ} \text{ F}$)

El tanque deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para sostener las probetas por lo menos a 50.8 mm (2") sobre el fondo del tanque.

- Tamices: los necesarios para reproducir en el laboratorio la granulometría exigida por la especificación para la mezcla que se va a diseñar
- Termómetros blindados: de 9.9° C a 204° C (50° F a 400° F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 2.8° C

Para la temperatura del baño de agua se utilizará un termómetro con escala de 20° C a 70° C y sensibilidad de 0.2° C (68° F a $158^{\circ} \text{ F} \pm 0.4^{\circ} \text{ F}$).

- Balanzas: una de cinco (5) kg de capacidad, sensible a un (1) g para pesar agregados y asfalto; otra de dos (2) kg de capacidad, sensible a 0.1 g, para las probetas compactadas
- Guantes: de soldador para manejar equipo caliente y de caucho para sacar las muestras del baño de agua
- Crayolas: para identificar las probetas

- Bandejas metálicas: de fondo plano para calentar agregados y cubetas metálicas redondas de 4 litros (1 galón) de capacidad, para mezclar asfalto y agregados, cucharones, recipientes, espátulas, papel filtro, etc

Preparación de probetas

- Número de probetas: para una graduación particular del agregado, original o mezclado, se preparará una serie de 3 probetas para cada contenido de asfalto (con incrementos de 0.5% en peso, entre ellos, dentro de un rango de 3.5 a 7 %); de tal manera que los resultados se puedan graficar en curvas que indiquen un valor óptimo definido, con puntos de cada lado de este valor. Como mínimo, se prepararán tres probetas para cada contenido de asfalto
- Cantidad de materiales: un diseño con seis contenidos de asfalto, necesitará, entonces, por lo menos dieciocho (18) probetas. Para cada probeta se necesitan aproximadamente 1200 g de ingredientes: para una serie de muestras de una graduación dada resulta conveniente disponer de unos 23 kg (50 lb) de agregados y alrededor de 4 litros (1 galón) de cemento asfáltico. Se requiere, además, una cantidad extra de materiales para análisis granulométricos y determinación de gravedades específicas
- Preparación de los agregados: los agregados se deberán secar hasta alcanzar la masa constante a una temperatura entre 105° C y 110° C, y se separarán por tamizado en los tamaños especificados. En general se recomiendan las porciones que se indican a continuación, aunque las fracciones definitivas dependerán de los tamaños disponibles en la planta de producción

Tabla V. Fracciones para secado de agregado para preparación de probetas

25.0 mm a 19.0 mm	(1" a 3/4")
19.0 mm a 9.50 mm	(3/4" a 3/8")
9.50 mm a 4.75 mm	(3/8" a No. 4)
4.75 mm a 2.36 mm	(No. 4 a No. 8)
Pasante de 2.36 mm	(No. 8)

FUNTE: Norma AASHTO T 245-97

- Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación: la temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico para las mezclas, será la requerida para producir una viscosidad de 170 ± 20 centiStokes. (1 centistoke = $1 \text{ mm}^2/\text{s}$)

La temperatura a la cual se deberá calentar el cemento asfáltico para que tenga una viscosidad de 280 ± 30 centiStokes, será la temperatura de compactación.

- Preparación de las mezclas: en bandejas previamente taradas, separadas para cada fracción de la muestra, se pesarán sucesivamente las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas de acuerdo con la graduación necesaria para la fabricación de cada probeta, de tal forma que ésta resulte con una altura de 63.5 ± 1.3 mm. Se calentarán los agregados en una plancha de calentamiento o en el horno a una temperatura de 28°C (50°F) por encima de la temperatura de mezcla. Se transfieren los agregados al recipiente de mezclado donde se mezclan en seco y se forma a continuación un cráter en el centro dentro del cual se vierte la cantidad

requerida de asfalto, debiendo estar ambos materiales en ese instante a temperaturas comprendidas dentro de los límites establecidos anteriormente. A continuación, se mezclan los materiales lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea

Nota 3.- Para conseguir la altura adecuada de las probetas para el ensayo, es conveniente elaborar una probeta de prueba. Para ello, se tomará una cantidad de agregados de 1200 g, corrigiéndose luego para la altura debida, con la expresión, en el sistema Internacional SI:

$$\text{Masa correcta del agregado (g)} = \frac{63.5 \times \text{Masa usada de agregados (g)}}{\text{Altura obtenida de la probeta (mm)}}$$

- Compactación de las probetas: simultáneamente con la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar, placa de base y la base del martillo de compactación, se limpian y calientan en un baño de agua o en el horno a una temperatura comprendida entre 93.3° C y 148.9° C (200° F y 300° F)

Se arma el conjunto del dispositivo para moldear las probetas y se coloca un papel filtro en el fondo del molde, antes de colocar la mezcla. A continuación, se coloca toda la mezcla recién fabricada en el molde y se la golpea vigorosamente con una espátula o palustre caliente, 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior. Se quita el collar y se alisa la superficie hasta obtener una forma ligeramente redondeada. La temperatura de la mezcla inmediatamente antes de la compactación deberá hallarse dentro de los límites de temperatura de compactación establecidos anteriormente.

Se vuelve a poner el collar y se coloca el conjunto en el sujetador sobre el pedestal de compactación. Se coloca otro papel filtro sobre la superficie de la mezcla y se aplican 50 o 75 golpes según se especifique, de acuerdo con el tránsito de diseño, empleando para ello el martillo de compactación con una caída libre de 457.2 mm (18"), manteniendo el eje del martillo perpendicular a la base del molde durante la compactación. Se retiran la placa de base y el collar, se colocan en los extremos opuestos del molde; se vuelve a montar éste en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la muestra.

Después de la compactación, se retira la base y se deja enfriar la muestra al aire, hasta que no se produzca ninguna deformación cuando se la saque del molde. Se pueden utilizar ventiladores de mesa, cuando se desee un enfriamiento más rápido, pero en ningún caso agua, a menos que la muestra se coloque dentro de una bolsa plástica. Se saca cuidadosamente la probeta del molde por medio del extractor, se identifica con la crayola, se mide su espesor y se coloca sobre una superficie plana, lisa, donde se deja en reposo durante una noche.

Ensayo de estabilidad y flujo

- Se colocan las probetas en un baño de agua durante 30 o 40 minutos, o en el horno durante 2 horas, manteniendo el baño o el horno a $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$ ($140^{\circ} \pm 1.8^{\circ} \text{ F}$)

Se limpian perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo antes de la ejecución de éste, y se lubrican las barras guías de tal manera que la mordaza superior se deslice libremente.

La temperatura de las mordazas se deberá mantener entre 21.1° C y 37.8° C (70° F a 100° F), empleando un baño de agua cuando sea necesario.

- Se retira una probeta del baño de agua u horno y se coloca centrada en la mordaza inferior; se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa

Se coloca el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero, y se mantiene el vástago, firmemente, contra la mordaza superior mientras se aplica la carga de ensayo.

- Se aplica, a continuación, la carga sobre la probeta con la prensa, a una tasa de deformación constante de 50.8 mm (2") por minuto, hasta que ocurra la falla, es decir cuando se alcanza la máxima carga y luego disminuye, según se lea en el dial respectivo. Se anota el valor máximo de carga registrado en la máquina de ensayo o, si es el caso, la lectura de deformación del dial indicador, la cual se convierte a carga, multiplicándola por la constante del anillo previamente calibrado

Si el espesor de la probeta es diferente de 63.5 mm, el valor registrado de Estabilidad Marshall deberá ser corregido, multiplicándolo por el factor que corresponda según tablas de corrección por espesor.

Se anota la lectura en el medidor de flujo al instante de alcanzar la carga máxima. Este será el valor del flujo para la probeta, expresado en mm, e indica la disminución de diámetro que sufre la probeta entre la carga cero y el instante de la rotura. El procedimiento completo, a partir de la sacada de la probeta del baño de agua, se deberá completar en un período no mayor de 30 segundos.

El valor total en Newtons (kgf) que se necesite para producir la falla de la muestra se registrará como el valor de resistencia o estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica ensayada.

3.3 Gravedad específica de las mezclas asfálticas

Parte importante del diseño de mezclas asfálticas es la determinación de las gravedades específicas de la mezcla de agregado pétreo y asfalto, dado que con la ayuda de éstas se puede determinar el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto.

A continuación se describen las normas que se deben seguir para determinar las gravedades específicas que se usan en el diseño de mezclas asfálticas.

3.3.1 Gravedad específica *bulk* de mezclas asfálticas compactadas (ASTM D 2726 ó ASTM D 1188)

Objeto

- Este método se refiere a la determinación de la gravedad específica *bulk*, y densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas
- Este método se deberá emplear únicamente con mezclas asfálticas compactadas de granulometría densa, o que prácticamente no sean absorbentes. No se puede utilizar en especímenes de mezclas abiertas o con vacíos intercomunicados y/o que absorban más del 2% de agua respecto al volumen

Resumen del método

- El espécimen se sumerge en un baño de agua a 25°C y se anota su masa bajo el agua. Se seca rápidamente con un trapo húmedo y se pesa al aire. La diferencia entre las dos masas se emplea para medir la masa de un volumen igual de agua a 25°C. Factores de corrección son proporcionados para convertir la masa del agua a la temperatura de referencia a 25°C
- El método de ensayo proporciona una guía para la determinación de la masa del espécimen seco. La gravedad específica se calcula a partir de estas masas. La densidad se obtiene multiplicando gravedad específica *bulk*, del espécimen, por la densidad del agua

3.3.2 Gravedad específica teórica máxima (RICE), ASTM D 2041

Objeto

- Este método se refiere al procedimiento para la determinación de la gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas en caliente para pavimentos a 25° C, sin compactar
- Los valores se deben expresar en unidades SI

Uso y significado

La gravedad específica teórica máxima y la densidad de mezclas asfálticas, para pavimentos, son propiedades fundamentales, cuyos valores están afectados por la composición de la mezcla en términos del tipo y cantidad de agregados y de los materiales asfálticos.

Estos valores son usados para calcular el porcentaje de vacíos con aire, en una mezcla de pavimento asfáltico en caliente, compactada.

Ellos son esenciales para calcular la cantidad de asfalto absorbido por los poros internos del agregado en una mezcla asfáltica en caliente.

El resultado son valores importantes para el proceso de compactación, de mezclas asfálticas para pavimentos.

3.4 Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas

Las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas son un análisis unificado de las propiedades volumétricas del asfalto y los agregados, las que dan un indicativo del probable comportamiento del concreto asfáltico en servicio.

Dentro de las propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica compactada podemos mencionar:

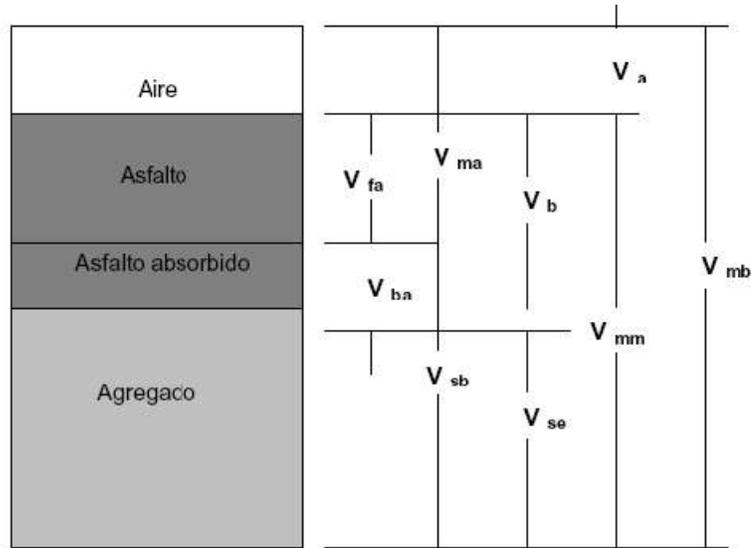
- Vacíos de aire (V_a)
- Vacíos en el agregado mineral (VMA)
- Vacíos llenos con asfalto (VFA)
- Contenido de asfalto efectivo (P_{be})

Las definiciones, conceptos y fórmulas que se presentan a continuación son una traducción de una parte del Capítulo II, del Manual del Instituto de Asfalto.

3.4.1 Definiciones

- Vacíos de aire (V_a): son las burbujas de aire que se encuentran entre las partículas de agregados cubiertos con asfalto, en una mezcla asfáltica compactada. Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen
- Vacíos en el agregado mineral (VMA): volumen intergranular de vacíos entre partículas del agregado de una mezcla asfáltica en caliente compactada (incluye vacíos de aire y el volumen de asfalto efectivo). Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen
- Vacíos llenados con asfalto (VFA): es la fracción de los vacíos entre agregados minerales, que contiene ligante asfáltico. Se expresa como porcentaje de los vacíos entre agregados minerales o VAM. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla
- Contenido efectivo de asfalto (P_{be}): contenido total de asfalto menos la fracción de ligante asfáltico absorbida por las partículas del agregado. Se expresa como porcentaje del peso de la mezcla de pavimento compactada
- Volumen de asfalto absorbido (V_{ba}): volumen de ligante asfáltico en una mezcla asfáltica en caliente que ha sido absorbida en los poros de las partículas de agregados. V_{ba} es un volumen de ligante asfáltico en la mezcla asfáltica en caliente que permite calcular el contenido de asfalto efectivo

Figura 1. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada



FUENTE: Instituto Mexicano del Transporte, 2004

- V_a = volumen de vacíos en el agregado mineral
- V_b = volumen *bulk* de la mezcla compactada
- V_{fa} = volumen de la mezcla suelta
- V_{ma} = volumen de vacíos llenos con asfalto
- V_{ba} = volumen de vacíos de aire
- V_b = volumen de asfalto
- V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
- V_{mm} = volumen de agregado mineral (para gravedad específica *bulk*)
- V_{sb} = volumen de agregado mineral (para gravedad específica efectiva)

3.4.2 Gravedad Específica *bulk* de la combinación de agregados

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas; la gravedad específica neta para el agregado total, se calcula usando:

$$= \frac{+ \quad + \quad \dots \quad +}{- \quad + \quad - \quad + \quad \dots \quad + \quad -}$$

Donde:

- G_{sb} = gravedad específica *bulk* para el agregado total
- G_1, G_2, \dots, G_n = gravedad específica neta individual del agregado
- P_1, P_2, \dots, P_n = porcentajes individuales por masa de agregado

La gravedad específica *bulk* del filler mineral es difícil de determinar con certeza. Sin embargo, si la gravedad específica aparente del filler es estimada, el error es usualmente insignificante.

3.4.3 Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se})

Cuando se basa en la gravedad específica máxima de una mezcla, (G_{mm}), la gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}), incluye todos los espacios vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto. La G_{se} se determina empleando la relación:

$$G = \frac{P - P}{\frac{P}{G} - \frac{P}{G}}$$

Donde:

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_{mm} = gravedad específica máxima (ASTM D 2041) de mezcla de concreto asfáltico (sin vacíos de aire)

P_{mm} = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100

P_b = contenido de asfalto con el cual ASTM 2041 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla

G_b = gravedad específica del asfalto

El volumen de asfalto absorbido por los agregados es casi invariablemente menor que el volumen de agua absorbida. Por tanto, el valor para la gravedad específica efectiva, de un agregado, debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva sale de estos límites, su valor se debe asumir como incorrecto. La gravedad específica máxima de la mezcla se calcula mediante la Norma ASTM D 2041/AASHTO T 209.

3.4.4 Porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba})

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla. La absorción del asfalto, (P_{ba}), se determina mediante:

$$P = \frac{G - G}{G G} \times G \times 100$$

Donde:

- P = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado
- G = gravedad específica del cemento asfáltico
- G = gravedad específica efectiva del agregado
- G = gravedad específica *bulk* del agregado

3.4.5 Porcentaje de asfalto efectivo (Pbe)

El contenido de asfalto efectivo, (Pbe), de la mezcla asfáltica es el volumen total de asfalto menos la cantidad de asfalto absorbido dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y gobierna el comportamiento de la mezcla asfáltica. Se determina con:

$$P = P - \frac{P}{100} \times P$$

Donde:

- P = contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla
- P = contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla
- P = contenido del agregado, porcentaje del peso total de la mezcla
- P = asfalto absorbido, porcentaje por peso del agregado

3.4.6 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM)

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 (V_a) y el contenido de asfalto efectivo (P_{be}), expresado como un porcentaje del volumen total. Los VMA pueden calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresarse como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, los VMA pueden estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica, se tiene:

$$VMA = 100 - \frac{G \times P}{G}$$

Donde:

- = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)
- G = gravedad específica *bulk* del total del agregado
- G = gravedad específica *bulk* de la mezcla compactada (ASTM D 1188 ó D 2726)
- P = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje de la masa del agregado, se tiene:

$$\text{VMA} = 100 - \frac{G}{G} \times \frac{100}{100 + P} \times 100$$

Donde:

P = contenido de asfalto, porcentaje de la masa del agregado

3.4.7 Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada (Va)

Los vacíos de aire, (Va), en la mezcla asfáltica compactada, corresponden a los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse empleando la relación:

$$V = 100 \times \frac{G - G}{G}$$

Donde:

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

G = gravedad específica *bulk* del espécimen compactado

G = gravedad específica teórica máxima de la mezcla

3.4.8 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA o VRA)

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, (VFA), no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$\text{VFA} = \frac{\text{VMA} - V}{\text{VMA}} \times 100$$

Donde:

VFA = vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VMA

VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

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

3.5 Criterios para la selección del diseño final de mezcla asfáltica en caliente

Los siguientes conceptos son una traducción del numeral 5.15 (*Selection of final mix design*) del Capítulo 2 del Manual del Instituto del Asfalto:

La selección del diseño final de la mezcla corresponde a la más económica y que cumple satisfactoriamente con todos los criterios establecidos. De cualquier forma, la mezcla no debe ser diseñada para optimizar una propiedad en particular.

Las mezclas con valores anormalmente altos de estabilidad, son indeseables debido a que tienden a ser menos durables o pueden fracturarse prematuramente, bajo altos volúmenes de tránsito. Esta situación es bastante

crítica cuando los materiales de la base y el terreno natural son débiles y permiten deflexiones moderadas o relativamente altas con el tránsito.

La selección del contenido óptimo de asfalto debe balancear todas las propiedades de la mezcla. Normalmente, los criterios de diseño de mezclas producirán un rango limitado de contenidos de asfalto aceptables que cumplan todos los lineamientos.

El contenido de asfalto puede ajustarse en este rango limitado para lograr propiedades de la mezcla que satisfagan los requerimientos de un proyecto en especial; algunas propiedades serán más críticas que otras y dependerán de las circunstancias del diseño, como puede ser: el tránsito, la estructura, el clima, el equipo de construcción y otros factores. Aún más, el proceso de balance no es el mismo para cada pavimento ni para cada diseño de mezcla.

Existen algunas consideraciones en el ajuste que deben ser evaluadas antes de establecer el contenido de asfalto final.

3.5.1 Evaluación de la curva de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)

En muchos casos, lo más difícil en el diseño de mezclas asfálticas es lograr un mínimo de vacíos en el agregado mineral. El éxito consiste en proporcionar suficiente espacio para el asfalto y permitir una adhesión adecuada para ligar las partículas de agregado, cuando las temperaturas se incrementen y el asfalto se expanda.

Normalmente, la curva exhibe una forma de U alargada, decreciendo hasta un valor mínimo para después incrementarse con el aumento del contenido de asfalto, como se observa en la Figura 2-a.

La dependencia entre los VMA y el contenido de asfalto, parece ser una contradicción a la definición. Se podría esperar que el VMA se mantenga constante con la variación del contenido de asfalto, pensando que los vacíos de aire simplemente serán desplazados por el cemento asfáltico. En realidad, el volumen total cambia con el contenido del asfalto y la adopción de una unidad constante de volumen no es correcta. Con el incremento del asfalto la mezcla se vuelve más manejable y se puede compactar más fácilmente (mediante más peso se puede comprimir en un menor volumen). Por consiguiente, la densidad de la mezcla se incrementa cuando los VMA disminuyen.

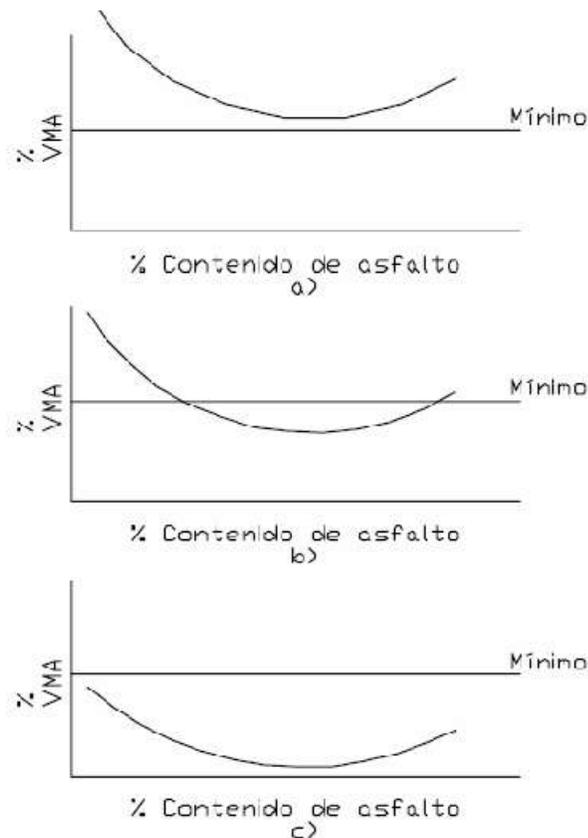
En algún momento cuando el contenido de asfalto aumenta (el fondo de la curva en forma de U), los VMA empiezan a incrementarse porque el material relativamente es más denso (agregado), es desplazado y empujado por el material menos denso (cemento asfáltico). Lo mejor es evitar que los contenidos del asfalto en el lado húmedo o creciente de la curva VMA, así cumplan el mínimo de vacíos de aire y el criterio de VMA correspondiente. Las mezclas con contenidos de asfalto en este rango tienen tendencia a expandirse o exhibir flujo plástico en campo. Cualquier compactación adicional por el tráfico causará la expansión del asfalto, la pérdida del contacto agregado-agregado y, eventualmente, el desgaste en las áreas de alto tráfico. Idealmente, se sugiere seleccionar el contenido de asfalto de diseño un poco a la izquierda del punto inferior de la curva VMA, siempre y cuando no se incumpla ninguno de los otros criterios de diseño.

En algunas mezclas el fondo de la curva VMA es muy plano, lo que significa que las mezclas compactadas no son tan sensibles al contenido del asfalto en este rango, como algunos otros factores. En el rango normal de los contenidos de asfalto, la compatibilidad está más influenciada por las propiedades de los agregados. De cualquier forma, en algún punto la cantidad de asfalto será crítica para el comportamiento de la mezcla y el efecto del bitumen dominará drásticamente los incrementos de VMA.

Cuando el fondo de la curva VMA cae por debajo del nivel del criterio mínimo requerido para el tamaño del agregado máximo nominal de la mezcla (Figura 2-b), se deben realizar cambios en las fórmulas de trabajo. Específicamente, la granulometría del agregado debe modificarse para proporcionar los VMA adicionales. El contenido de asfalto no debe seleccionarse en los extremos del rango aceptable, así se satisfaga el criterio mínimo de los VMA. Sobre el lado izquierdo de la curva, la mezcla puede ser muy seca, propensa a la segregación, y podría tener un alto porcentaje de vacíos de aire. En el lado derecho se espera que sufra deformaciones.

Si el criterio mínimo de VMA está completamente por encima de todo el rango del contenido de asfalto (Figura 2-c), se justifica la reevaluación o el cambio en las fuentes del material.

Figura 2. Relación entre VMA y límite de especificación para el rango de contenido de asfalto



FUENTE: Manual del Instituto del Asfalto

3.5.2 Efecto del nivel de compactación

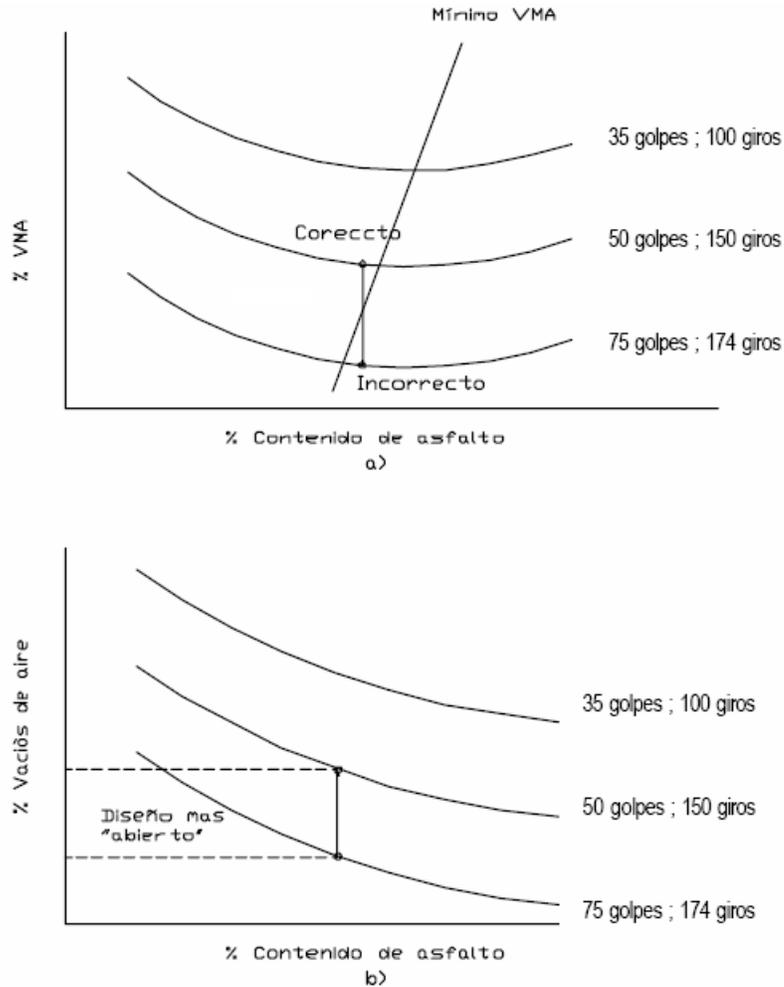
Para un mismo contenido de asfalto, los vacíos de aire (V_a) y los vacíos en el agregado mineral (VMA) disminuyen a mayor esfuerzo de compactación. Como se observa en la Figura 3-a, el esfuerzo de compactación no sólo cambia las magnitudes de los valores, sino que el valor del contenido de asfalto varía para los VMA mínimos. Si una mezcla se diseña un poco a la izquierda del mínimo VMA para un nivel de compactación de 50 golpes ó 150 giros y en la

realidad el pavimento sufre un tráfico pesado mayor al esperado (similar al nivel de diseño de 75 golpes ó 174 giros); entonces, dicho contenido de asfalto ahora corresponde al lado derecho o mojado del punto mínimo de VMA para una mezcla diseñada empleando una compactación de 75 golpes ó 174 giros. Finalmente, el resultado será una mezcla susceptible a desgaste.

Este escenario puede también presentarse en la dirección opuesta. Si una mezcla diseñada con un nivel de compactación de 75 golpes ó 174 giros (Figura 3-b) se emplea para un pavimento con un volumen de tránsito menor el porcentaje final de vacíos de aire (V_a) será considerablemente más alto de lo planeado. Esta condición puede llevar a una mezcla más abierta (permeable), permitiendo que el aire y el agua pasen a través de ella fácilmente. El resultado de esta situación es una mezcla que se endurece prematuramente, se vuelve frágil y quebradiza a una edad temprana, o el agregado se desprende de la mezcla debido a la pérdida de adherencia del asfalto. Por esta razón, es importante que el esfuerzo de compactación empleado en el laboratorio simule el tránsito esperado para el pavimento. Asimismo, la mezcla debe construirse con el equipo de compactación adecuado, con el fin de producir una densidad inicial adecuada e indiferente a las condiciones climáticas.

Es importante anotar que el criterio de los VMA no cambia de acuerdo con el nivel de compactación. Los requerimientos de los VMA (mantener espacio para el asfalto y los vacíos de aire) son consistentes sin tomar en cuenta el nivel de tránsito para el cual se diseña la mezcla.

Figura 3. Efecto del esfuerzo de compactación Marshall en los VMA y los Va



FUENTE: Manual del Instituto del Asfalto

3.5.3 Efecto de los vacíos de aire

Debe enfatizarse que el rango de diseño de los vacíos de aire (3% a 5 %) es el nivel deseado después de varios años de tránsito. Esta meta no varía con el tránsito ya que se supone que el esfuerzo de compactación de laboratorio es seleccionado para el volumen vehicular esperado. La obtención del rango de

los vacíos de aire normalmente se logra si la mezcla se diseña con el esfuerzo de compactación apropiado. El porcentaje de los vacíos después de la construcción se encuentra entre el 6% y 8 %, ya que se espera un poco de densificación con el tránsito.

El resultado de un cambio en cualquier factor o cualquier desvío en el procedimiento de diseño, generará una pérdida de desempeño o vida de servicio de la mezcla. Se han observado mezclas que finalmente se densifican con el 3 % de vacíos y puede esperarse que se desarrolle el ahuellamiento si se colocan en situaciones de tránsito pesado. Varios factores pueden contribuir a este problema, como un incremento arbitrario o accidental en el contenido del asfalto mezclado en la planta o un incremento en la cantidad de partículas finas que pasan el tamiz No. 200.

De forma similar, pueden ocurrir problemas si el contenido final de vacíos de aire está por encima del 5%, o si el pavimento se construye con más del 8% de vacíos de aire inicial. La fragilidad, el agrietamiento prematuro, el desgaste y el desprendimiento son algunas de las posibles patologías bajo estas condiciones.

El objetivo global es limitar los ajustes del diseño del contenido de asfalto a menos de 0.5% de vacíos de aire de la media del criterio de diseño (4%), especialmente en la parte baja del rango; y, para verificar que la mezcla de la planta se parezca exactamente a la elaborada en el laboratorio.

3.5.4 Efecto de los vacíos llenos de asfalto (VFA)

Aunque los VFA, los VMA y los Va, están interrelacionadas entre sí y con dos de estos valores se puede obtener el tercero, se puede tomar el criterio

VFA para el diseño de mezclas con VMA de marginales a aceptables. El efecto principal del criterio de VFA es que limita los niveles máximos

El VFA también restringe el contenido de aire permitido para mezclas cercanas al criterio mínimo de VMA. Las mezclas diseñadas para volúmenes de tráfico bajos, no pasarán el criterio de VFA con un porcentaje de vacío relativamente alto (5%), aunque el criterio de vacíos de aire se cumpla. El propósito es evitar mezclas menos durables en situaciones de tránsito ligero.

Las mezclas diseñadas para tránsito pesado no pasarán el criterio VFA con un bajo porcentaje de vacíos (menor de 3.5%), aunque éstos se encuentran en el rango de aceptación, porque un bajo contenido de vacíos suele ser crítico en términos de deformación permanente. El criterio VFA ayuda a evitar mezclas que puedan ser susceptibles al ahuellamiento en situaciones de alto tráfico.

El criterio VFA provee un factor de seguridad adicional en el diseño y construcción en términos de comportamiento ya que pueden ocurrir cambios entre la etapa de diseño y la construcción, y el incremento en el margen de error es aceptable.

4. CASO PRÁCTICO

4.1 Generalidades

Agregados: provenientes de la cantera ubicada en el Km. 165.700 de la Ruta CA-1, Occidente. Procesados en cuatro tipos de agregados (1 1/4" a 3/4"), (3/4" a 1/2"), (1/2" a 1/4"), (1/4" a 0) con el fin de cumplir con las tolerancias exigidas para la granulometría de cada tipo de mezcla.

Cemento asfáltico: se utilizó un asfalto PERENCO AC-20 proveniente de la refinería La Libertad ubicada en el Municipio de La Libertad en el Departamento de El Peten.

Laboratorio: todos los ensayos realizados a los materiales fueron hechos en el laboratorio de la empresa SOLEL BONEH ubicado en el lado derecho del Km. 170.000 de la Carretera CA-01, Occidente.

4.2 Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico

Como el método de diseño Marshall sólo permite agregados pétreos de 1" (25.4 mm) como máximo, las únicas graduaciones trabajables, si respetamos el tamaño máximo nominal del agregado, serian la C (25.4 mm), D (19 mm), E (12.5 mm) y F (9.5 mm), pero por objeto de estudio se decidió incluir la graduación **B** quitando el material retenido en el tamiz de 1 1/2" (38.10 mm).

**Tabla VI. Graduación de agregados para pavimento de concreto
asfáltico**

Tamaño del tamiz	Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación designada y tamaño máximo nominal ⁽¹⁾					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	⅜"
63.00 mm	100					
50.00 mm	90-100	100				
38.10 mm	-	90-100	100			
25.00 mm	60-80	-	90-100	100		
19.00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4.75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0.30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

(1) El tamaño máximo nominal es el tamaño del tamiz mayor siguiente al tamaño del primer tamiz que retenga más del 10% del agregado combinado. El tamaño máximo es el del tamiz mayor al correspondiente al tamaño máximo nominal.

FUENTE: Libro de Especificaciones Generales Para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, División 400, Sección 401, Tabla 401-1.

4.3 Diseño de mezclas asfálticas en caliente

Los materiales a utilizar en el diseño de mezclas asfálticas en caliente, se ensayaron para verificar si cumplían con los requisitos indicados en la División 400, Sección 401 del Libro de Especificaciones Generales Para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, (Libro Azul) principalmente lo indicado en las Tablas 401-1 y 401-2 Graduación de Agregados para Pavimento de Concreto Asfáltico (ASTM D 3515), (AASHTO T 27 Y T 11) y Requisitos de graduación para el Polvo Mineral (AASHTO T 37)

respectivamente y Tabla 401-16 Cantidad de Cemento Asfáltico (ASTM D 3515), (AASHTO T164).

4.3.1 Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría B

Ensayos previos a la caracterización de los agregados

- Los agregados pétreos fueron muestreados de acuerdo con las Norma ASTM D 75 / AASHTO T 2
- Las muestras de agregados tomadas fueron reducidas de acuerdo a la Norma ASTM C 702 / AASHTO T 248
- El análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos fue hecho de acuerdo a las normas ASTM C 136 / AASHTO T 27
- La determinación de la cantidad de material fino que pasa el tamiz No. 200 en los agregados fue hecha de acuerdo a las Normas ASTM C 117 / AASHTO T 11

Análisis granulométrico de los agregados

Tabla VII. Análisis granulométrico agregado de 1 1/4" a 3/4"

P.N = 2607.96 grs.

Malla		Peso bruto retenido	Peso neto retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
2"	50.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1"	25.000	313.29	313.29	12.0%	88.0%
3/4"	19.000	1,622.22	1622.22	62.2%	37.8%
1/2"	12.500	2,525.78	2525.78	96.8%	3.2%
3/8"	9.500	2,577.75	2577.75	98.8%	1.2%

Continuación tabla VII

No. 4	4.750	2,592.87	2592.87	99.4%	0.6%
No. 8	2.360	2,593.54	2593.54	99.4%	0.6%
No. 10	2.000	2,593.72	2593.72	99.5%	0.5%
No. 16	1.180	2,594.40	2594.40	99.5%	0.5%
No. 30	0.600	2,595.18	2595.18	99.5%	0.5%
No. 40	0.425	2,595.67	2595.67	99.5%	0.5%
No. 50	0.300	2,596.24	2596.24	99.6%	0.4%
No. 100	0.150	2,597.52	2597.52	99.6%	0.4%
No. 200	0.075	2,598.87	2598.87	99.7%	0.3%

Tabla VIII. Análisis granulométrico agregado de 3/4" a 1/2"

P.N = 2396.07grs.

Malla		Peso bruto retenido	Peso neto retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
2"	50.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1"	25.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1/2"	12.500	1,393.48	1393.48	58.2%	41.8%
3/8"	9.500	2,264.84	2264.84	94.5%	5.5%
No. 4	4.750	2,365.98	2365.98	98.7%	1.3%
No. 8	2.360	2,382.36	2382.36	99.4%	0.6%
No. 10	2.000	2,383.20	2383.20	99.5%	0.5%
No. 16	1.180	2,384.48	2384.48	99.5%	0.5%
No. 30	0.600	2,385.82	2385.82	99.6%	0.4%
No. 40	0.425	2,386.45	2386.45	99.6%	0.4%
No. 50	0.300	2,386.93	2386.93	99.6%	0.4%
No. 100	0.150	2,388.06	2388.06	99.7%	0.3%
No. 200	0.075	2,389.02	2389.02	99.7%	0.3%

Tabla IX. Análisis granulométrico agregado de 1/2" a 1/4"

P.N = 2090.16 grs.

Malla		Peso bruto retenido	Peso neto retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
2"	50.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1"	25.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1/2"	12.500	0.00	0.00	0.0%	100.0%
3/8"	9.500	258.41	258.41	12.4%	87.6%
No. 4	4.750	1,653.49	1653.49	79.1%	20.9%
No. 8	2.360	2,041.57	2041.57	97.7%	2.3%
No. 10	2.000	2,051.35	2051.35	98.1%	1.9%
No. 16	1.180	2,065.28	2065.28	98.8%	1.2%
No. 30	0.600	2,071.09	2071.09	99.1%	0.9%
No. 40	0.425	2,072.64	2072.64	99.2%	0.8%
No. 50	0.300	2,074.30	2074.30	99.2%	0.8%
No. 100	0.150	2,076.50	2076.50	99.3%	0.7%
No. 200	0.075	2,078.10	2078.10	99.4%	0.6%

Tabla X. Análisis granulométrico agregado de 1/4" a 0

P.N = 1973.71 grs.

Malla		Peso bruto retenido	Peso neto retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
2"	50.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1"	25.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.0%	100.0%
1/2"	12.500	0.00	0.00	0.0%	100.0%

Continuación tabla X

3/8"	9.500	0.00	0.00	0.0%	100.0%
No. 4	4.750	44.71	44.71	2.3%	97.7%
No. 8	2.360	656.21	656.21	33.2%	66.8%
No. 10	2.000	793.30	793.30	40.2%	59.8%
No. 16	1.180	1,185.12	1185.12	60.0%	40.0%
No. 30	0.600	1,468.59	1468.59	74.4%	25.6%
No. 40	0.425	1,560.53	1560.53	79.1%	20.9%
No. 50	0.300	1,629.51	1629.51	82.6%	17.4%
No. 100	0.150	1,726.91	1726.91	87.5%	12.5%
No. 200	0.075	1,778.44	1778.44	90.1%	9.9%

Figura 4. Gráfica del análisis granulométrico de agregado grueso y fino

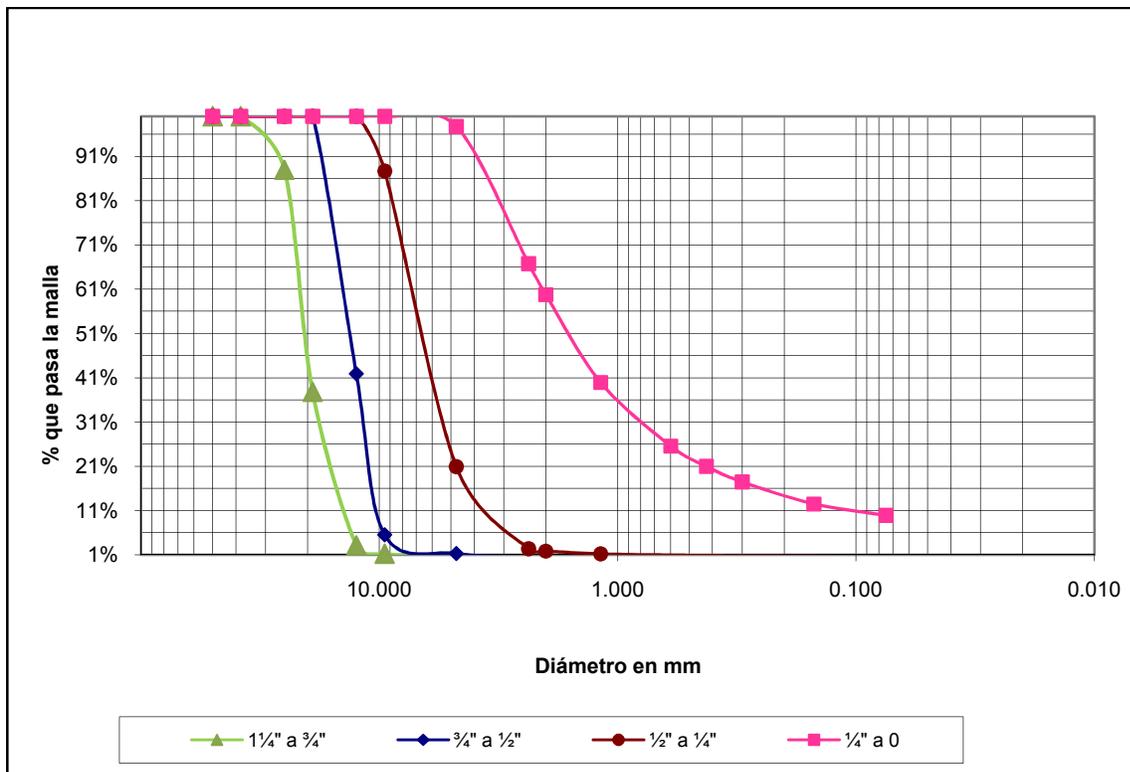


Tabla XI. Cálculo para integración de curva granulométrica tipo B

Malla	Ø, mm	% que pasa				% para integración				Curva integrada
						1 1/4" a 3/4"	3/4" a 1/2"	1/2" a 1/4"	1/4" a 0	
		100%	100%	100%	100%	38.0%	7.0%	15.0%	40.0%	
2"	50.000	100%	100%	100%	100%	38.0%	7.0%	15.0%	40.0%	100%
1 1/2"	38.100	100%	100%	100%	100%	38.0%	7.0%	15.0%	40.0%	100%
1"	25.000	88%	100%	100%	100%	33.4%	7.0%	15.0%	40.0%	95%
3/4"	19.000	38%	100%	100%	100%	14.4%	7.0%	15.0%	40.0%	76%
1/2"	12.500	3%	42%	100%	100%	1.2%	2.9%	15.0%	40.0%	59%
3/8"	9.500	1%	5%	88%	100%	0.4%	0.4%	13.1%	40.0%	54%
No.4	4.750	1%	1%	21%	98%	0.2%	0.1%	3.1%	39.1%	43%
No.8	2.360	1%	1%	2%	67%	0.2%	0.0%	0.3%	26.7%	27%
No.10	2.000	1%	1%	2%	60%	0.2%	0.0%	0.3%	23.9%	24%
No.16	1.180	1%	0%	1%	40%	0.2%	0.0%	0.2%	16.0%	16%
No.30	0.600	0%	0%	1%	26%	0.2%	0.0%	0.1%	10.2%	11%
No.40	0.425	0%	0%	1%	21%	0.2%	0.0%	0.1%	8.4%	9%
No.50	0.300	0%	0%	1%	17%	0.2%	0.0%	0.1%	7.0%	7%
No.100	0.150	0%	0%	1%	13%	0.2%	0.0%	0.1%	5.0%	5%
No.200	0.075	0%	0%	1%	10%	0.1%	0.0%	0.1%	4.0%	4%

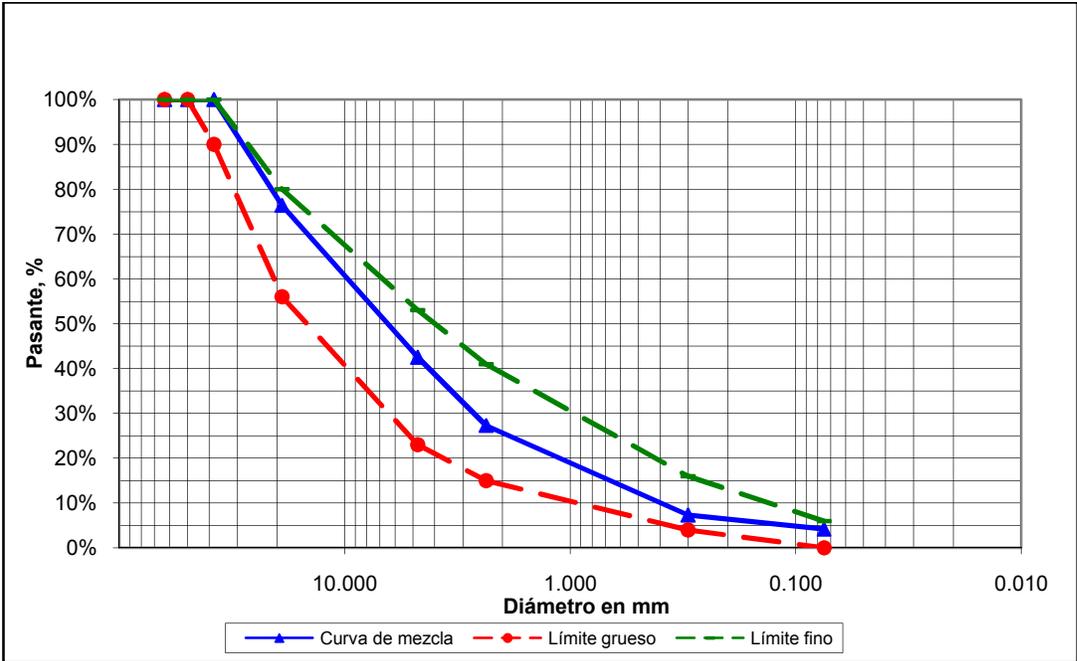
Tabla XII. Graduación integrada tipo B

Malla	Ø, mm	% que pasa		
		Obtenido	Mín. esp.	Máx. esp.
2 1/2"	63.000	100%	100%	100%
2"	50.000	100%	100%	100%
1 1/2"	38.100	100%	90%	100%
3/4"	19.000	76%	56%	80%
No4	4.750	43%	23%	53%
No8	2.360	27%	15%	41%
No50	0.300	7%	4%	16%
No200	0.075	4%	0%	6%

Figura 5. Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría B



Figura 6. Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo B



Requisitos de los materiales

A continuación se realizarán los ensayos respectivos, para determinar las propiedades físico-mecánicas de los agregados y poder concluir si los agregados cumplen con las condiciones o requisitos mínimos que requieren estas mezclas asfálticas en caliente.

Ensayos para caracterización de agregados gruesos

- Para determinar la abrasión del agregado grueso se utilizó el ensayo de abrasión por medio de la Máquina de Los Ángeles (ASTM C 131 / AASHTO T 96)
- Para determinar la desintegración al sulfato de sodio se siguieron los lineamientos dados por las Normas ASTM C 88 / AASHTO T 104
- Para determinar el porcentaje de caras fracturadas se siguieron los lineamientos dados por las Norma ASTM D 5821
- Para determinar el índice de partículas planas y alargadas se siguieron los lineamientos dados por la Norma ASTM D 4791

Ensayos para caracterización de agregados fino

- Para determinar el equivalente de arena se siguieron los lineamientos dados por la Norma ASTM D 2419 / AASTHO T 196
- Para determinar el límite plástico e índice de plasticidad se siguieron los lineamientos dados por la Norma ASTM D 4318 / AASTHO T 90

Ensayo de desgaste de los agregados por medio de la Máquina de Los Ángeles

Tabla XIII. Cálculo de abrasión tipo A para agregado de 1 1/2" a 3/8"

Ciclos	500.0	No	
Peso inicial	A	gr	5000.55
Peso retenido después de la prueba sobre tamiz No 10	B	gr	4271.25
% en peso que pasa el tamiz No 10 o 12	(A-B)/A*100	%	14.6%

$$\text{Desgaste} = \frac{5000.55 \text{ grs} - 4271.25 \text{ grs}}{5000.55 \text{ grs}} \times 100 = 14.6 \%$$

Tabla XIV. Cálculo de abrasión tipo B para agregado de 3/4" a 3/8"

Ciclos	500.0	No	
Peso inicial	A	gr	5001
Peso retenido después de la prueba sobre tamiz No 10	B	gr	4282.59
% en peso que pasa el tamiz No 10 o 12	(A-B)/A*100	%	14.4%

$$\text{Desgaste} = \frac{5001 \text{ grs} - 4282.59 \text{ grs}}{5001 \text{ grs}} \times 100 = 14.4 \%$$

Tabla XV. Cálculo de abrasión tipo C para agregado de 3/8" a No. 4

Ciclos	500.0	No	
Peso inicial	A	gr	5000.02
Peso retenido después de la prueba sobre tamiz No 10	B	gr	4236.12
% en peso que pasa el tamiz No 10 o 12	(A-B) /A*100	%	15.3%

$$\text{Desgaste} = \frac{5000.02 \text{ grs} - 4236.12 \text{ grs}}{5000.02 \text{ grs}} \times 100 = 15.3\%$$

Tabla XVI. Cálculo de abrasión tipo D para agregado de No. 4 a No. 8

Ciclos	500.0	No	
Peso Inicial	A	gr	5000.12
Peso Retenido después de la prueba sobre Tamiz No 10	B	gr	4225
% en peso que pasa el tamiz No 10 o 12	(A-B) / A*100	%	15.5%

$$\text{Desgaste} = \frac{5000.12 \text{ grs} - 4225 \text{ grs}}{5000.12 \text{ grs}} \times 100 = 15.5 \%$$

Ensayo de Desintegración al sulfato de sodio de los agregados

Tabla XVII. Cálculo de la desintegración al sulfato de sodio de los agregados después de 5 ciclos

Tamiz No		(A) Muestra original, % retenido	(B) Peso antes del ensayo, gr	(C) Peso después de la prueba, gr	(D) Pérdida de peso después del ensayo	(E) Pérdida en peso después de ensayo, %	(F) Pérdida promedio corregida, %	
Tipo	Pasante	Retenido						
Agregados gruesos	1 1/2"	1"	33.8%	1,502.6	1,479.5	23.1	1.5%	0.5%
	1"	3/4"						
	3/4"	1/2"	50.1%	1,000.6	983.2	17.4	1.7%	0.9%
	1/2"	3/8"						
	3/8"	No 4	16.1%	300.0	277.1	22.9	7.6%	1.2%
	Totales		100%	2,803.2	2,739.8	63.4	10.9%	2.6%

Donde:

Pérdida de peso después del ensayo (D) = B-C

Pérdida de peso después del ensayo = 1502.60 gr – 1479.50 gr = 23.1 grs

Pérdida en peso después de ensayo (E) = (D/B) x 100

Pérdida en peso después de ensayo = $\frac{23.1}{1502.60} \times 100 = 1.5\%$

Pérdida promedio corregida (F) = E x A

Pérdida promedio corregida = 1.5% x 33.8% = 0.5%

Ensayo de caras fracturadas

Tabla XVIII. Cálculo para evaluación de 1 cara fracturada

Tamaño de las partículas	Retenido en granulometría original, %	Peso de muestra, gr	1 Cara fracturada			
			Cantidad	Peso, gr	% parcial	% corregido
Retenido en malla de 3/4"	40.8%	1000	1000	1000	100.0%	40.8%
Retenido en malla de 1/2"	46.5%	500	500	500	100.0%	46.5%
Retenido en malla de 3/8"	12.7%	250	250	250	100.0%	12.7%
Totales	100%	1750	1750	1750	300.0%	100.0%
Fórmulas	A	B	C	D	E	F

Tabla XIX. Cálculo para evaluación de más de 1 cara fracturada

Tamaño de las partículas	Retenido en granulometría original, %	Peso de muestra, gr	Más de 1 cara fracturada			
			Cantidad	Peso, gr	% parcial	% corregido
Retenido en malla de 3/4"	40.8%	1000	1000	1000	100.0%	40.8%
Retenido en malla de 1/2"	46.5%	500	500	500	100.0%	46.5%
Retenido en malla de 3/8"	12.7%	250	250	250	100.0%	12.7%
Totales	100%	1750	1750	1750	100.0%	100.0%
Fórmulas	A	B	C	D	E	F

Donde:

Peso después del ensayo (D) = 1000 grs.

% Parcial (E) = (D/B) x 100

% Parcial = $\frac{1000}{1000} \times 100 = 100 \%$

% Corregido (F) = E x A

% Corregido = 100 % x 40.8 % = 40.8 %

Como el material es propio de cantera y producto de trituración, presenta el 100% de más de dos caras fracturadas.

Ensayo de partículas planas y alargadas

Tabla XX. Cálculo para evaluación de partículas planas

Tamaño de las partículas	Retenido en granulometría original, %	Peso de muestra, gr	Partículas planas			
			Cantidad	Peso, gr	% parcial	% corregido
Retenido en malla de 3/4"	40.8%	800.02	763.76	36.26	4.53%	1.85%
Retenido en malla de 1/2"	46.5%	608.24	579.68	28.56	4.70%	2.18%
Retenido en malla de 3/8"	12.7%	450.48	427.97	22.51	5.00%	0.63%
Totales	100%	1858.74	1771.41	87.33	14.2%	4.7%
Fórmulas	A	B	C	D	E	F

Tabla XXI. Cálculo para evaluación de partículas alargadas

Tamaño de las partículas	Retenido en granulometría original, %	Peso de muestra, gr	Partículas alargadas			
			Cantidad	Peso, gr	% parcial	% corregido
Retenido en malla de 3/4"	40.8%	881.42	846.27	35.15	3.99%	1.63%
Retenido en malla de 1/2"	46.5%	668.14	633.41	34.73	5.20%	2.42%
Retenido en malla de 3/8"	12.7%	452.76	425.9	26.86	5.93%	0.75%
Totales	100%	2002.32	1905.58	96.74	15.1%	4.8%
Fórmulas	A	B	C	D	E	F

Donde:

Peso después del ensayo (D) = 35.15 grs.

% Parcial (E) = (D/B) x 100

% Parcial = $\frac{35.15}{881.42} \times 100 = 3.99\%$

% Corregido (F) = E x A

$$\% \text{ Corregido} = 3.99 \% \times 40.8 \% = 1.63 \%$$

Ensayo Equivalente de arena

Tabla XXII. Cálculo para evaluación del equivalente de arena

Ensayo No	-	1.1	1.2	
Probeta No.	-	1	2	
Hora inicio de saturación	H:M	6:53	6:55	
Hora final de saturación	H:M	7:03	7:05	
Hora inicio de reposo	H:M	7:05	7:07	
Hora final de reposo	H:M	7:25	7:27	
Lectura de arena	mm	3.70	3.70	A
Lectura de arcilla	mm	4.50	4.60	B
Equivalente de arena	%	82.0	80.0	C
Promedio de E.A.	%	81.0		

Donde:

$$\text{Equivalente de arena (C)} = A/B \times 100$$

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{3.70}{4.50} \times 100 = 81.0 \%$$

Ensayo Límites de Atterberg

Debido a que el material a utilizar es 100 % trituración de roca, éste no presenta limite liquido ni limite plástico.

Ensayo Densidad *bulk* o peso específico

Tabla XXIII. Cálculo para evaluación del peso unitario

A	Peso de molde	g	2,735.0					
B	Volumen de molde	cc	2923					
	Tipo de ensayo		Peso suelto			Peso varillado		
	Punto		1	2	3	1	2	3
C	Peso de masa + molde	g	7310	7317	7317	7750	7740	7745
D	Peso de masa	g	4575	4582	4582	5015	5005	5010
E	Peso unitario	g/cc	1.565	1.568	1.568	1.716	1.712	1.714
	Promedios	g/cc	1.567			1.714		
	Promedios	Kg/m ³	1567			1714		

Donde:

Peso de masa (D) = C-A

Peso de masa = 7310 grs – 2735.0 grs = 4575 grs

Peso unitario (E) = D/B

$$\text{Peso unitario} = \frac{4575 \text{ grs}}{2923 \text{ cm}} = 1.565 \frac{\text{grs}}{\text{cm}}$$

Ensayo de Adherencia y desvestimiento de los agregados

Tabla XXIV. Evaluación de adherencia y desvestimiento de los agregados

Ensayo No.	Descripción de materiales ensayados	% Área agregados sin recubrimiento asfáltico después de 16 horas de inmersión en agua a temperatura ambiente	Método de ensayo
1	- Agregado pasa 100% tamiz No. 3/8" retenido tamiz No. 4. - Asfalto AC-20	Menor a 95%	AASHTO T 182
2	-Agregado pasa 100% tamiz No. 3/8" retenido tamiz No. 4. -Asfalto AC-20 con aditivo KAOMIN 12, 0.15% respecto al peso del asfalto.	Mayor a 95%	AASHTO T 182

Se necesitó agregar un 0.15% respecto al peso del asfalto de aditivo KOMIN 12 para cumplir con la especificación de adherencia.

Gravedad específica y absorción de agregados gruesos

Tabla XXV. Cálculo de las gravedades específicas y absorción de los agregados gruesos con graduación tipo B

Descripción	Peso en gramos			Tipo de agregado	Fórmulas
Peso seco al aire, gr	777.93	777.59	777.76	1 1/4" a No. 4	A
Peso SSS al aire, gr	792.31	792.17	792.24		B
Peso sumergido, gr	489.09	488.75	488.04	Promedios	C
Gs <i>bulk</i> (s) 23/23oC	2.566	2.565	2.565	2.565	A/(B-C)
Gs <i>bulk</i> (sss) 23/23oC	2.613	2.613	2.613	2.613	B/(B-C)
Gs aparente 23/23oC	2.693	2.694	2.694	2.694	A/(A-C)
Absorción, %	1.8	1.9	1.9	1.9	(B-A)/A x 100

Donde:

$$Gs \text{ bulk (s)} = A / (B-C)$$

$$Gs \text{ (s)} = \frac{777.93 \text{ grs}}{(792.31 \text{ grs} - 488.09 \text{ grs})} = 2.566$$

$$Gs \text{ bulk (sss)} = B / (B-C)$$

$$Gs \text{ (sss)} = \frac{792.31 \text{ grs}}{(792.31 \text{ grs} - 489.09 \text{ grs})} = 2.613$$

$$Gs \text{ aparente} = A / (A-C)$$

$$Gs \text{ (sss)} = \frac{777.93 \text{ grs}}{(777.93 \text{ grs} - 489.09 \text{ grs})} = 2.693$$

$$\text{Absorción} = (B-A) / A$$

$$\text{Absorción} = \frac{792.31 \text{ grs} - 777.93 \text{ grs}}{777.93 \text{ grs}} \times 100 = 1.9\%$$

Gravedad específica y absorción de agregados finos

Tabla XXVI. Cálculo de las gravedades específicas y absorción de los agregados finos con graduación tipo B

Descripción	Peso en gramos			Tipo de agregado	Fórmulas
Peso seco al aire, gr	490.02	489.96	489.99	No. 4 a No. 200	A
Peso del picnómetro+agua, gr	1292.08	1292.08	1292.08		B
Peso muestra sss, gr	500.00	500.00	500.00		S
Peso picnómetro+agua+Msss, gr	1600.70	1600.52	1600.61	Promedios	C
Gs <i>bulk</i> (s) 23/23°C	2.560	2.558	2.559	2.559	A/(B+S-C)
Gs <i>bulk</i> (sss) 23/23°C	2.613	2.610	2.611	2.611	S/(B+S-C)
Gs aparente 23/23°C	2.701	2.699	2.700	2.700	A/(B+A-C)
Absorción, %	2.0	2.0	2.0	2.0	(S-A)/A*100

Donde:

$$G_s \text{ bulk (s)} = A / (B+S-C)$$

$$G_s \text{ (s)} = \frac{490.02 \text{ grs}}{(1292.08 \text{ grs} + 500.00 \text{ grs} - 1600.70 \text{ grs})} = 2.560$$

$$G_s \text{ bulk (sss)} = S / (B+S-C)$$

$$G_s \text{ (sss)} = \frac{500.00 \text{ grs}}{(1292.08 + 500 \text{ grs} - 1600.70 \text{ grs})} = 2.613$$

$$G_s \text{ aparente} = A / (B+A-C)$$

$$G_s \text{ (sss)} = \frac{490.02 \text{ grs}}{(1292.08 \text{ grs} + 490.02 - 1600.70 \text{ grs})} = 2.701$$

$$\text{Absorción} = (S-A) / A \times 100$$

$$\text{Absorción} = \frac{500.00 \text{ grs} - 490.02 \text{ grs}}{500.00 \text{ grs}} \times 100 = 2.0 \%$$

Gravedad específica del filler

Tabla XXVII. Cálculo de la gravedad específica del filler

Descripción	Peso en gramos			Tipo de agregado	Fórmulas
	Peso seco al aire, gr	100.00	100.00	100.00	Filler
Peso del picnómetro+agua, gr	345.72	337.80	341.76	B	
Peso picnómetro+agua+M, gr	408.00	400.07	404.03	Promedios	C
$G_s \text{ bulk (s)} 23/23^\circ\text{C}$	2.651	2.650	2.6504	2.651	$A/(B+A-C)$

Donde:

$$G_s \text{ bulk (s)} = A / (B+A-C)$$

$$G_s \text{ (s)} = \frac{100.00 \text{ grs}}{(345.72 \text{ grs} + 100.00 \text{ grs} - 408.00 \text{ grs})} = 2.651$$

Gravedad específica teórica máxima

Tabla XXVIII. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima de agregados con graduación tipo B

Composición de la mezcla integrada			Gs <i>bulk</i>	Gs <i>bulk</i> (sss)	Gs apar.
Agregado de	1 1/4" a 3/4"	38.0%	2.565	2.613	2.694
Agregado de	3/4" a 1/2"	7.0%			
Agregado de	1/2" a 1/4"	15.0%			
Agregado de	1/4" a 0	40.0%	2.559	2.611	2.700
Agregado de	Filler	0.0%	2.651		

Donde:

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{\%AGg}{G_s AGg} + \frac{\%AGf}{G_s AGf}} = \frac{100}{\frac{(38.0\% + 7.0\% + 9.0\%)}{2.565} + \frac{15.0\%}{2.559}} = 2.563$$

Tabla XXIX. Resumen de características agregados con graduación tipo B

Características de los agregados	Resultado	Especificación Libro Azul 2001 Sección 401
Abrasión (Máquina de Los Ángeles)		
Agregado 1 1/4" a 3/4"	14.6%	35% máximo
Agregado 3/4" a 1/2"	14.4%	35% máximo
Agregado 1/2" a 1/4"	15.3%	35% máximo
Agregado No. 4 a No. 8	15.5%	35% máximo
Desintegración al sulfato de sodio		

Continuación tabla XXIX

Agregado grueso 1 1/2" a No. 4"	2.6%	12% máximo
Caras fracturadas		
Al menos 1 cara fracturada	100%	90% mínimo
Más de 1 cara fracturada	100%	75% mínimo
Partículas planas y/o alargadas	4.7%	8% máximo
Equivalente de arena	82%	35% mínimo
Índice plástico	NP	4% máximo
Peso unitario	1714	1360 kg/m ² mínimo
Resistencia al desvestimiento	Mayor a 95%	70% mínimo, perfectamente cubiertas
Gravedad específica bulk		
Agregado grueso	2.565	No especificado
Agregado fino	2.559	No especificado
Filler	2.651	No especificado
Gravedad específica bulk (sss)		
Agregado grueso	2.613	No especificado
Agregado fino	2.611	No especificado
Gravedad específica aparente		
Agregado grueso	2.694	No especificado
Agregado fino	2.700	No especificado
Absorción		
Agregado grueso	1.7	No especificado
Agregado fino	2.0	No especificado
Gravedad específica teórica máxima de agregados (Gsb)	2.563	No especificado

Cumpliendo con los requisitos para agregados del Libro de Especificaciones Generales Para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, procedemos con la elaboración de las mezclas asfálticas, tomando en cuenta que el asfalto a utilizar, será asfalto AC-20 de

PERENCO y la granulometrías serán las que se encuentran en la División 400, Sección 401, Tabla 401-1 de dichas especificaciones mencionadas.

Las especificaciones de la mezcla asfáltica en caliente, tabla 401-16 de dichas especificaciones, dan un rango entre los cuales se puede ubicar el porcentaje de asfalto a utilizar (% en masa total sobre la mezcla). De acuerdo al método de diseño que se uso se realizaron 18 probetas para cada diseño, 3 para cada contenido de asfalto con una variación de 0.5% de asfalto entre cada contenido de asfalto.

Para la mezcla de agregados con el asfalto, se deberá tomar en cuenta la temperatura máxima y mínima para la mezcla y compactación, según la curva reológica del asfalto

Figura 7. Secado de los agregados en horno para elaboración de briqueta



Figura 8. Peso de los materiales secos para elaboración de briqueta



Figura 9. Adición de asfalto por peso para elaboración de briqueta



Figura 10. Mezclado de asfalto y agregados para elaboración de briqueta



Figura 11. Determinación de la temperatura durante mezclado



Figura 12. Colocación de la mezcla en el molde para elaboración de briqueta



Figura 13. Apisonamiento de la mezcla en el molde para elaboración de briqueta



Figura 14. Compactación de la mezcla con martillo



Figura 15. Colocación de briquetas en baño de María



Figura 16. Determinación de estabilidad y flujo con prensa Marshall



Gravedad específica bulk de briquetas

Tabla XXX. Cálculo de gravedad específica bulk de briquetas elaboradas con mezcla asfáltica de graduación tipo B

Probeta No	% de asfalto	Peso de las briquetas (grs)			Volumen	Gravedad específica bulk de briqueta (Gmb)
		Al aire	Agua	SSS		
	A	B	C	D	E	F
1	4.5	1146.42	650.60	1153.28	502.68	2.281
2	4.5	1144.92	648.80	1151.58	502.78	2.277
3	4.5	1143.98	647.90	1150.64	502.74	2.275
Promedio	4.5					2.278
4	5.0	1150.06	661.00	1159.95	498.95	2.305
5	5.0	1149.90	659.90	1158.83	498.93	2.305
6	5.0	1149.51	660.50	1160.67	500.17	2.298
Promedio	5.0					2.303

Continuación tabla XXX

7	5.5	1147.33	658.60	1153.86	495.26	2.317
8	5.5	1146.70	656.90	1152.29	495.39	2.315
9	5.5	1150.78	659.40	1156.94	497.54	2.313
Promedio	5.5					2.315
10	6.0	1160.23	663.30	1164.26	500.96	2.316
11	6.0	1160.71	664.10	1164.76	500.66	2.318
12	6.0	1159.58	662.50	1161.85	499.35	2.322
Promedio	6.0					2.319
13	6.5	1171.96	666.10	1172.25	506.15	2.315
14	6.5	1172.98	666.50	1173.14	506.64	2.315
15	6.5	1173.00	667.20	1173.71	506.51	2.316
Promedio	6.5					2.316
16	7.0	1175.10	667.50	1175.50	508.00	2.313
17	7.0	1176.00	668.30	1176.46	508.16	2.314
18	7.0	1175.96	668.00	1176.42	508.42	2.313
Promedio	7.0					2.313

Ejemplo de cálculo

Donde:

Volumen (E) = D - C

$$= 1146.42 - 650.60 = 502.68$$

Gravedad específica bulk de briqueta (Gmb) = B / E

$$= \frac{1146.42}{502.78} = 2.281$$

Ensayo de gravedad específica máxima (Rice)

Tabla XXXI. Cálculo de gravedad específica máxima de mezcla asfáltica con graduación tipo B

Ensayo No	1	2	3	4	5	6	
Cemento asfáltico, %	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	
Peso de matraz, gr	304.98	305.03	305.01	304.97	304.99	305.04	A
Peso de matraz + agua, gr	1285.52	1285.52	1285.52	1285.52	1285.52	1285.52	B
Peso de matraz + material, gr	1133.48	1128.43	1138.83	1140.38	1145.23	1142.62	C
Peso de material, gr	828.50	823.4	833.82	835.41	840.24	837.58	D
Peso de matraz + mat + agua, gr	1777.75	1772.35	1776.18	1774.79	1775.15	1771.25	E
Agua desplazada, gr	336.27	336.57	343.16	346.14	350.61	351.85	F
Peso específico	2.464	2.446	2.430	2.414	2.397	2.381	G

Donde:

$$\text{Peso del material (D)} = \text{C} - \text{A}$$

$$\text{Peso del Material} = 1133.48 - 304.98 = 828.50 \text{ grs}$$

$$\text{Agua desplazada (F)} = \text{D} + \text{B} - \text{E}$$

$$\text{Agua desplazada} = 828.50 + 1285.52 - 1777.75 = 336.27 \text{ grs}$$

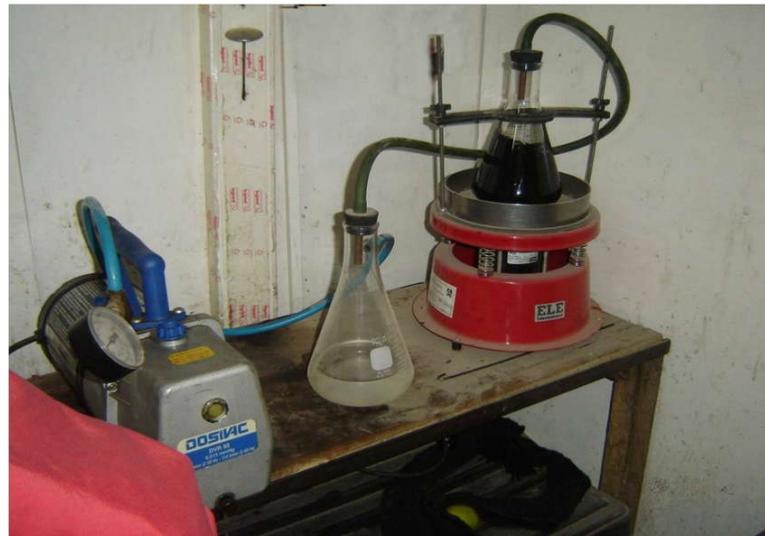
$$\text{Gravedad específica máxima (Gmm)} = \text{D} / \text{F}$$

$$\text{Gravedad específica máxima} = \frac{828.50 \text{ grs}}{336.27 \text{ grs}} = 2.464$$

Figura 17. Separación de la mezcla para ensayo Rice



Figura 18. Extracción de aire a la mezcla por medio de bomba de vacío



Propiedades volumétricas de la mezcla

Tabla XXXII. Cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica con granulometría tipo B

Gravedad específica del asfalto (A) = 1.059

Gravedad teórica máxima del agregado (B) = 2.563

% de cemento asfáltico (P _b)	Gravedad específica bulk de briqueta (G _{mb})	Gravedad específica máxima (G _{mm})	Gravedad específica de agregados (G _{se})	Absorción del asfalto (P _{ba}), %	Asfalto efectivo, (P _{be}), %	Vacios de agregado mineral (VAM)	Vacios (V _a), %	Vacios rellenos de asfalto (VFA)
C	D	E	F	G	H	I	J	K
4.0	2.278	2.464	2.608	0.71	3.32	14.7	7.5	48.9
4.5	2.303	2.446	2.607	0.70	3.83	14.2	5.8	59.1
5.0	2.315	2.430	2.608	0.71	4.33	14.2	4.7	66.9
5.5	2.319	2.414	2.608	0.71	4.83	14.5	3.9	73.1
6.0	2.316	2.397	2.607	0.70	5.34	15.1	3.4	77.4
6.5	2.313	2.381	2.607	0.70	5.85	15.6	2.9	81.4

Donde:

$$\text{Gravedad específica de los agregados (F)} = \frac{100\% - \text{---}}{100\% - \text{---}}$$

$$\text{Gravedad específica de los agregados} = \frac{100\% - 4\%}{\frac{100\%}{2.464} - \frac{4\%}{1.059}} = 2.608$$

$$\text{Absorción del asfalto, \% (G)} = 100\% \times \frac{(C - D)}{(E \times F)}$$

$$\text{Absorción del asfalto} = 100\% \times 1.059 \times \frac{(2.608 - 2.563)}{(2.608 \times 2.563)} = 0.71 \%$$

$$\text{Asfalto efectivo, \% (H)} = (C - D) \times \frac{(100\% - E)}{100\%}$$

$$\text{Asfalto efectivo} = 4.0\% - 0.72\% \times \frac{(100\% - 4.0\%)}{100\%} = 3.32 \%$$

$$\text{Vacíos de agregado mineral (I)} = 100\% - D \times \frac{(100\% - C)}{B}$$

$$\text{Vacíos de agregado mineral} = 100\% - 2.278 \times \frac{(100\% - 4.0\%)}{2.563} = 14.7 \%$$

$$\text{Vacíos, \% (J)} = \frac{I - H}{I} \times 100$$

$$\text{Vacíos, \%} = \frac{2.464 - 2.278}{2.464} \times 100 = 7.5 \%$$

$$\text{Vacíos rellenos de asfalto (K)} = \frac{I - H}{I} \times 100$$

$$\text{Vacíos rellenos de asfalto} = \frac{14.7\% - 7.5\%}{14.7\%} \times 100\% = 48.9$$

Estabilidad y fluencia Marshall

Tabla XXXIII. Cálculo de estabilidad y fluencia Marshall

Probeta	% de cemento asfáltico	Estabilidad (lb)				Flujo		Módulo de rigidez
		Lectura de micrómetro	Estabilidad (lb)	Factor de corrección por altura	Estabilidad corregida (lb)	Flujo en (0.01")	Relación estabilidad/flujo	
		A	B	C	D	E	F	
1	4.0	222	2276	1.04	2367	9.0	263.0	578,600
2	4.0	204	2092	1.04	2176	10.0	217.6	478,720
3	4.0	212	2173	1.04	2260	10.0	226.0	497,200
Prom.	4.0				2268	9.7	235.5	518,173
4	4.5	230	2357	1.04	2451	10.0	245.1	539,220
5	4.5	210	2153	1.04	2239	11.0	203.5	447,800
6	4.5	225	2306	1.04	2398	10.0	239.8	527,560
Prom.	4.5				2363	10.3	229.5	504,860
7	5.0	235	2408	1.04	2504	12.0	208.7	459,067
8	5.0	230	2357	1.04	2451	12.0	204.3	449,350
9	5.0	235	2408	1.04	2504	12.0	208.7	459,067
Prom.	5.0				2486	12.0	207.2	455,828
10	5.5	240	2459	1.04	2557	12.0	213.1	468,783
11	5.5	218	2235	1.04	2324	13.0	178.8	393,292
12	5.5	225	2306	1.04	2398	13.0	184.5	405,815
Prom.	5.5				2426	12.7	192.1	422,630
13	6.0	230	2357	1.00	2357	14.0	168.4	370,386
14	6.0	218	2235	1.00	2235	13.0	171.9	378,231
15	6.0	235	2408	1.00	2408	13.0	185.2	407,508
Prom.	6.0				2333	13.3	175.2	385,375
16	6.5	226	2316	1.00	2316	13.0	178.2	391,938
17	6.5	215	2204	1.00	2204	14.0	157.4	346,343
18	6.5	210	2153	1.00	2153	16.0	134.6	296,038
Prom.	6.5				2224	14.3	156.7	344,773

Donde:

Estabilidad (B) = Para el cálculo de ésta se necesita la constante del anillo utilizado.

Constante del anillo = 4.6357 (lectura manómetro) + 3.3177

$$= (222 \times 4.6357 + 3.3177) \times 2.204 = 2276$$

Estabilidad corregida (D) = B x C

$$= 2276 \times 1.04 = 2367$$

Relación estabilidad/flujo (F) = E / D

$$\delta = \frac{2367}{9} = 263.0 \frac{\text{-----}}{0.01}$$

Tabla XXXIV. Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo B

Asfalto	Densidad	Vacíos, %	VAM	VRA	Estabilidad	Flujo	Estabilidad /flujo	Asf. efect
4.0	2.278	7.5	14.67	48.9	2268	9.7	236	3.32
4.5	2.303	5.8	14.19	59.1	2363	10.3	229	3.83
5.0	2.315	4.7	14.19	66.9	2486	12.0	207	4.33
5.5	2.319	3.9	14.50	73.1	2426	12.7	192	4.83
6.0	2.316	3.4	15.06	77.4	2333	13.3	175	5.34
6.5	2.313	2.9	15.62	81.4	2224	14.3	157	5.85

Gráficas

Figura 19. Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B

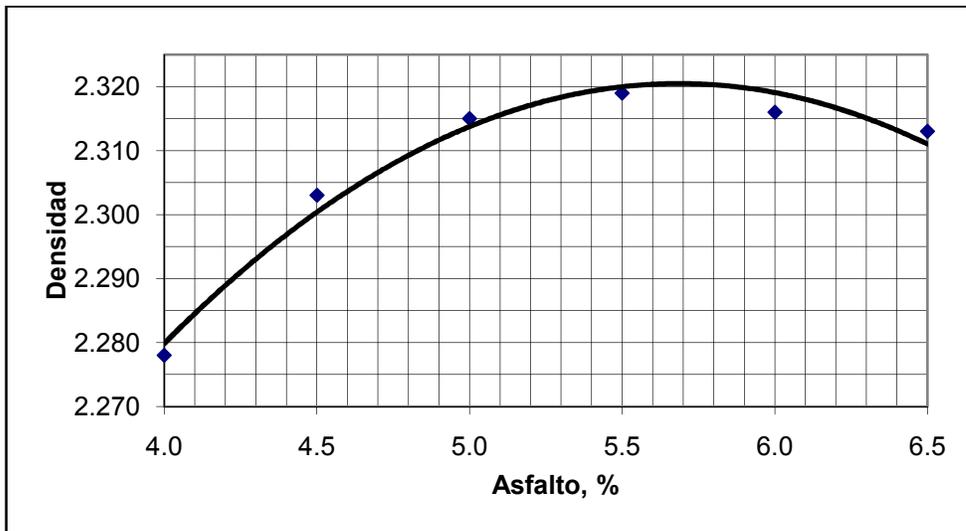


Figura 20. Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B

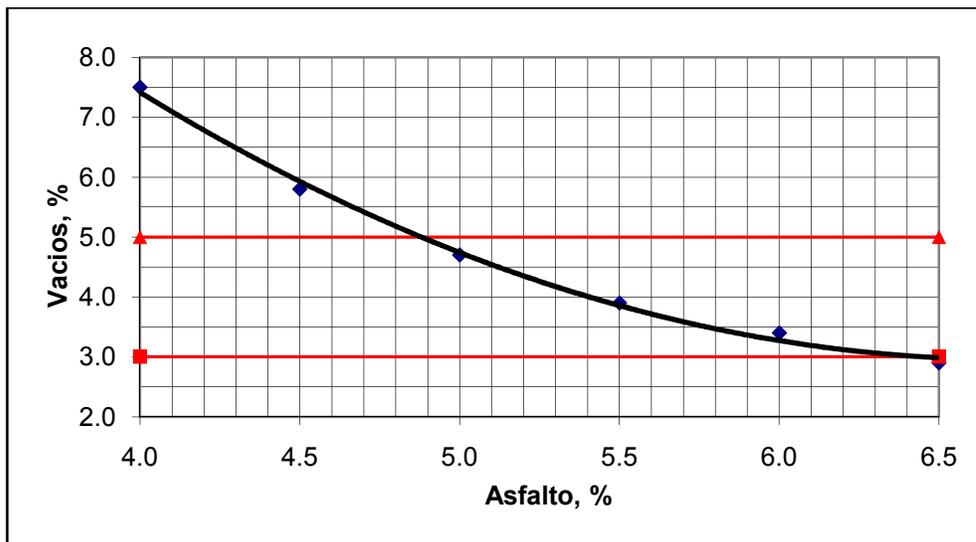


Figura 21. Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B

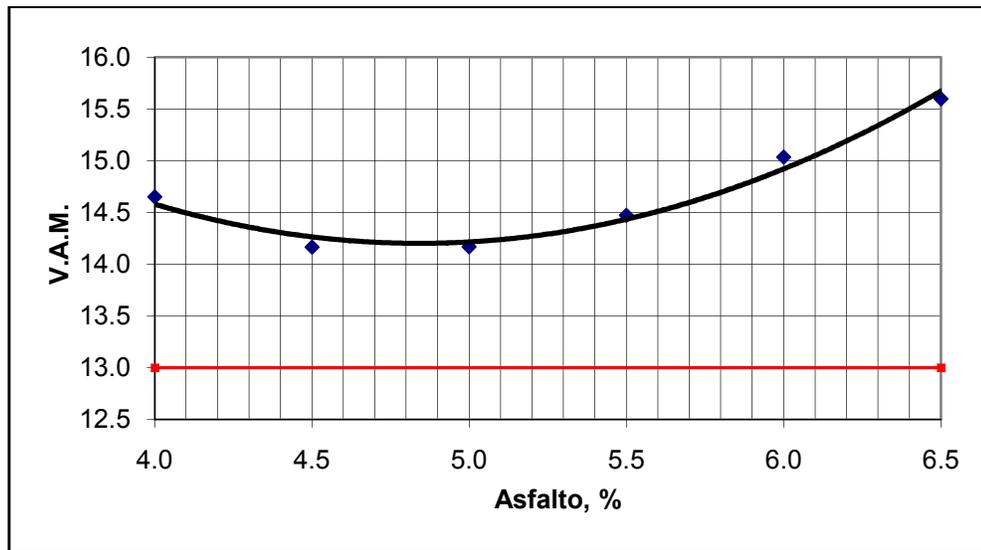


Figura 22. Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B

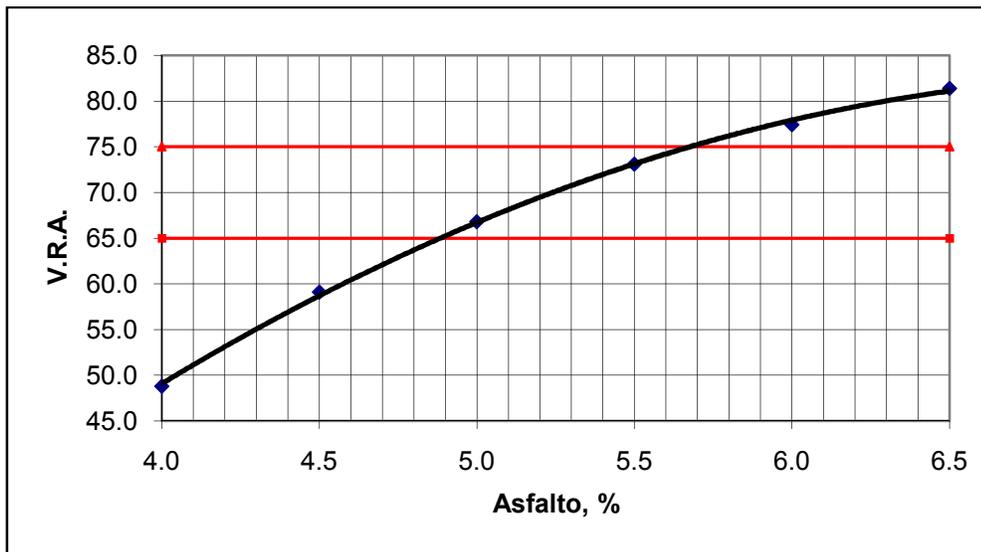


Figura 23. Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B

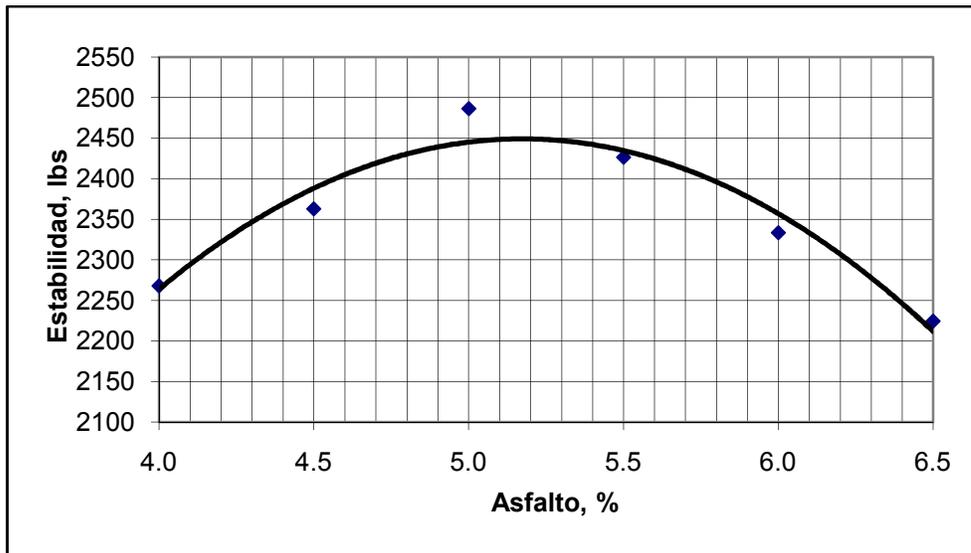


Figura 24. Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B

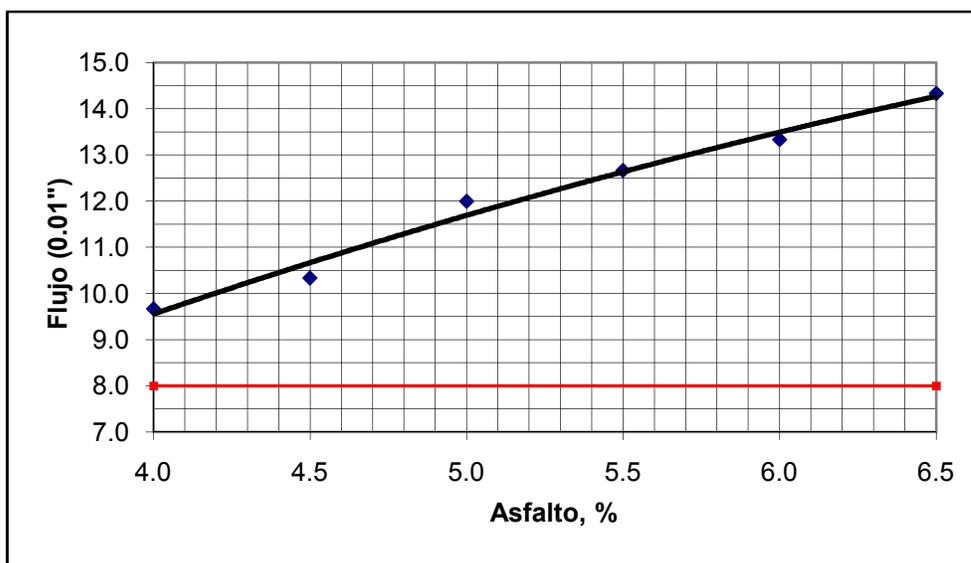


Figura 25. Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B

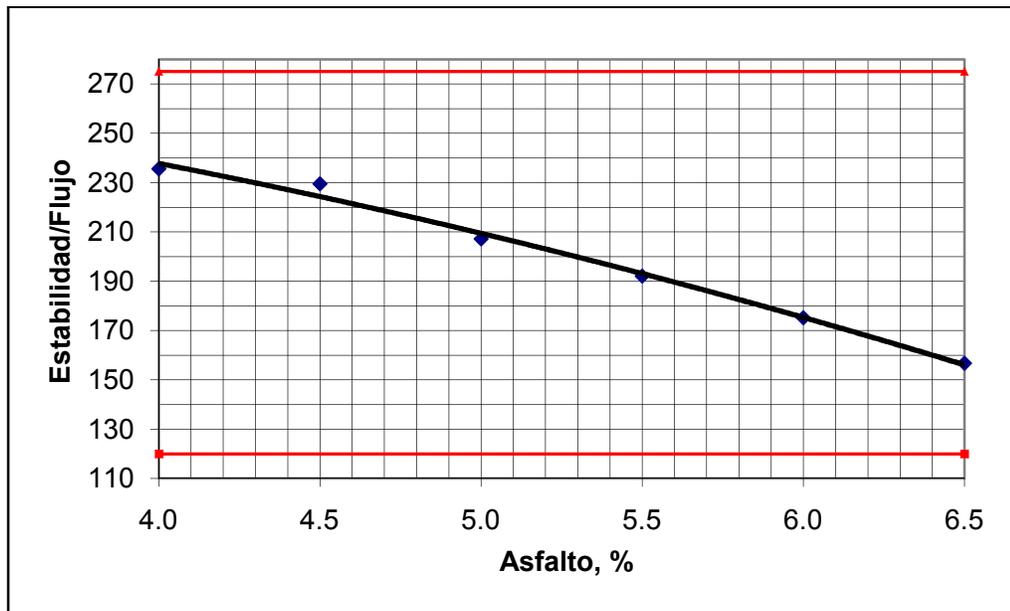


Figura 26. Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo B

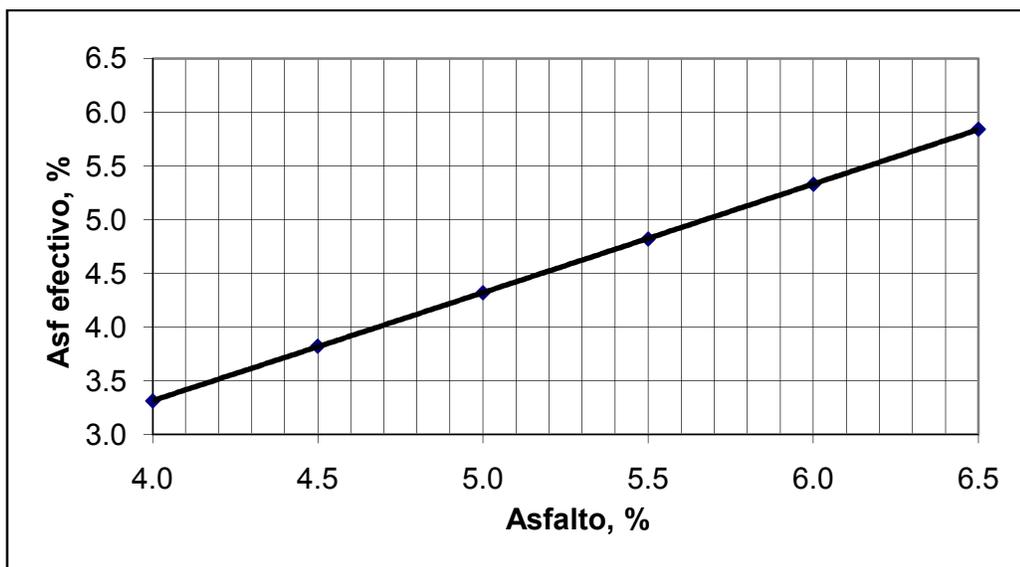


Tabla XXXV. Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo B al 4% de vacíos

Características de la mezcla	Obtenido
Densidad de briqueta	2.304
% de vacíos de la mezcla	4
% de vacíos agregado mineral	14.4
% de vacíos rellenos de asfalto	72
Estabilidad (libras)	2440
Flujo (0.01")	12.5
Relación estabilidad/flujo	197
% óptimo de asfalto	5.4
% de asfalto efectivo	4.7
% que pasa la malla No. 200	4
Relación polvo-asfalto	0.85

4.3.2 Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría C

Tabla XXXVI. Cálculo para integración de curva granulométrica tipo C

Malla	Ø, mm	% que pasa				% para Integración				Curva integrada
						1¼" a ¾"	¾" a ½"	½" a ¼"	¼" a 0	
		1¼" a ¾"	¾" a ½"	½" a ¼"	¼" a 0	22%	18%	16%	44%	
2"	50.000	100%	100%	100%	100%	22.0%	18.0%	16.0%	44.0%	100%
1 ½"	38.100	100%	100%	100%	100%	22.0%	18.0%	16.0%	44.0%	100%
1"	25.000	88%	100%	100%	100%	19.4%	18.0%	16.0%	44.0%	97%
¾"	19.000	38%	100%	100%	100%	8.3%	18.0%	16.0%	44.0%	86%
½"	12.500	3%	42%	100%	100%	0.7%	7.5%	16.0%	44.0%	68%
⅜"	9.500	1%	5%	88%	100%	0.3%	1.0%	14.0%	44.0%	59%
No.4	4.750	1%	1%	21%	98%	0.1%	0.2%	3.3%	43.0%	47%
No.8	2.360	1%	1%	2%	67%	0.1%	0.1%	0.4%	29.4%	30%
No.10	2.000	1%	1%	2%	60%	0.1%	0.1%	0.3%	26.3%	27%
No.16	1.180	1%	0%	1%	40%	0.1%	0.1%	0.2%	17.6%	18%
No.30	0.600	0%	0%	1%	26%	0.1%	0.1%	0.1%	11.3%	12%
No.40	0.425	0%	0%	1%	21%	0.1%	0.1%	0.1%	9.2%	10%
No.50	0.300	0%	0%	1%	17%	0.1%	0.1%	0.1%	7.7%	8%
No.100	0.150	0%	0%	1%	13%	0.1%	0.1%	0.1%	5.5%	6%
No.200	0.075	0%	0%	1%	10%	0.1%	0.1%	0.1%	4.4%	5%

Tabla XXXVII. Graduación integrada tipo C

Malla	Ø, mm	% que pasa		
		Obtenido	Mín esp.	Máx. esp.
2"	50.000	100%	100%	100%
1 1/2"	38.100	100%	100%	100%
1"	25.000	97%	90%	100%
1/2"	12.500	68%	56%	80%
No4	4.750	47%	29%	59%
No8	2.360	30%	19%	45%
No50	0.300	8%	5%	17%
No200	0.075	5%	1%	7%

Figura 27. Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría C



Figura 28. Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo C

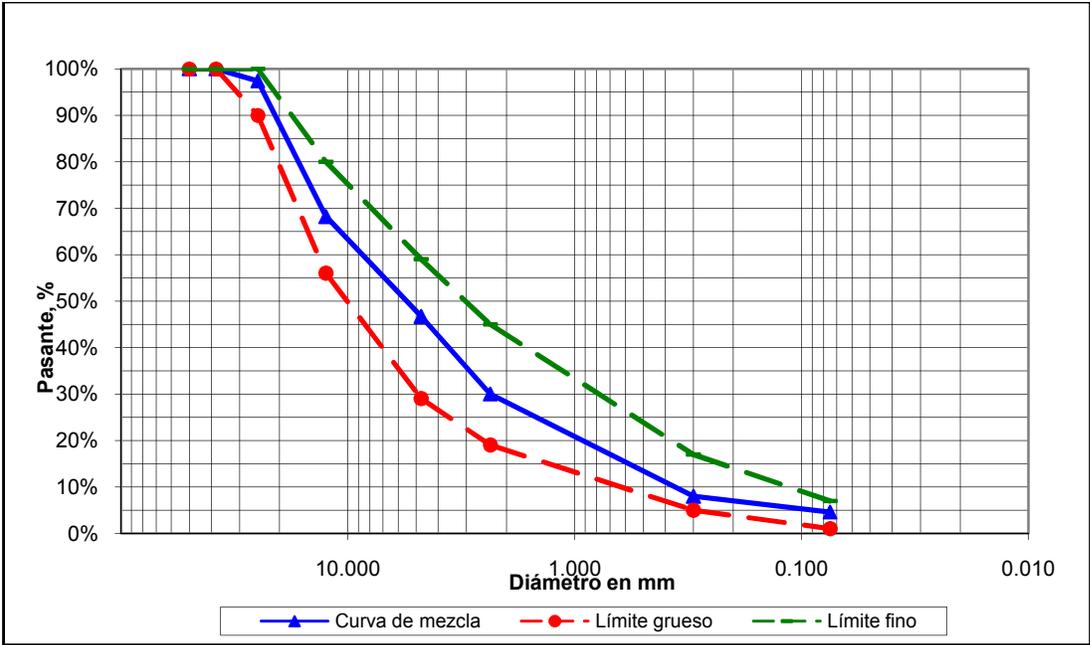


Tabla XXXVIII. Resumen de características de agregados con graduación tipo C

Características de los agregados	Resultado	Especificación Libro Azul 2001, Sección 401
Abrasión (Máquina de Los Ángeles)		
Agregado 1 1/4" a 3/4"	14.6%	35% máximo
Agregado 3/4" a 1/2"	14.4%	35% máximo
Agregado 1/2" a 1/4"	15.3%	35% máximo
Agregado No. 4 a No. 8	15.5%	35% máximo
Desintegración al sulfato de sodio		
Agregado grueso 1 1/2" a No. 4	1.3%	12% máximo
Caras fracturadas		
Al menos 1 cara fracturada	100%	90% mínimo
Más de 1 cara fracturada	100%	75% mínimo
Partículas planas y/o alargadas	4.3%	8% máximo
Equivalente de arena	74%	35% mínimo
Índice plástico	NP	4% máximo
Peso unitario	1694	1360 kg/m ² mínimo
Resistencia al desvestimiento	Mayor a 95%	70% mínimo, perfectamente cubiertas
Gravedad específica <i>bulk</i>		
Agregado grueso	2.570	No especificado
Agregado fino	2.563	No especificado
Filler	2.693	No especificado
Gravedad específica <i>bulk</i> (sss)		
Agregado grueso	2.611	No especificado
Agregado fino	2.616	No especificado
Gravedad específica aparente		
Agregado grueso	2.680	No especificado

Continuación tabla XXVIII

Agregado fino	2.705	No especificado
Absorción		
Agregado grueso	1.6	No especificado
Agregado fino	2.0	No especificado
Gravedad específica teórica máxima de agregados (Gsb)	2.567	No especificado

Tabla XXXIX. Datos de briquetas de mezcla asfáltica con graduación tipo C

Probeta No	% de asfalto	Peso de las briquetas			Estabilidad	Flujo (0.01")
		Al aire	Agua	Peso p	Lectura del dial	
1	4.0	1161.80	654.00	1191.00	243.0	9.0
2	4.0	1162.10	651.00	1204.00	228.0	11.0
3	4.0	1164.40	655.00	1191.00	240.0	10.0
4	4.5	1165.90	659.00	1195.00	268.0	11.0
5	4.5	1168.60	660.50	1200.50	278.0	11.0
6	4.5	1169.10	661.00	1202.80	283.0	10.0
7	5.0	1170.10	660.30	1203.70	310.0	12.0
8	5.0	1180.50	668.20	1211.00	306.0	11.0
9	5.0	1181.20	668.80	1216.20	300.0	12.0
10	5.5	1182.20	664.90	1219.20	330.0	12.0
11	5.5	1183.30	671.90	1220.10	320.0	13.0
12	5.5	1182.70	671.80	1219.70	300.0	14.0
13	6.0	1184.30	668.70	1222.30	280.0	13.0
14	6.0	1185.30	671.90	1221.90	274.0	14.0
15	6.0	1187.20	669.50	1222.40	270.0	13.0
16	6.5	1197.44	675.60	1232.57	260.0	14.0
17	6.5	1199.93	678.30	1237.26	265.0	14.0
18	6.5	1198.35	677.90	1234.42	260.0	13.0

Ejemplo de cálculo con probetas emparafinadas

Volumen

$$= \frac{(1191.00 - 654.00) - (1191.00 - 1161.80)}{0.863} = 503.16$$

Gravedad específica *bulk* de briqueta (Gmb)

$$= \frac{1161.80}{503.16} = 2.309$$

Tabla XL. Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo C

% de cemento asfáltico	Gravedad específica bulk de briqueta (Gmb)	Gravedad específica máxima (RICE)	Gravedad específica de agregados	Absorción del asfalto, %	Asfalto efectivo, %	Vacios de agregado mineral VAM	Vacios, %	Vacios rellenos de asfalto VRA	Estabilidad corregida (lb)	Flujo (0.01")	Relación estabilidad/flujo	Módulo de rigidez
4.0	2.306	2.480	2.627	0.94	3.10	13.8	7.0	49.1	1636	10.0	165.0	362,982
4.5	2.323	2.463	2.627	0.94	3.60	13.6	5.7	58.0	1868	10.7	175.6	386,313
5.0	2.325	2.444	2.625	0.91	4.14	14.0	4.9	64.9	2039	11.7	175.1	385,233
5.5	2.331	2.428	2.626	0.93	4.62	14.2	4.0	71.8	2078	13.0	160.7	353,504
6.0	2.326	2.412	2.626	0.93	5.13	14.8	3.6	75.7	1810	13.3	135.9	298,894
6.5	2.325	2.395	2.625	0.91	5.65	15.3	2.9	81.1	1713	13.7	125.5	275,995

Constante del anillo = 2.5774 (lectura manómetro) + 102.707

Gráficas

Figura 29. Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

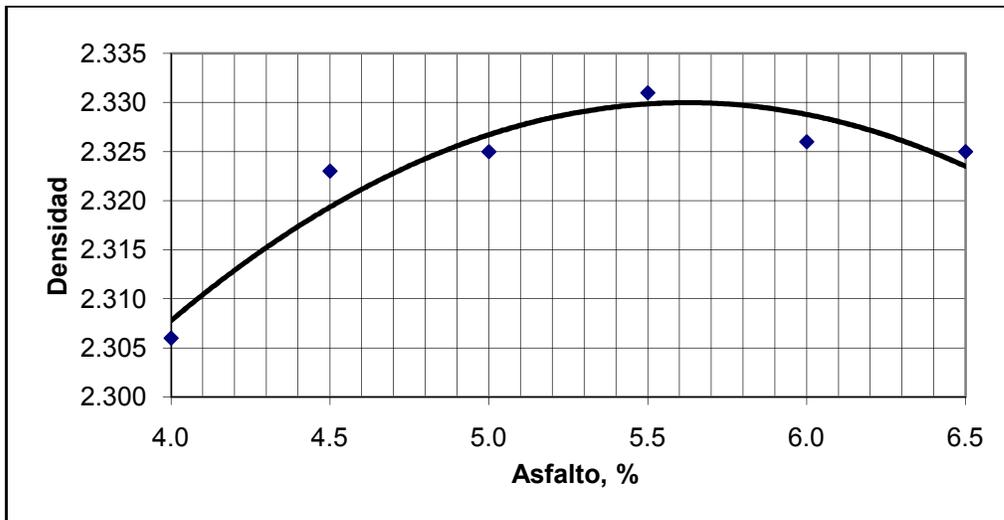


Figura 30. Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

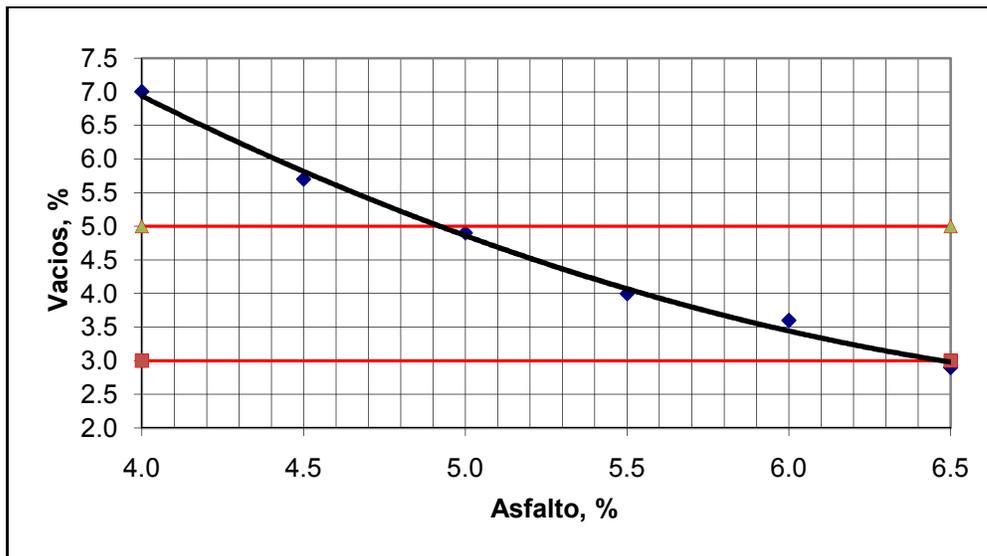


Figura 31. Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

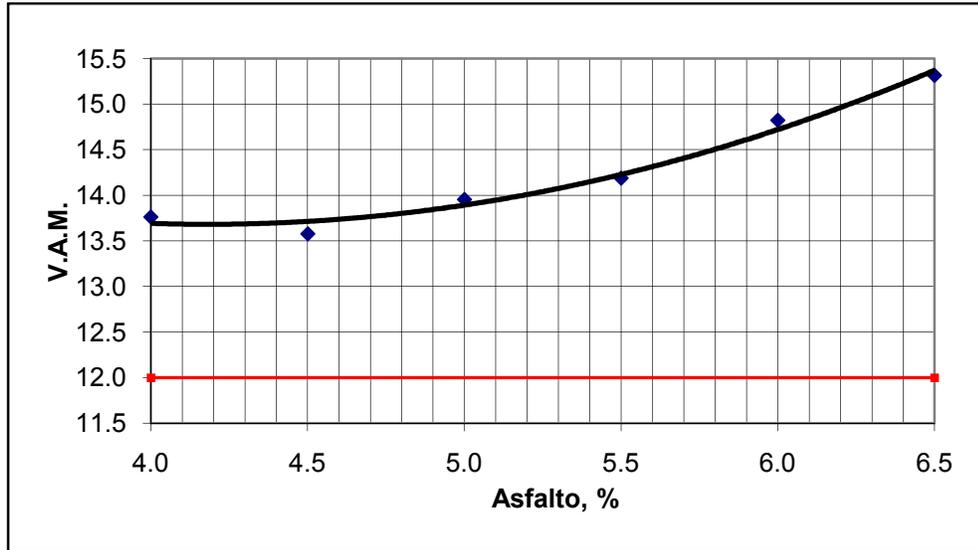


Figura 32. Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

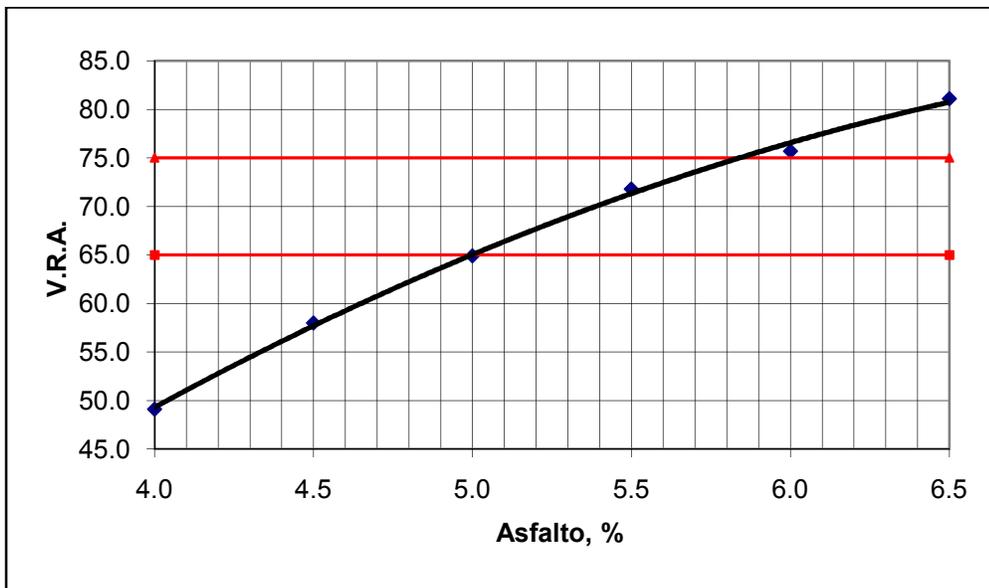


Figura 33. Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

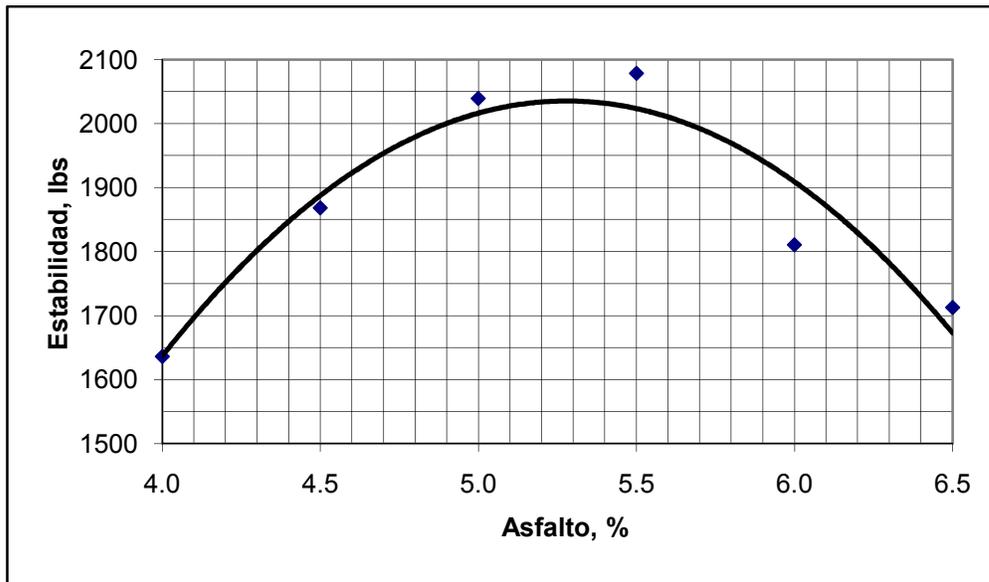


Figura 34. Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

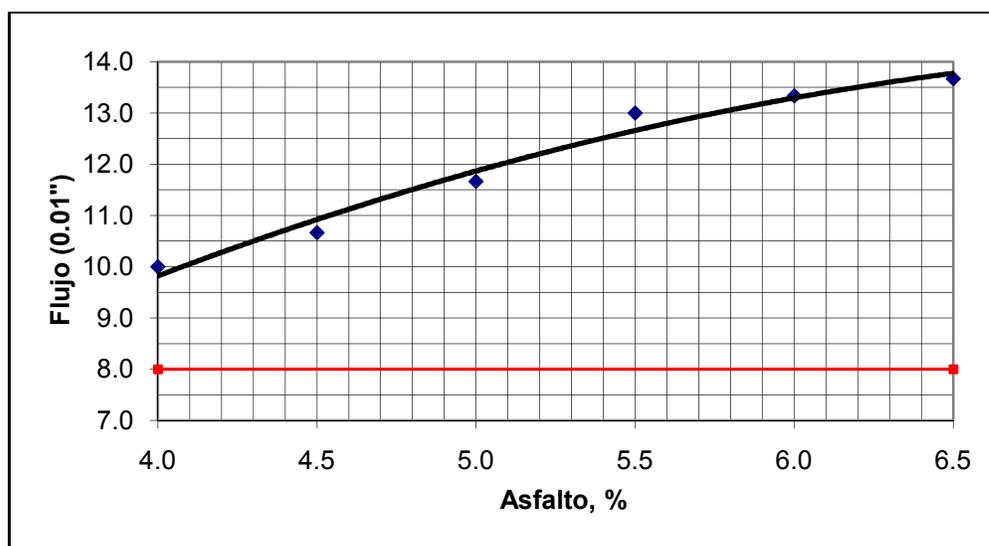


Figura 35. Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

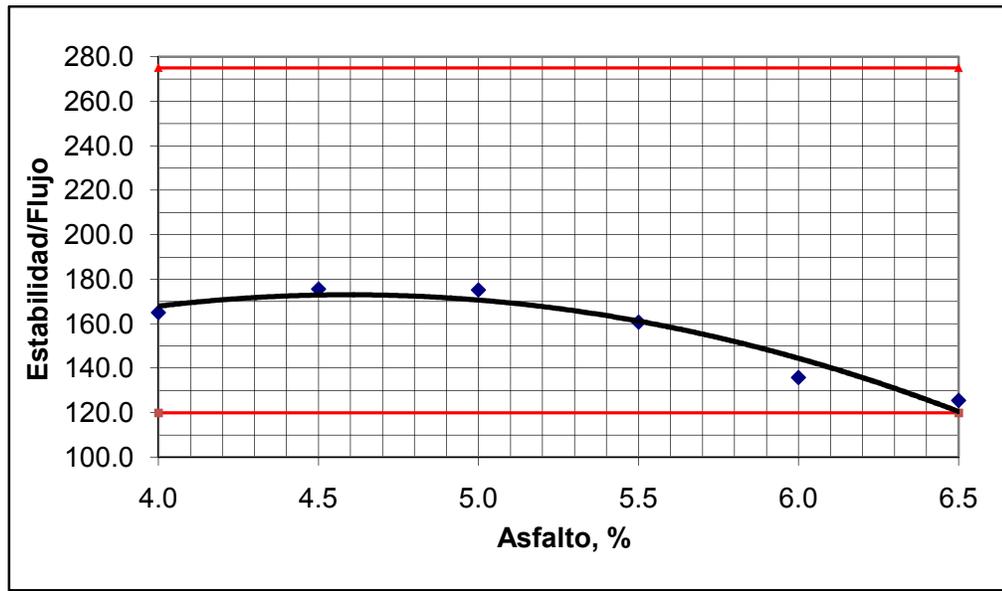


Figura 36. Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

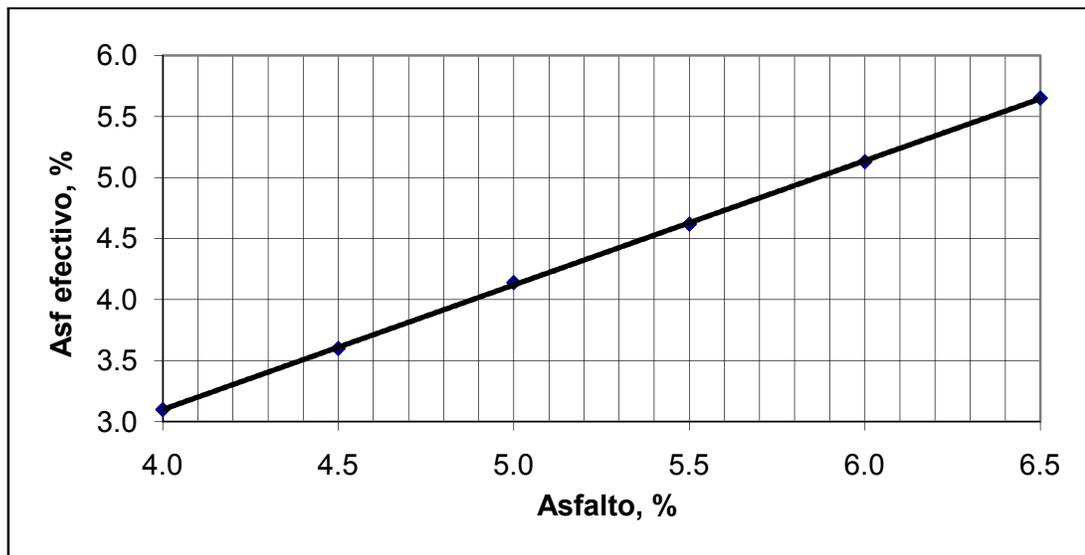


Tabla XLI. Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo C al 4% de vacíos

Características de la mezcla	Obtenido
Densidad de briqueta	2.330
% de vacíos de la mezcla	4
% de vacíos agregado mineral	14.3
% de vacíos rellenos de asfalto	72
Estabilidad (libras)	2010
Flujo (0.01")	12.8
Relación estabilidad/flujo	158
% Óptimo de asfalto	5.6
% de asfalto efectivo	4.7
% que pasa la malla No. 200	5
Relación polvo-asfalto	1.06

4.3.3 Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría D

Tabla XLII. Cálculo para integración de curva granulométrica tipo D

Malla	Ø, mm	% que pasa				% para integración				Curva integrada
						1 1/4" a 3/4"	3/4" a 1/2"	1/2" a 1/4"	1/4" a 0	
		11/4" a 3/4"	3/4" a 1/2"	1/2" a 1/4"	1/4" a 0	4%	22%	26%	48%	
2"	50.000	100%	100%	100%	100%	4.0%	22.0%	26.0%	48.0%	100%
1 1/2"	38.100	100%	100%	100%	100%	4.0%	22.0%	26.0%	48.0%	100%
1"	25.000	93%	100%	100%	100%	3.5%	22.0%	26.0%	48.0%	100%
3/4"	19.000	44%	100%	100%	100%	1.5%	22.0%	26.0%	48.0%	98%
1/2"	12.500	5%	26%	100%	100%	0.1%	9.2%	26.0%	48.0%	83%
3/8"	9.500	2%	3%	82%	100%	0.0%	1.2%	22.8%	48.0%	72%
No.4	4.750	1%	1%	15%	100%	0.0%	0.3%	5.4%	46.9%	53%
No.8	2.360	1%	0%	2%	70%	0.0%	0.1%	0.6%	32.0%	33%
No.10	2.000	1%	0%	1%	63%	0.0%	0.1%	0.5%	28.7%	29%
No.16	1.180	1%	0%	1%	42%	0.0%	0.1%	0.3%	19.2%	20%
No.30	0.600	1%	0%	1%	26%	0.0%	0.1%	0.2%	12.3%	13%
No.40	0.425	1%	0%	1%	21%	0.0%	0.1%	0.2%	10.0%	10%
No.50	0.300	1%	0%	1%	18%	0.0%	0.1%	0.2%	8.4%	9%
No.100	0.150	1%	0%	1%	13%	0.0%	0.1%	0.2%	6.0%	6%
No.200	0.075	1%	0%	1%	10%	0.0%	0.1%	0.2%	4.7%	5%

Tabla XLIII. Graduación integrada tipo D

Graduación de la mezcla integrada				
Malla	Ø, mm	% que pasa		
		Obtenido	Mín esp.	Máx. esp.
1 1/2"	38.100	100%	100%	100%
1"	25.000	100%	100%	100%
3/4"	19.000	98%	90%	100%
3/8"	9.500	72%	56%	80%
No4	4.750	53%	35%	65%
No8	2.360	33%	23%	49%
No50	0.300	9%	5%	19%
No200	0.075	5%	2%	8%

Figura 37. Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría D



Figura 38. Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo C

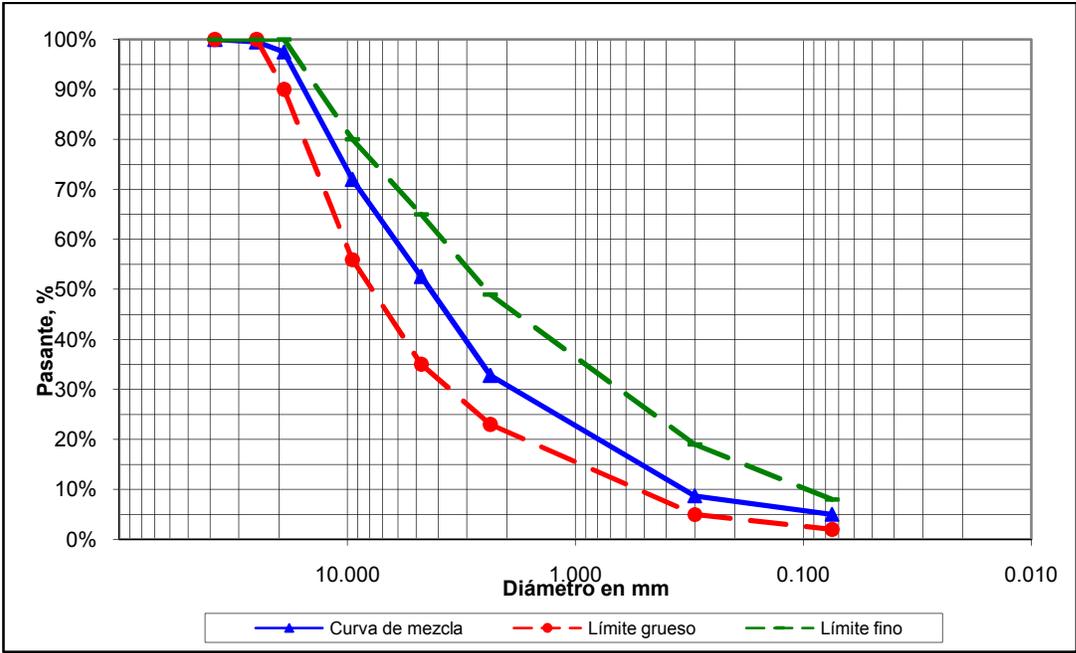


Tabla XLIV. Resumen de características de agregados con graduación tipo D

Características de los agregados	Resultado	Especificación Libro Azul 2001 Sección 401
Abrasión (Máquina de Los Ángeles)		
Agregado 1 1/4" a 3/4"	14.6%	35% máximo
Agregado 3/4" a 1/2"	14.4%	35% máximo
Agregado 1/2" a 1/4"	15.3%	35% máximo
Agregado No. 4 a No. 8	15.5%	35% máximo
Desintegración al sulfato de sodio		
Agregado grueso 3/4" a No. 4	0.3%	12% máximo
Caras fracturadas		
Al menos 1 cara fracturada	100%	90% mínimo
Más de 1 cara fracturada	100%	75% mínimo
Partículas planas y/o alargadas	4.4%	8% máximo
Equivalente de arena	70%	35% mínimo
Índice plástico	NP	4% máximo
Peso unitario	1705	1360 kg/m ² mínimo
Resistencia al desvestimiento	Mayor a 95%	70% mínimo, perfectamente cubiertas
Gravedad específica <i>bulk</i>		
Agregado grueso	2.580	No especificado
Agregado fino	2.572	No especificado
Filler	2.698	No especificado
Gravedad específica <i>bulk</i> (sss)		
Agregado grueso	2.621	No especificado
Agregado fino	2.623	No especificado
Gravedad específica aparente		
Agregado grueso	2.689	No especificado

Continuación tabla XLIV

Agregado fino	2.710	No especificado
Absorción		
Agregado grueso	1.6	No especificado
Agregado fino	2.0	No especificado
Gravedad específica teórica máxima de agregados (Gsb)	2.576	No especificado

Tabla XLV. Datos de briquetas de mezcla asfáltica con graduación tipo D

Probeta No	% de asfalto	Peso de las briquetas			Estabilidad	Flujo (0.01")
		Al aire	Agua	Peso P	Lectura del dial	
1	4.0	1148.53	657.00	1153.87	320.0	10.0
2	4.0	1158.31	661.40	1163.88	300.0	9.0
3	4.0	1151.11	658.00	1156.65	310.0	9.0
4	4.5	1152.68	661.00	1157.16	320.0	10.0
5	4.5	1151.39	660.50	1155.63	330.0	10.0
6	4.5	1158.52	664.00	1162.98	340.0	11.0
7	5.0	1158.04	664.20	1161.92	350.0	12.0
8	5.0	1148.33	659.50	1151.77	340.0	12.0
9	5.0	1160.43	665.90	1164.32	390.0	12.0
10	5.5	1165.00	667.50	1166.82	350.0	13.0
11	5.5	1169.62	669.60	1171.38	380.0	13.0
12	5.5	1163.55	666.00	1165.25	350.0	13.0
13	6.0	1172.05	669.00	1173.13	330.0	13.0
14	6.0	1173.48	671.10	1174.55	325.0	13.0
15	6.0	1170.05	670.00	1171.16	340.0	14.0
16	6.5	1177.66	672.40	1178.15	320.0	14.0
17	6.5	1178.24	672.10	1178.70	325.0	14.0
18	6.5	1176.23	671.90	1176.76	320.0	13.0

Tabla XLVI. Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo D

% de cemento asfáltico	Gravedad específica bulk de briqueta (Gmb)	Gravedad específica máxima (RICE)	Gravedad específica de agregados	Absorción del asfalto, %	Asfalto efectivo, %	Vacios de agregado mineral VAM	Vacios, %	Vacios rellenos de asfalto VRA	Estabilidad corregida (lb)	Flujo (0.01")	Relación estabilidad/flujo	Módulo de rigidez
4.0	2.308	2.497	2.647	1.10	2.94	13.99	7.6	45.70	2067	9.3	221.8	487,862
4.5	2.316	2.480	2.647	1.10	3.45	14.14	6.6	53.30	2185	10.3	211.7	465,740
5.0	2.325	2.462	2.647	1.10	3.96	14.26	5.6	60.70	2399	12.0	199.9	439,756
5.5	2.327	2.444	2.645	1.07	4.49	14.63	4.8	67.20	2363	13.0	181.7	399,836
6.0	2.330	2.428	2.646	1.09	4.98	14.98	4.0	73.30	2195	13.3	164.7	362,420
6.5	2.336	2.411	2.646	1.09	5.48	15.21	3.1	79.60	2136	13.7	156.5	344,223

Constante del anillo = 2.5774 (lectura manómetro) + 102.707

Gráficas

Figura 39. Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D

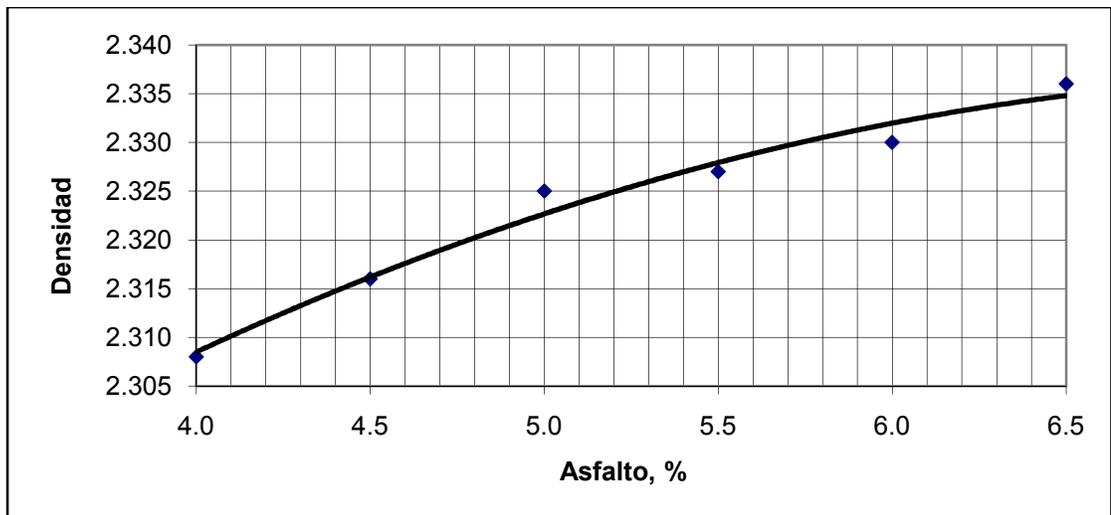


Figura 40. Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D

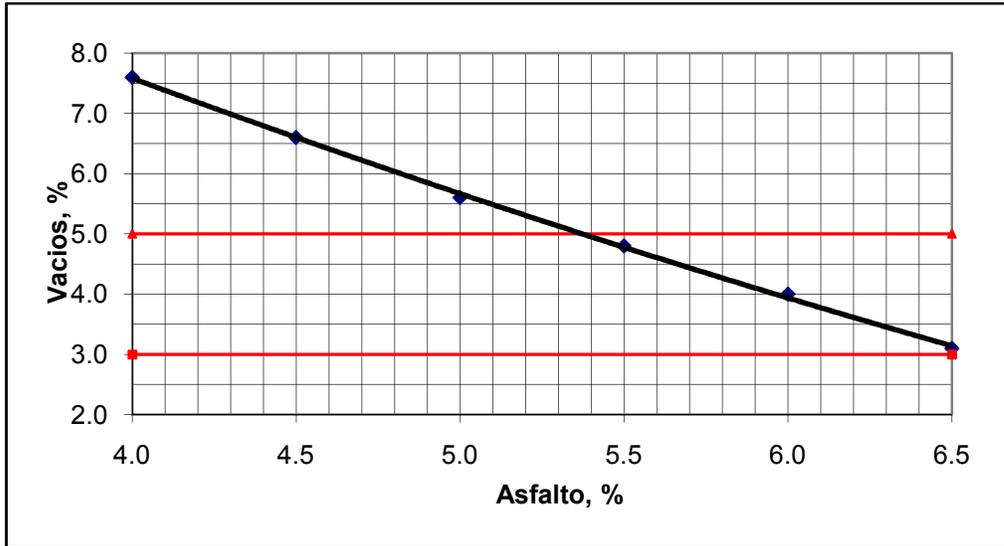


Figura 41. Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D

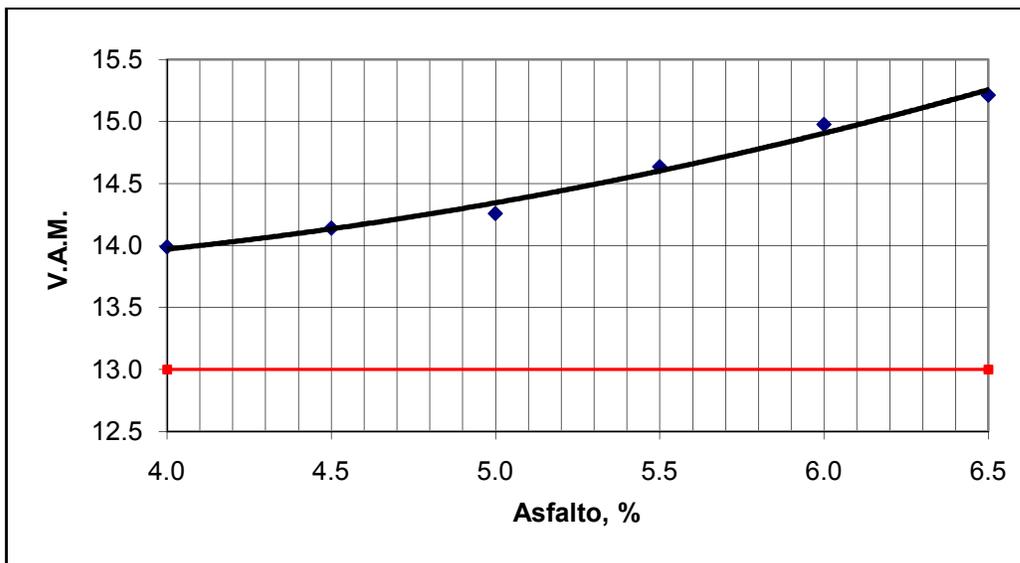


Figura 42. Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D

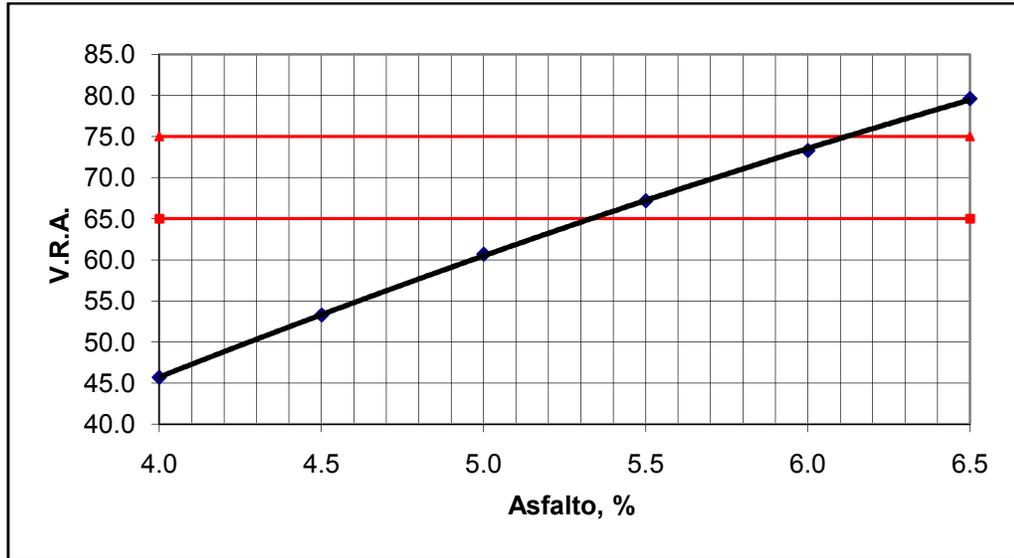


Figura 43. Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D

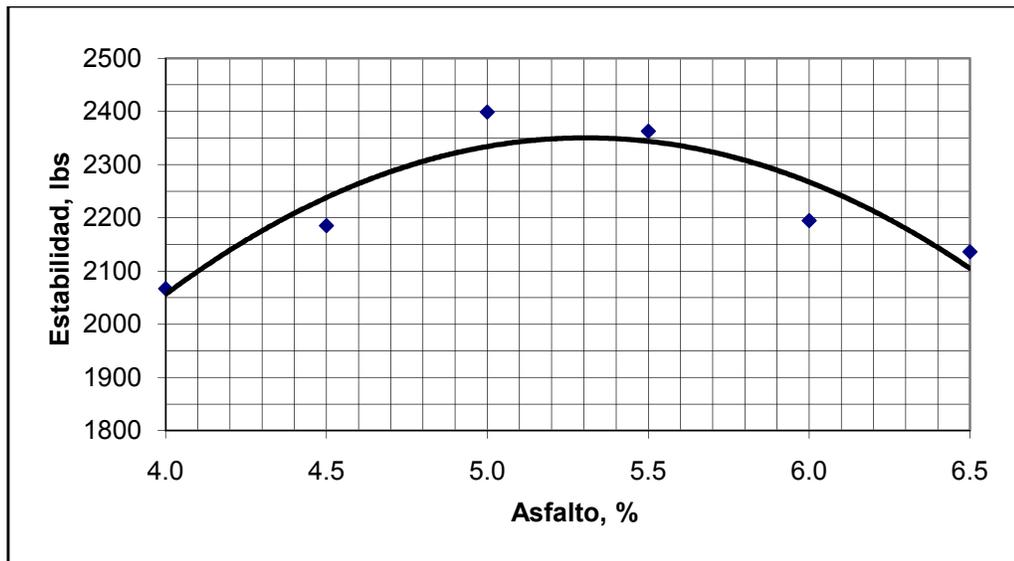


Figura 44. Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D

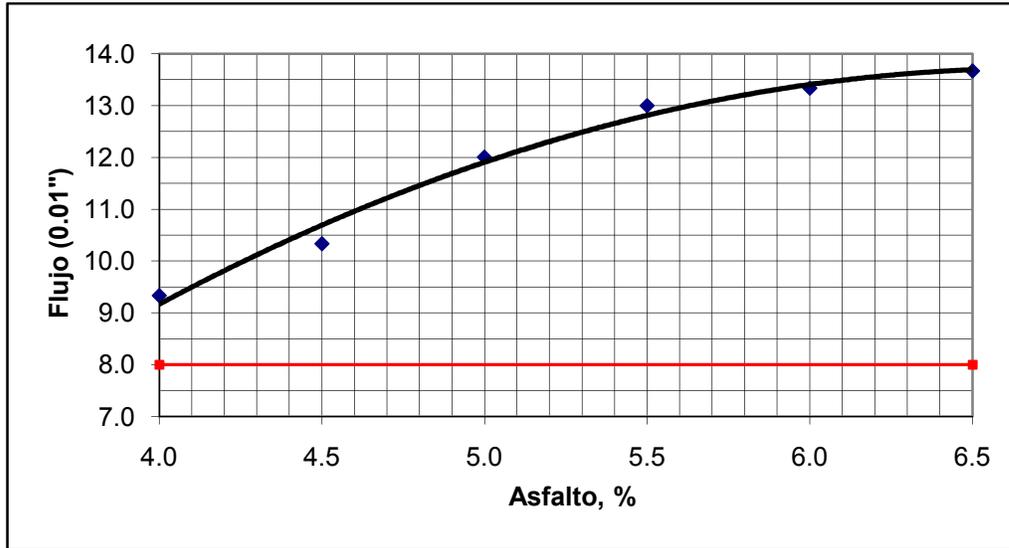


Figura 45. Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D

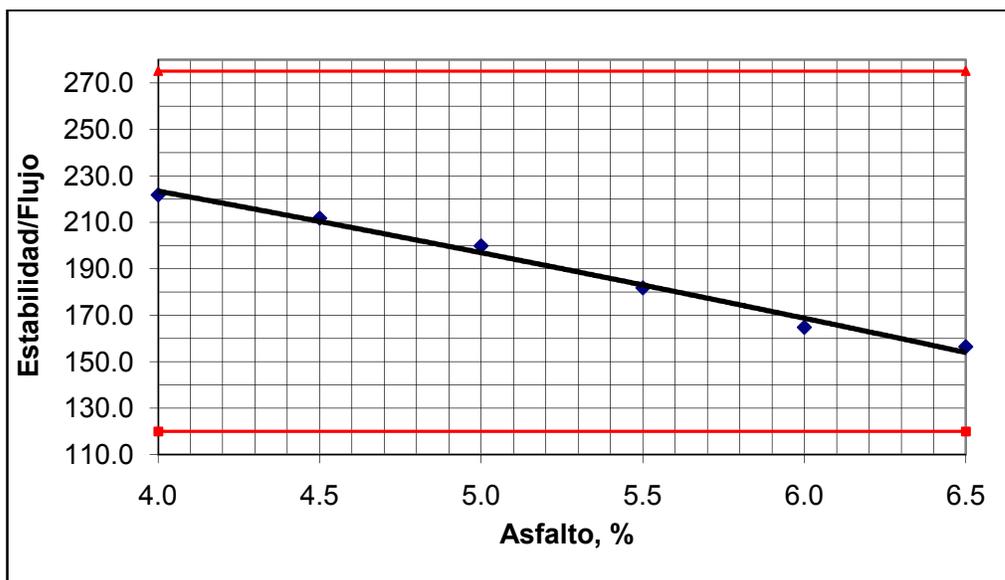


Figura 46. Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo D

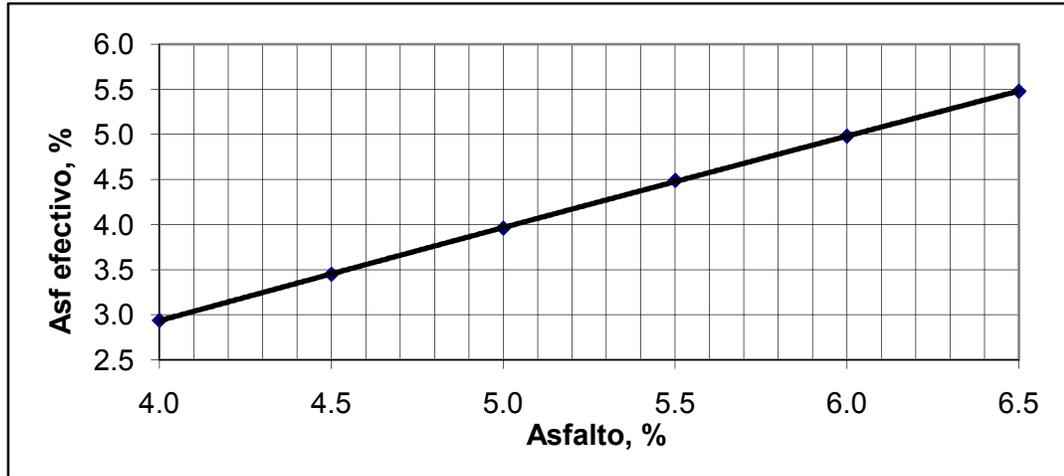


Tabla XLVII. Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo D al 4% de vacíos

Características de la mezcla	Obtenido
Densidad de briqueta	2.332
% de vacíos de la mezcla	4
% de vacíos agregado mineral	14.9
% de vacíos rellenos de asfalto	73
Estabilidad (libras)	2260
Flujo (0.01")	13.3
Relación estabilidad/flujo	168
% Óptimo de asfalto	6.0
% de asfalto efectivo	5.0
% que pasa la malla No. 200	5
Relación polvo-asfalto	1.00

4.3.4 Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría E

Tabla XLVIII. Cálculo para integración de curva granulométrica tipo E

Malla	ø, mm	% que pasa				% para Integración				Curva integrada
						1 1/4" a 3/4"	3/4" a 1/2"	1/2" a 1/4"	1/4" a 0	
		1 1/4" a 3/4"	3/4" a 1/2"	1/2" a 1/4"	1/4" a 0	0%	7%	33%	60%	
2"	50.000	100%	100%	100%	100%	0.0%	7.0%	33.0%	60.0%	100%
1 1/2"	38.100	100%	100%	100%	100%	0.0%	7.0%	33.0%	60.0%	100%
1"	25.000	93%	100%	100%	100%	0.0%	7.0%	33.0%	60.0%	100%
3/4"	19.000	44%	100%	100%	100%	0.0%	7.0%	33.0%	60.0%	100%
1/2"	12.500	5%	26%	100%	100%	0.0%	2.9%	33.0%	60.0%	96%
3/8"	9.500	2%	3%	82%	100%	0.0%	0.4%	28.9%	60.0%	89%
No.4	4.750	1%	1%	15%	100%	0.0%	0.1%	6.9%	58.6%	66%
No.8	2.360	1%	0%	2%	70%	0.0%	0.0%	0.8%	40.1%	41%
No.10	2.000	1%	0%	1%	63%	0.0%	0.0%	0.6%	35.9%	37%
No.16	1.180	1%	0%	1%	42%	0.0%	0.0%	0.4%	24.0%	24%
No.30	0.600	1%	0%	1%	26%	0.0%	0.0%	0.3%	15.4%	16%
No.40	0.425	1%	0%	1%	21%	0.0%	0.0%	0.3%	12.6%	13%
No.50	0.300	1%	0%	1%	18%	0.0%	0.0%	0.3%	10.5%	11%
No.100	0.150	1%	0%	1%	13%	0.0%	0.0%	0.2%	7.5%	8%
No.200	0.075	1%	0%	1%	10%	0.0%	0.0%	0.2%	5.9%	6%

Tabla XLIX. Graduación integrada tipo E

Malla	ø, mm	% que pasa		
		Obtenido	Mín esp.	Máx. esp.
1 1/2"	38.100	100%	100%	100%
1"	25.000	100%	100%	100%
3/4"	19.000	100%	100%	100%
1/2"	12.500	95%	90%	100%
No4	4.750	66%	44%	74%
No8	2.360	41%	28%	58%
No50	0.300	11%	5%	21%
No200	0.075	6%	2%	10%

Figura 47. Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría E



Figura 48. Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo E

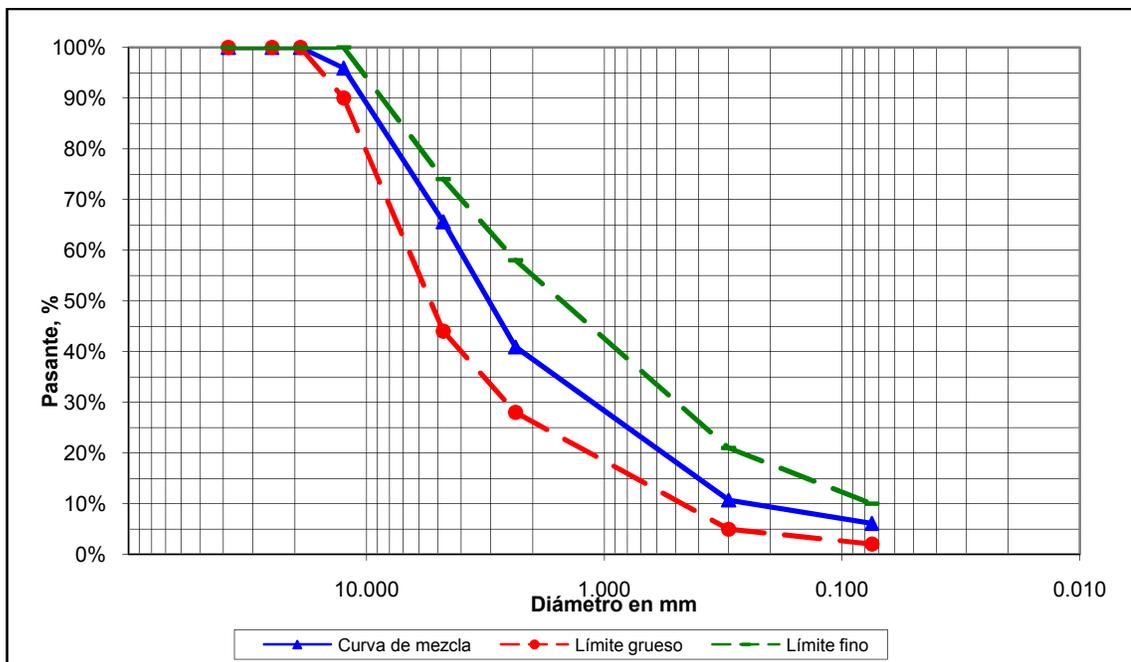


Tabla L. Resumen de características de agregados con graduación tipo E

Características de los agregados	Resultado	Especificación Libro Azul 2001 Sección 401
Abrasión (Máquina de Los Ángeles)		
Agregado 1 1/4" a 3/4"	14.6%	35% máximo
Agregado 3/4" a 1/2"	14.4%	35% máximo
Agregado 1/2" a 1/4"	15.3%	35% máximo
Agregado No. 4 a No. 8	15.5%	35% máximo
Desintegración al sulfato de sodio		
Agregado grueso 3/8" a No. 4	0.3%	12% máximo
Caras fracturadas		
Al menos 1 cara fracturada	100%	90% mínimo
Más de 1 cara fracturada	100%	75% mínimo
Partículas planas y/o alargadas	4.5%	8% máximo
Equivalente de arena	67%	35% mínimo
Índice plástico	NP	4% máximo
Peso unitario	1715	1360 kg/m ² mínimo
Resistencia al desvestimiento	Mayor a 95%	70% mínimo, perfectamente cubiertas
Gravedad específica <i>bulk</i>		
Agregado grueso	2.596	No especificado
Agregado fino	2.571	No especificado
Filler	2.698	No especificado
Gravedad específica <i>bulk</i> (sss)		
Agregado grueso	2.643	No especificado
Agregado fino	2.623	No especificado
Gravedad específica aparente		
Agregado grueso	2.725	No especificado

Continuación tabla L

Agregado fino	2.712	No especificado
Absorción		
Agregado grueso	1.8	No especificado
Agregado fino	2.0	No especificado
Gravedad Específica Teórica Máxima de agregados (Gsb)	2.581	No especificado

Tabla LI. Datos de briquetas de mezcla asfáltica con graduación tipo E

Probeta No	% de asfalto	Peso de las briquetas			Estabilidad	Flujo
		Al aire	Agua	Peso P	Lectura del dial	(0.01")
1	4.5	1158.36	658.50	1165.41	315.0	9.0
2	4.5	1161.66	665.80	1168.51	320.0	10.0
3	4.5	1165.74	664.00	1173.37	280.0	9.0
4	5.0	1162.96	662.00	1165.58	325.0	10.0
5	5.0	1171.60	667.90	1175.96	350.0	11.0
6	5.0	1169.02	666.80	1171.98	330.0	11.0
7	5.5	1171.69	667.80	1172.25	360.0	13.0
8	5.5	1168.58	665.90	1169.60	350.0	12.0
9	5.5	1161.83	665.30	1162.50	355.0	12.0
10	6.0	1171.77	672.40	1172.37	380.0	13.0
11	6.0	1181.66	677.10	1182.46	385.0	14.0
12	6.0	1164.33	667.60	1164.97	380.0	14.0
13	6.5	1184.29	682.20	1184.97	380.0	14.0
14	6.5	1181.89	679.70	1181.90	370.0	15.0
15	6.5	1177.04	674.80	1177.53	380.0	15.0
16	7.0	1158.09	667.50	1158.59	370.0	15.0
17	7.0	1188.35	685.00	1188.82	350.0	16.0
18	7.0	1176.94	678.90	1178.21	360.0	16.0

Tabla LII. Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo E

% de cemento asfáltico	Gravedad específica <i>bulk</i> de briqueta (Gmb)	Gravedad específica máxima (RICE)	Gravedad específica de agregados	Absorción del asfalto, %	Asfalto efectivo, %	Vacios de agregado mineral VAM	Vacios, %	Vacios rellenos de asfalto VRA	Estabilidad corregida (lb)	Flujo (0.01")	Relación estabilidad/flujo	Módulo de rigidez
4.5	2.295	2.499	2.670	1.37	3.19	15.08	8.2	45.60	2013	9.3	216	474,825
5.0	2.310	2.480	2.668	1.34	3.73	14.97	6.9	53.90	2215	10.7	208	457,373
5.5	2.326	2.465	2.671	1.38	4.20	14.84	5.6	62.30	2333	12.3	189	416,613
6.0	2.341	2.445	2.668	1.34	4.74	14.74	4.3	70.80	2490	13.7	182	401,278
6.5	2.350	2.429	2.669	1.35	5.24	14.87	3.3	77.80	2460	14.7	168	369,509
7.0	2.358	2.412	2.669	1.35	5.74	15.03	2.2	85.40	2401	15.7	154	337,938

Constante del anillo = 2.5774 (lectura manómetro) + 102.707

Gráficas

Figura 49. Densidad de briqueta vs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E

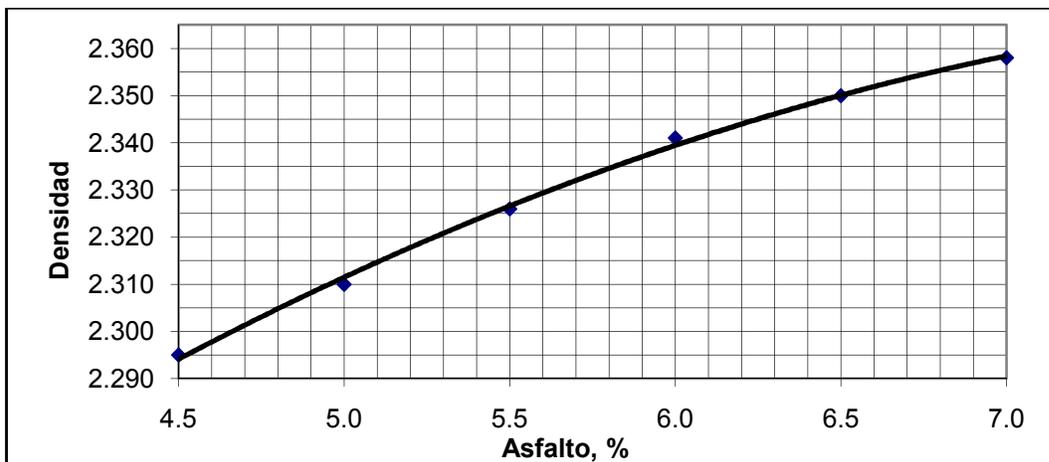


Figura 50. Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E

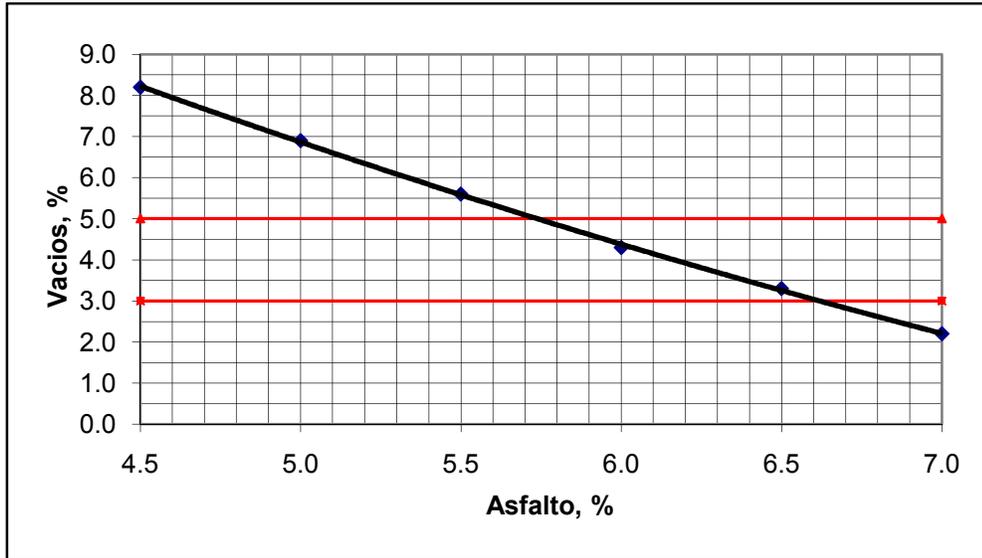


Figura 51. Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E

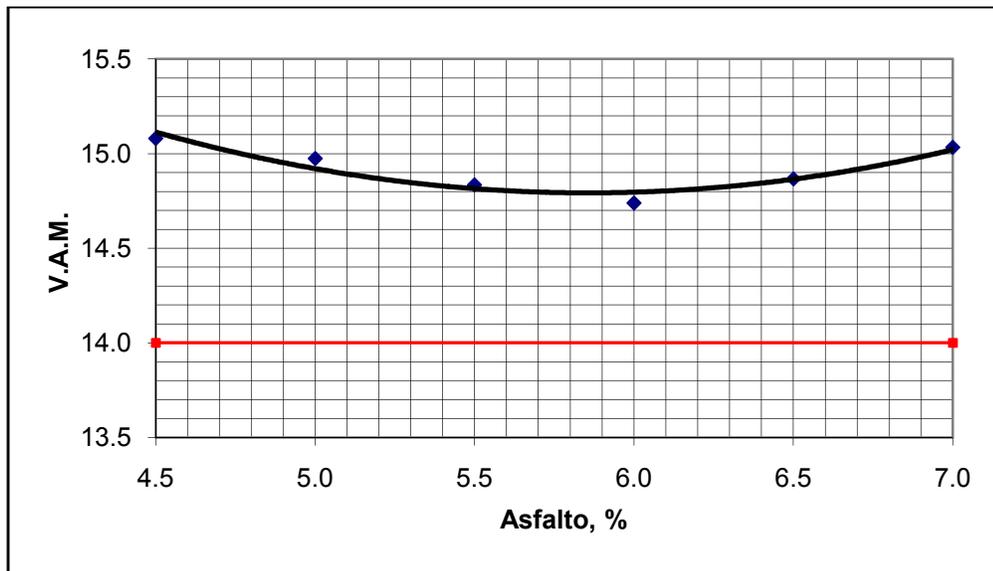


Figura 52. Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E

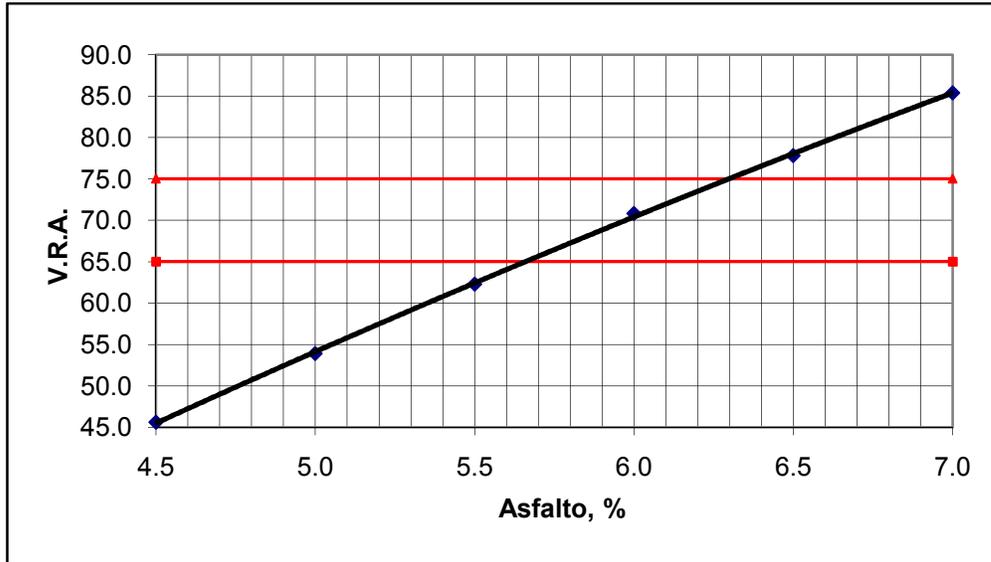


Figura 53. Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E

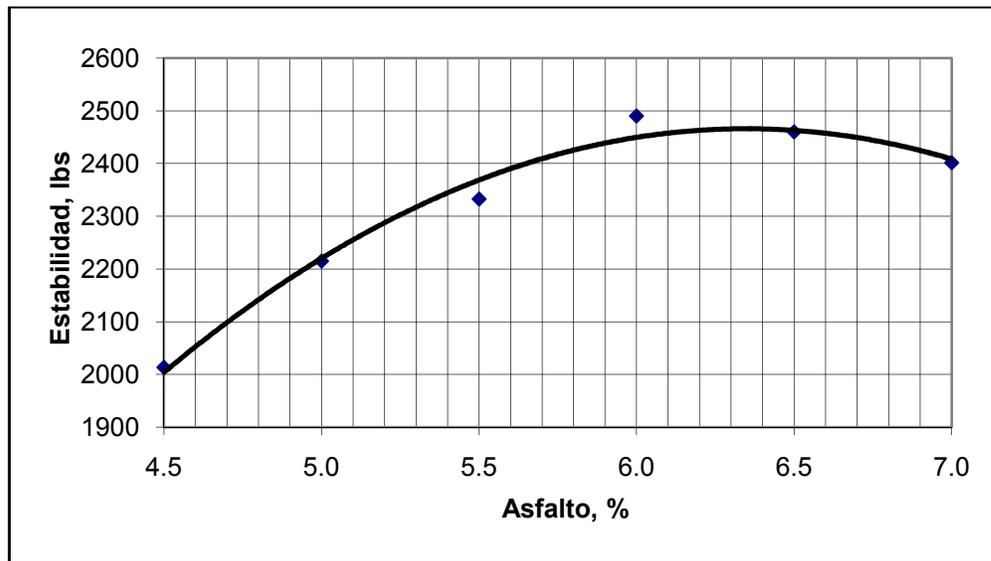


Figura 54. Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E

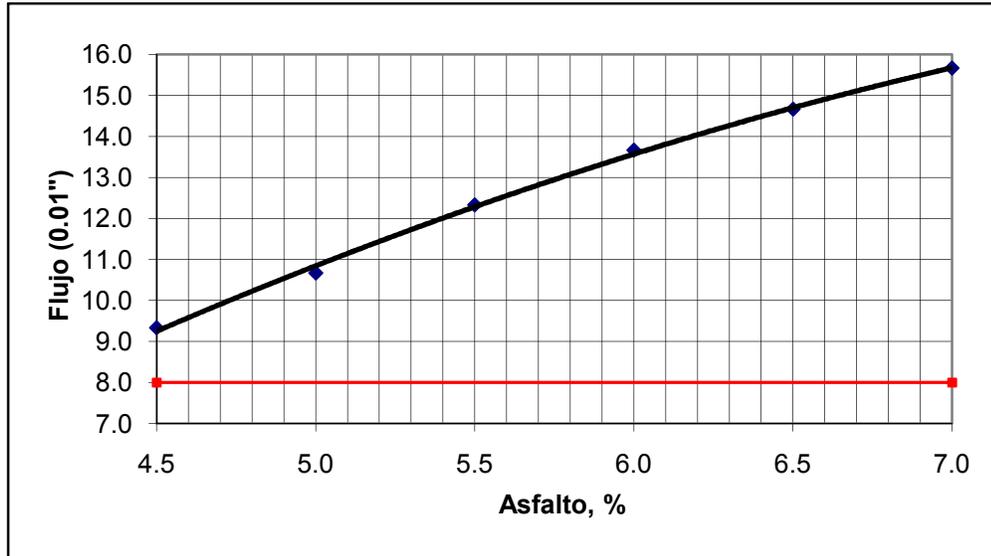


Figura 55. Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E

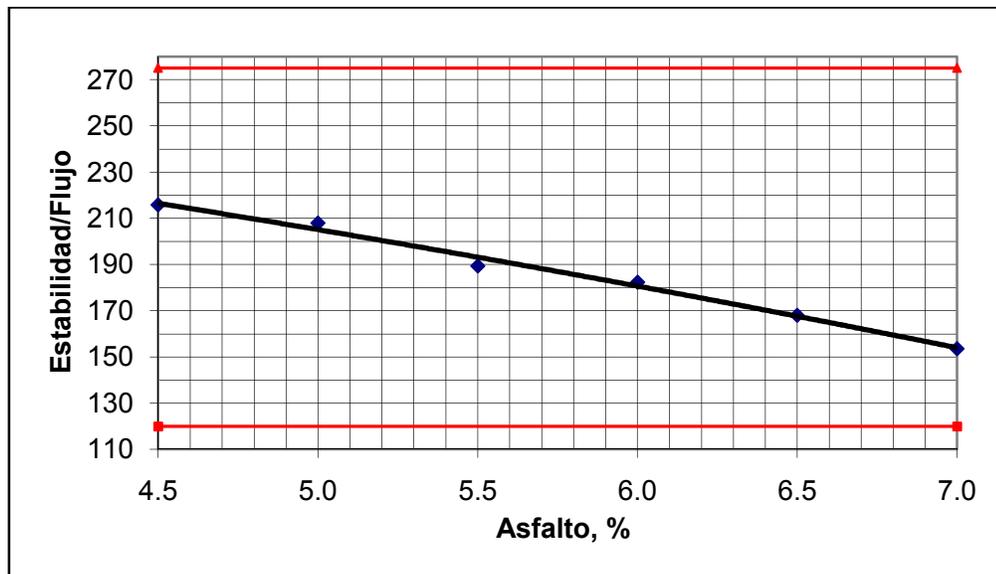


Figura 56. Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo E

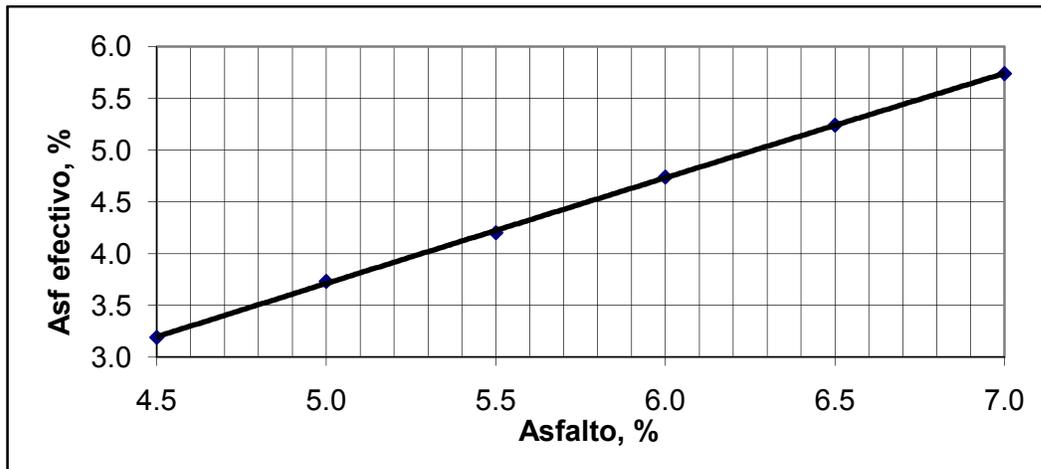


Tabla LIII. Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo E al 4% de vacíos

Características de la mezcla	Obtenido
Densidad de briqueta	2.344
% de vacíos de la mezcla	4
% de vacíos agregado mineral	16.6
% de vacíos rellenos de asfalto	73
Estabilidad (libras)	2470
Flujo (0.01")	14
Relación estabilidad/flujo	176
% Óptimo de asfalto	6.2
% de asfalto efectivo	4.9
% que pasa la malla No. 200	6
Relación polvo-asfalto	1.22

4.3.5 Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría F

Tabla LIV. Cálculo para integración de curva granulométrica tipo F

Malla	ø, mm	% que pasa				% para integración				Curva integrada
						1 1/4" a 3/4"	3/4" a 1/2"	1/2" a 1/4"	1/4" a 0	
		11/4" a 3/4"	3/4" a 1/2"	1/2" a 1/4"	1/4" a 0	0%	0%	30%	70%	
2"	50.000	100%	100%	100%	100%	0.0%	0.0%	30.0%	70.0%	100%
1 1/2"	38.100	100%	100%	100%	100%	0.0%	0.0%	30.0%	70.0%	100%
1"	25.000	93%	100%	100%	100%	0.0%	0.0%	30.0%	70.0%	100%
3/4"	19.000	44%	100%	100%	100%	0.0%	0.0%	30.0%	70.0%	100%
1/2"	12.500	5%	26%	100%	100%	0.0%	0.0%	30.0%	70.0%	100%
3/8"	9.500	2%	3%	82%	100%	0.0%	0.0%	26.3%	70.0%	96%
No.4	4.750	1%	1%	15%	100%	0.0%	0.0%	6.3%	68.4%	75%
No.8	2.360	1%	0%	2%	70%	0.0%	0.0%	0.7%	46.7%	47%
No.10	2.000	1%	0%	1%	63%	0.0%	0.0%	0.6%	41.9%	42%
No.16	1.180	1%	0%	1%	42%	0.0%	0.0%	0.4%	28.0%	28%
No.30	0.600	1%	0%	1%	26%	0.0%	0.0%	0.3%	17.9%	18%
No.40	0.425	1%	0%	1%	21%	0.0%	0.0%	0.3%	14.7%	15%
No.50	0.300	1%	0%	1%	18%	0.0%	0.0%	0.2%	12.2%	12%
No.100	0.150	1%	0%	1%	13%	0.0%	0.0%	0.2%	8.8%	9%
No.200	0.075	1%	0%	1%	10%	0.0%	0.0%	0.2%	6.9%	7%

Tabla LV. Graduación integrada tipo F

Graduación de la mezcla integrada				
Malla	ø, mm	% que pasa		
		Obtenido	Mín esp.	Máx. esp.
1"	25.000	100%	100%	100%
3/4"	19.000	100%	100%	100%
1/2"	12.500	100%	100%	100%
3/8"	9.500	95%	90%	100%
No4	4.750	75%	55%	85%
No8	2.360	47%	32%	67%
No50	0.300	12%	7%	23%
No200	0.075	7%	2%	10%

Figura 57. Distribución de agregados para elaboración de briqueta con granulometría F



Figura 58. Curva granulométrica para diseño de mezcla con granulometría tipo F

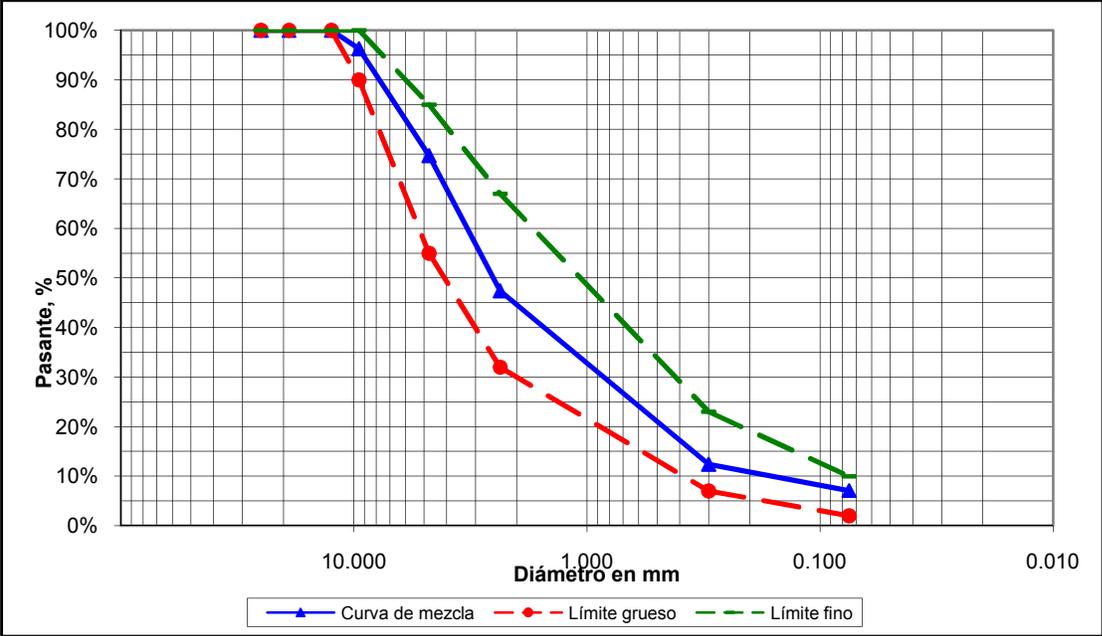


Tabla LVI. Resumen de características de agregados con graduación tipo F

Características de los agregados	Resultado	Especificación Libro Azul 2001 Sección 401
Abrasión (Máquina de Los Ángeles)		
Agregado 1 1/4" a 3/4"	14.6%	35% máximo
Agregado 3/4" a 1/2"	14.4%	35% máximo
Agregado 1/2" a 1/4"	15.3%	35% máximo
Agregado No. 4 a No. 8	15.5%	35% máximo
Desintegración al sulfato de sodio		
Agregado grueso 3/8" a No. 4	0.3%	12% máximo
Caras fracturadas :		
Al menos 1 cara fracturada	100%	90% mínimo
Más de 1 cara fracturada	100%	75% mínimo
Partículas planas y/o alargadas	4.5%	8% máximo
Equivalente de arena	64%	35% mínimo
Índice plástico	NP	4% máximo
Peso unitario	1718	1360 kg/m ² mínimo
Resistencia al desvestimiento	Mayor a 95%	70% mínimo, perfectamente cubiertas
Gravedad específica <i>bulk</i>		
Agregado grueso	2.592	No especificado
Agregado fino	2.571	No especificado
Filler	2.698	No especificado
Gravedad específica <i>bulk</i> (sss)		
Agregado grueso	2.640	No especificado
Agregado fino	2.623	No especificado
Gravedad específica aparente		
Agregado grueso	2.723	No especificado

Continuación tabla LVI

Agregado fino	2.712	No especificado
Absorción		
Agregado grueso	1.9	No especificado
Agregado fino	2.0	No especificado
Gravedad específica teórica máxima de agregados (Gsb)	2.577	No especificado

Tabla LVII. Datos de briquetas de mezcla asfáltica con graduación tipo F

Probeta No	% de asfalto	Peso de las briquetas			Estabilidad	Flujo
		Al aire	Agua	Peso P	Lectura del dial	(0.01")
1	4.5	1165.74	662.40	1168.23	400.0	10.0
2	4.5	1173.98	667.20	1176.93	410.0	11.0
3	4.5	1170.90	665.30	1173.42	380.0	11.0
4	5.0	1175.99	668.80	1177.92	400.0	11.0
5	5.0	1173.99	668.10	1175.84	405.0	12.0
6	5.0	1176.26	669.00	1178.25	410.0	12.0
7	5.5	1175.41	671.00	1178.22	410.0	13.0
8	5.5	1187.90	680.60	1188.89	405.0	15.0
9	5.5	1176.14	674.30	1176.80	410.0	15.0
10	6.0	1173.59	672.60	1174.35	400.0	16.0
11	6.0	1178.20	673.60	1181.93	390.0	16.0
12	6.0	1182.71	677.60	1183.14	380.0	16.0
13	6.5	1173.11	673.40	1173.65	385.0	17.0
14	6.5	1205.30	694.30	1205.69	390.0	18.0
15	6.5	1195.30	685.70	1196.06	380.0	18.0
16	7.0	1175.83	675.40	1175.92	370.0	18.0
17	7.0	1186.56	684.50	1186.76	365.0	17.0
18	7.0	1198.30	692.10	1198.67	360.0	18.0

Tabla LVIII. Resumen de resultados obtenidos en mezcla asfáltica con granulometría tipo F

% de cemento asfáltico	Gravedad específica <i>bulk</i> de briqueta (Gmb)	Gravedad específica máxima (RICE)	Gravedad específica de agregados	Absorción del asfalto, %	Asfalto efectivo, %	Vacios de agregado mineral VAM	Vacios, %	Vacios rellenos de asfalto VRA	Estabilidad corregida (lb)	Flujo (0.01")	Relación estabilidad/flujo	Módulo de rigidez
5.0	2.304	2.476	2.664	1.34	3.73	15.06	6.9	54.20	2545	10.7	239.2	526,260
5.5	2.317	2.459	2.664	1.34	4.23	15.03	5.8	61.40	2628	11.7	225.6	496,239
6.0	2.329	2.441	2.663	1.33	4.75	15.05	4.6	69.40	2614	14.3	183.3	403,322
6.5	2.339	2.425	2.664	1.34	5.25	15.14	3.5	76.90	2540	16.0	158.7	349,204
7.0	2.348	2.408	2.663	1.33	5.76	15.26	2.5	83.60	2446	17.7	138.6	304,930
7.5	2.359	2.391	2.663	1.33	6.27	15.32	1.3	91.50	2392	17.7	135.5	298,047

Constante del anillo = 2.5774 (lectura manómetro) + 102.707

Gráficas

Figura 59. Densidad de briqueta vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo C

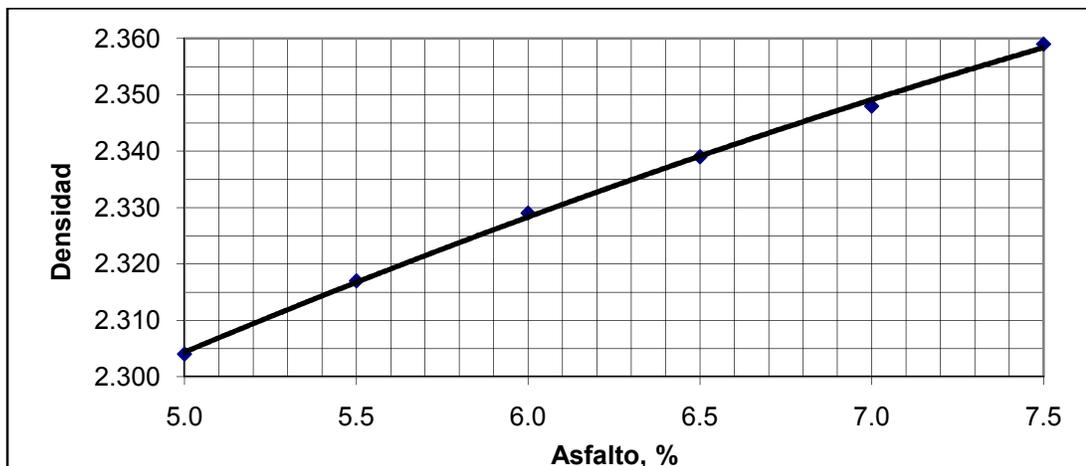


Figura 60. Porcentaje de vacíos vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F

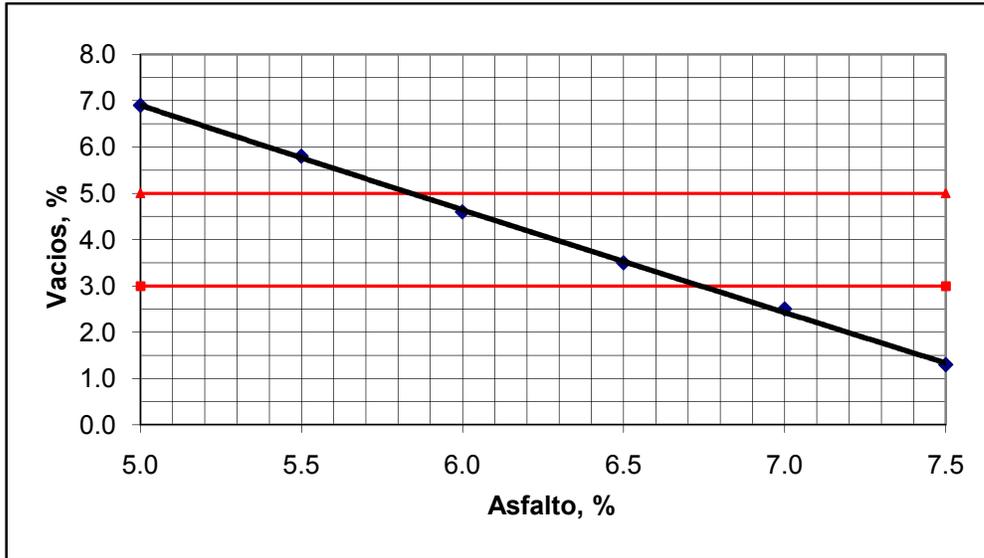


Figura 61. Vacíos de agregado mineral vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F

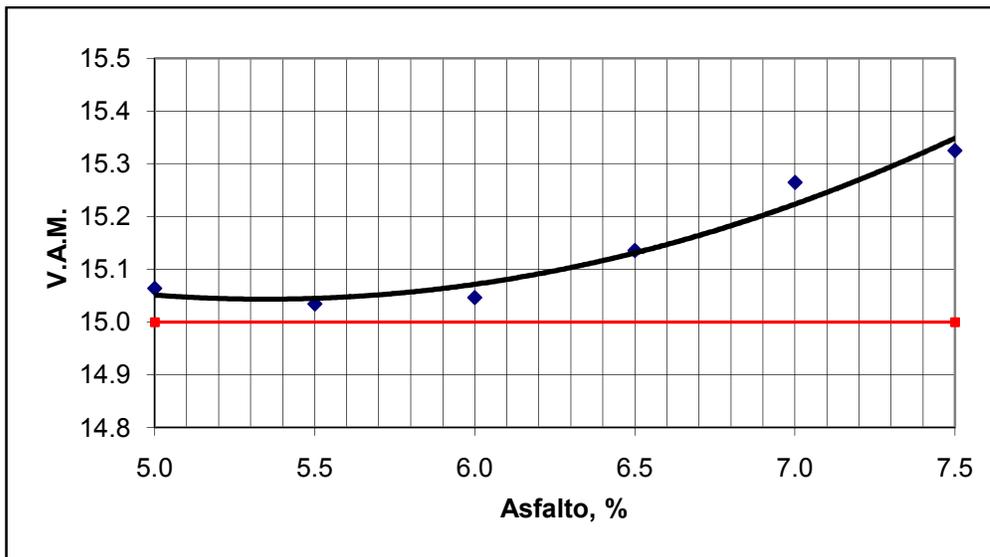


Figura 62. Vacíos rellenos de asfalto vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F

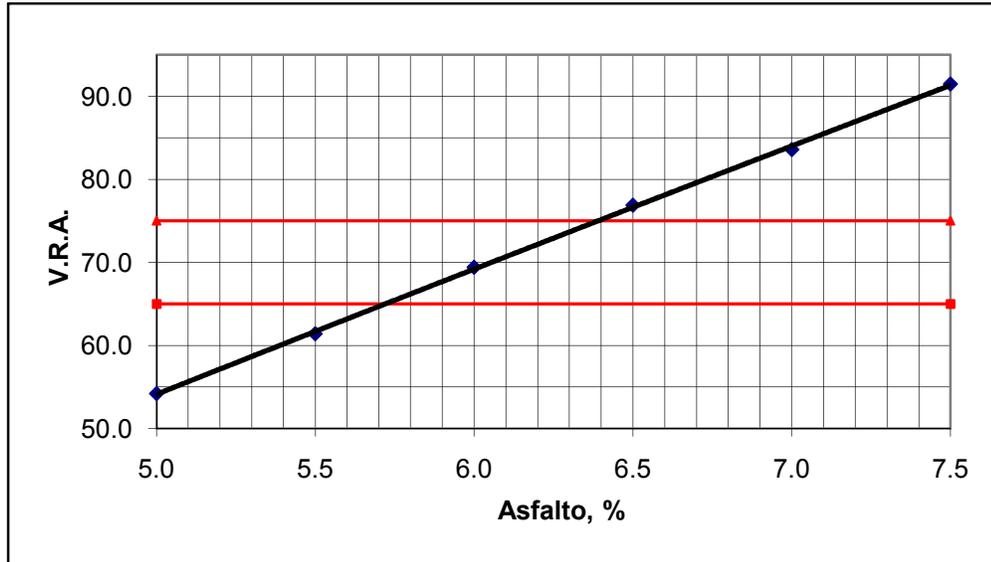


Figura 63. Estabilidad vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F

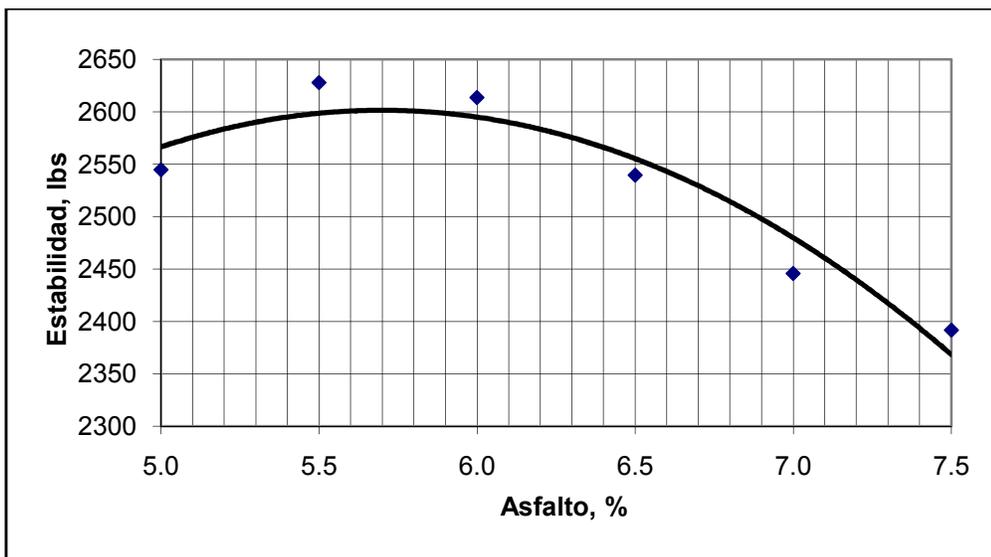


Figura 64. Flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F

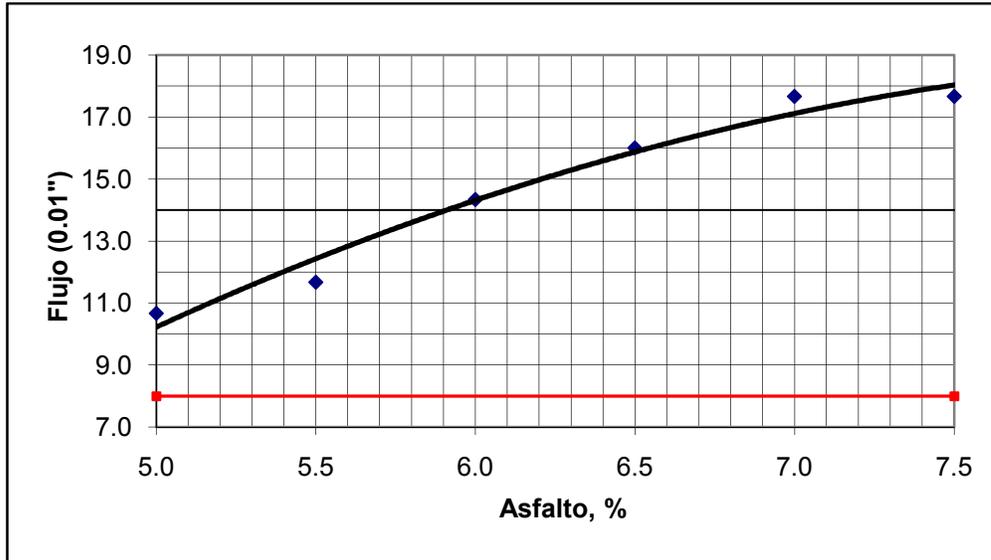


Figura 65. Estabilidad/flujo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F

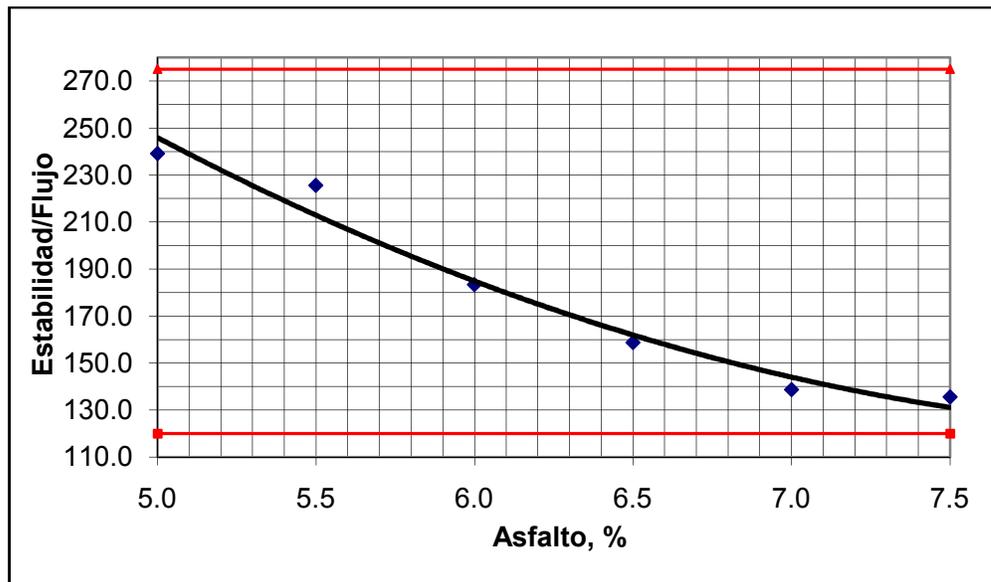


Figura 66. Asfalto efectivo vrs. porcentaje de asfalto de mezcla asfáltica con graduación tipo F

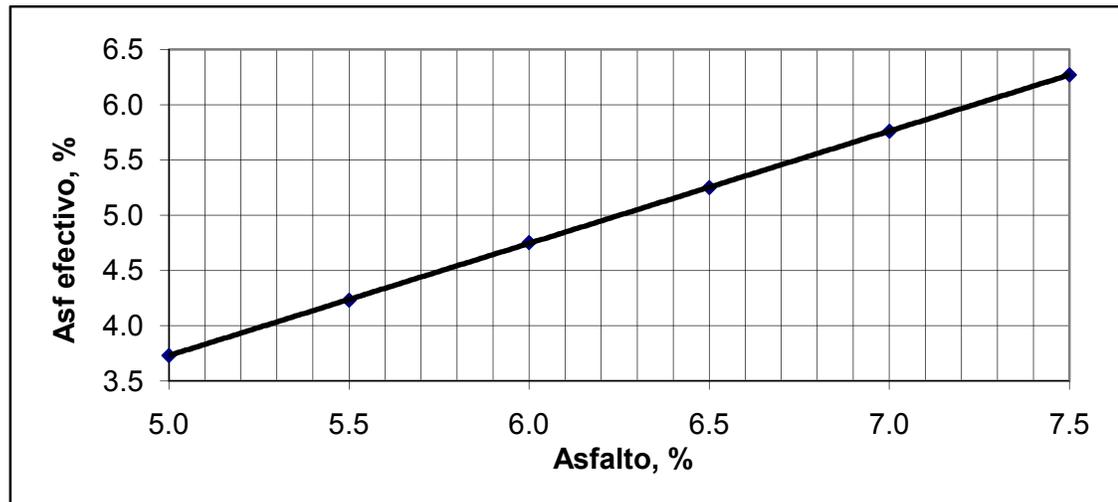


Tabla LIX. Características de la mezcla asfáltica con graduación tipo F al 4% de vacíos

Características de la mezcla	Obtenido
Densidad de briqueta	2.335
% de vacíos de la mezcla	4
% de vacíos agregado mineral	15.1
% de vacíos rellenos de asfalto	73
Estabilidad (libras)	2575
Flujo (0.01")	15.4
Relación estabilidad/lujo	170
% óptimo de asfalto	6.3
% de asfalto efectivo	5.1
% que pasa la malla No. 200	7
Relación polvo-asfalto	1.37

4.4 Selección del diseño final de mezcla

La práctica actual del diseño volumétrico de mezclas asfálticas, recomienda como primer criterio de selección elegir aquel contenido de asfalto correspondiente al 4 % de vacíos de aire (V_a), luego encontrar los demás parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica a partir de este porcentaje de asfalto, después verificar si estos parámetros volumétricos se encuentren dentro de los rangos establecidos.

Tabla LX. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo B

Característica	Obtenido	Aceptación según nivel de tráfico			
		Esp.	Tránsito < 10 ⁶ ESAL	Esp.	Tránsito > 10 ⁶ ESAL
Densidad briqueta	2.318	NE			
Estabilidad (lbs)	2440	>1200	✓	>1200	✓
Fluencia (0.01 pulg)	12.5	8-16	✓	8-14	✓
Relación estabilidad/flujo	197	120-275	✓	120-275	✓
% de V_a	4	3-5	✓	3-5	✓
% de VAM	14.4	>11	✓	>11	✓
% de VRA	72	65-78	✓	65-75	✓
% de Asfalto	5.4	3-8	✓	3-8	✓
% de Asfalto efectivo	4.7	NE		NE	
% Filler	4	0-6	✓	0-6	✓
% relación finos/bitumen	0.85	0.6-1.60	✓	0.6-1.60	✓
Particular recubiertas con bitumen	> 95%	> 95 %	✓	> 95 %	✓

Con la selección del diseño final se procede a evaluar la sensibilidad de la mezcla a la humedad.

Tabla LXI. Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo B

No.	Lectura del dial (div)	Carga (lbs)	Diámetro (plg ²)	Espesor (plg ²)	Resistencia Psi	Resistencia promedio psi
	A	B	C	D	E	C
PROBETAS SATURADAS :						
1	756	5602	3.96	2.66	339	330
3	714	5291	3.98	2.65	319	
5	740	5484	3.99	2.64	331	
PROBETAS SECAS :						
2	800	5927	4.01	2.60	362	370
4	820	6075	3.99	2.64	367	
6	850	6296	3.98	2.64	381	
Índice de resistencia remanente:						89 %

Las probetas fueron ensayadas con las mordazas para el Ensayo Marshall.

Donde:

$$\text{Carga (B)} = 7.3895 \times (\text{Lectura dial}) + 15.2202$$

$$\text{Carga} = 7.3895 \times 756 + 15.2202 = 5602 \text{ lbs}$$

$$\text{Resistencia (E)} = 2 \times B / (D \times C \times \pi)$$

$$\text{Resistencia} = \frac{2 \times 5602 \text{ lbs}}{2.66 \text{ plg} \times 3.96 \text{ plg} \times \pi} = 339 \text{ Psi}$$

$$\text{Índice de resistencia remante} = \frac{+}{+}$$

$$\text{Índice de resistencia remanente} = \frac{330 \text{ Psi}}{370 \text{ Psi}} \times 100 = 89\%$$

La especificación exige mayor del 80% por lo que si cumple.

Según los criterios para la selección del diseño final de la mezcla, si se cumplen con las especificaciones recomendadas, se da por entendido que estas mezclas en teoría cumple con las propiedades funcionales para las que se diseñan.

Aplicando los mismos criterios para la elección del diseño final de la mezcla con granulometría tipo B se analizaron las demás mezclas.

Tabla LXII. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo C

Característica	Obtenido	Aceptación según nivel de tráfico			
		Esp.	Tránsito < 10 ⁶ ESAL	Esp.	Tránsito > 10 ⁶ ESAL
Densidad briqueta	2.330	NE			
Estabilidad (lbs)	2010	>1200	✓	>1200	✓
Fluencia (0.01 pulg)	13.6	8-16	✓	8-14	✓
Relación estabilidad/flujo	148	120-275	✓	120-275	✓
% de Va	4	3-5	✓	3-5	✓
% de VAM	14.3	>12	✓	>12	✓
% de VRA	72	65-78	✓	65-75	✓
% de Asfalto	5.6	3-9	✓	3-9	✓
% de Asfalto efectivo	4.7	NE		NE	
% Filler	5	1-7	✓	1-7	✓
% Relación finos/bitumen	1.06	0.6-1.60	✓	0.6-1.60	✓
Particular recubiertas con bitumen	> 95%	> 95 %	✓	> 95 %	✓

Con la selección del diseño final se procede a realizar el último ensayo para comprobar si la mezcla es sensible a la humedad.

Tabla LXIII. Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo C

No.	Lectura del dial (div)	Carga (lbs)	Diámetro (plg ²)	Espesor (plg ²)	Resistencia Psi	Resistencia promedio psi
	A	B	C	D	E	C
PROBETAS SATURADAS :						
1	612	3704	3.98	2.52	235	234
3	617	3732	4.00	2.52	236	
5	620	3749	3.99	2.58	232	
PROBETAS SECAS :						
2	687	4130	4.00	2.50	263	257
4	683	4107	4.00	2.58	254	
6	680	4090	4.00	2.55	255	
Índice de resistencia remanente:						91 %

Las probetas fueron ensayadas con las mordazas para el Ensayo Marshall.

La constante del anillo = 2.5774 (lectura manómetro) + 102.707

Tabla LXIV. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo D

Característica	Obtenido	Aceptación según nivel de tráfico			
		Esp.	Tránsito < 10 ⁶ ESAL	Esp.	Tránsito > 10 ⁶ ESAL
Densidad briqueta	2.332	NE			
Estabilidad (lbs)	2260	>1200	✓	>1200	✓
Fluencia (0.01 pulg)	13.3	8-16	✓	8-14	✓

Continuación tabla LXIV

Relación estabilidad/flujo	168	120-275	✓	120-275	✓
% de Va	4	3-5	✓	3-5	✓
% de VAM	14.9	>13	✓	>13	✓
% de VRA	73	65-78	✓	65-75	✓
% de Asfalto	6.0	4-10	✓	4-10	✓
% de Asfalto efectivo	5	NE		NE	
% Filler	5	2-8	✓	2-8	✓
% Relación finos/bitumen	1.00	0.6-1.60	✓	0.6-1.60	✓
Particular recubiertas con bitumen	> 95%	> 95 %	✓	> 95 %	✓

Con la selección del diseño final se procede a realizar el último ensayo para observar si la mezcla es sensible a la humedad.

Tabla LXV. Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo D

No.	Lectura del dial (div)	Carga (lbs)	Diámetro (plg ²)	Espesor (plg ²)	Resistencia Psi	Resistencia promedio psi
	A	B	C	D	E	C
PROBETAS SATURADAS :						
1	143	1039	3.98	2.59	64	64
3	137	1005	4.00	2.50	64	
5	140	1022	3.99	2.54	64	
PROBETAS SECAS :						
2	165	1164	4.00	2.54	73	69
4	145	1050	3.99	2.57	65	
6	152	1090	3.99	2.57	68	
Índice de resistencia remanente:						93 %

Las probetas fueron ensayadas con las mordazas Lottman.

La constante del anillo = 2.5774 (lectura manómetro) + 102.707

Tabla LXVI. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría tipo E

Característica	Obtenido	Aceptación según nivel de tráfico			
		Esp.	Tránsito < 10 ⁶ ESAL	Esp.	Tránsito > 10 ⁶ ESAL
Densidad briqueta	2.344	NE			
Estabilidad (lbs)	2470	>1200	✓	>1200	✓
Fluencia (0.01 pulg)	14	8-16	✓	8-14	✓
Relación estabilidad/flujo	176	120-275	✓	120-275	✓
% de Va	4	3-5	✓	3-5	✓
% de VAM	16.6	>14	✓	>14	✓
% de VRA	73	65-78	✓	65-75	✓
% de Asfalto	6.2	4-11	✓	4-11	✓
% de Asfalto efectivo	4.9	NE		NE	
% Filler	6	2-10	✓	2-10	✓
% Relación finos/bitumen	1.22	0.6-1.60	✓	0.6-1.60	✓
Particular recubiertas con bitumen	> 95%	> 95 %	✓	> 95 %	✓

Con la selección del diseño final se procede a realizar el ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 para analizar la susceptibilidad de la mezcla a la humedad.

**Tabla LXVII. Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283
en mezcla asfáltica con granulometría tipo E**

No.	Lectura del dial (div)	Carga (lbs)	Diámetro (plg ²)	Espesor (plg ²)	Resistencia Psi	Resistencia promedio psi
	A	B	C	D	E	C
PROBETAS SATURADAS :						
1	155	1161	3.99	2.66	70	71
3	160	1198	4.00	2.62	73	
5	157	1175	3.99	2.63	71	
PROBETAS SECAS :						
2	152	1220	4.01	2.65	73	76
4	173	1294	3.98	2.60	80	
6	168	1257	4.0	2.64	76	
Índice de resistencia remanente:						94 %

Las probetas fueron ensayadas con las mordazas Lottman.

La constante del anillo = 2.5774 (lectura manómetro) + 102.707

**Tabla LXVIII. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con
granulometría tipo F**

Característica	Obtenido	Aceptación según nivel de tráfico			
		Esp.	Tránsito < 10 ⁶ ESAL	Esp.	Tránsito > 10 ⁶ ESAL
Densidad briqueta	2.335	NE			
Estabilidad (lbs)	2575	>1200	✓	>1200	✓
Fluencia (0.01 pulg)	15.4	8-16	✓	8-14	X
Relación estabilidad/flujo	172	120-275	✓	120-275	✓
% de Va	4	3-5	✓	3-5	✓
% de VAM	15.1	>15	✓	>15	✓
% de VRA	73	65-78	✓	65-75	✓
% de Asfalto	6.3	5-12	✓	5-12	✓

Continuación tabla LXVIII

% de Asfalto efectivo	5.1	NE		NE	
% Filler	7	2-10	✓	2-10	✓
% Relación finos/bitumen	1.37	0.6-1.60	✓	0.6-1.60	✓
Particular recubiertas con bitumen	> 95%	> 95 %	✓	> 95 %	✓

Este diseño con este tipo de material cumple únicamente para un tránsito < 10⁶ ESAL.

Con la selección del diseño final se procede a realizar el último ensayo para ver si la mezcla es sensible a la humedad.

Tabla LXIX. Ensayo de resistencia retenida AASHTO T 283 en mezcla asfáltica con granulometría tipo F

No.	Lectura del dial (div)	Carga (lbs)	Diámetro (plg ²)	Espesor (plg ²)	Resistencia Psi	Resistencia promedio psi
	A	B	C	D	E	C
PROBETAS SATURADAS :						
1	178	1238	3.98	2.61	76	74
3	168	1181	3.98	2.59	73	
5	172	1204	3.99	2.60	74	
PROBETAS SECAS :						
2	186	1283	3.98	2.62	78	75
4	171	1198	3.99	2.62	73	
6	181	1255	3.99	2.62	76	
Índice de resistencia remanente:						98 %

Las probetas fueron ensayadas con las mordazas Lottman.

La constante del anillo = 2.5774 (lectura manómetro) + 102.707

4.5 Matriz de resultados

Con la siguiente tabla se puede analizar la incidencia que tiene la graduación y el contenido de asfalto

Tabla LXX. Matriz de resultados

Características de la Mezcla	RESULTADOS PARA GRADACIONES				
	B	C	D	E	F
% de vacíos	4	4	4	4	4
Densidad de briqueta	2.318	2.330	2.332	2.344	2.335
% de Vacíos agregado mineral	14.4	14.3	14.9	16.6	15.1
% de Vacíos rellenos de asfalto	72	72	73	73	73
Estabilidad (libras)	2440	2010	2260	2470	2575
Flujo (0.01")	12.5	12.8	13.3	14.0	15.4
Relación estabilidad/flujo	197	158	168	176	170
% Óptimo de asfalto	5.4	5.6	6.0	6.2	6.3
% de asfalto efectivo	4.7	4.7	5	4.9	5.1
% que pasa la malla No. 200	4	5	5	6	7
Relación polvo-asfalto	0.85	1.06	1.00	1.22	1.37
Sensibilidad a la humedad	89%	91%	93%	94%	98%
Partículas recubiertas con bitumen	Mayor 95%	Mayor 95%	Mayor 95%	Mayor 95%	Mayor 95%

CONCLUSIONES

1. Para la selección del tipo de granulometría de agregado que se utilizará se toman en cuenta: espesor de capa a diseñar y función de la mezcla en la estructura del pavimento, la disponibilidad de bancos de agregados y el lugar de trabajo de la mezcla.
2. El libro de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, de la Dirección General de Caminos, Septiembre 2001, en la tabla 401-1, Graduación de Agregados para Pavimentos de Concreto Asfáltico en Caliente (ASTM D 3515) tipifica graduaciones A, B, C, D, E y F, con base en las cuales se realizó un diseño de concreto asfáltico en caliente por cada tipo de huso granulométrico, exceptuando el huso granulométrico tipo A, debido a que el tamaño máximo nominal designado en las especificaciones es de 2" y el método Marshall sólo permite un valor máximo de 1".
3. La selección del contenido óptimo de cemento asfáltico depende de muchos factores. El punto inicial para la selección del contenido óptimo es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos; luego, con este porcentaje, se verifica si todas las propiedades de la mezcla cumplen con las especificaciones. Otro criterio es escoger el valor promedio de los porcentajes de asfalto que producen la máxima estabilidad, la máxima densidad y el valor medio de vacíos de aire, y con este valor se verifica si todas las propiedades se cumplen. Con estas selecciones lo que se busca es adicionar la mayor cantidad de cemento asfáltico posible, para aumentar el grosor de la película asfáltica que cubre

las partículas de agregado, logrando así que esta película no envejezca o endurezca tan rápido como lo hacen las películas delgadas.

4. La mezclas de concreto asfáltico en caliente analizadas y logradas, con agregados con graduación tipo B y C, y con un porcentaje de vacíos de 4 %, cumplen con todos los requisitos que exigen las especificaciones. Sin embargo, son mezclas gruesas y densas de granulometría continua, con un esqueleto mineral fuerte y bajo contenido de asfalto por lo que son propensas a la segregación, muy permeables y vulnerables al desgaste y, por ende, poco durables ya que sufren envejecimiento y deterioro prematuro al quedar expuestas al tránsito usuario.

5. La mezclas de concreto asfáltico en caliente analizadas y logradas con agregados con graduación tipo D y E, con un porcentaje de vacíos de 4 %, cumplen con todos los requisitos que exigen las especificaciones. Son mezclas finas y densas, de granulometría continua con un esqueleto mineral resistente que se caracterizan por brindar una textura superficial más cerrada que las del tipo B y C. Estas mezclas necesitan una mayor cantidad de asfalto por la cantidad de finos que tienen, lo cual ayuda a que la capa que recubre el agregado sea mucho más gruesa, incrementando la durabilidad de la misma.

6. La mezcla de concreto asfáltico en caliente, analizada y lograda con agregado con graduación tipo F con un porcentaje de vacíos de 4 %, cumple con todos los requisitos que exigen las especificaciones. Son mezclas densas y finas, fuertes, con contenido de asfalto alto lo cual las hace poco permeables, durables y muy resistentes al desgaste provocado por las llantas de los vehículos usuarios

RECOMENDACIONES

1. Que las mezcla de concreto asfáltico en caliente, logradas con las graduaciones tipo B y C indicadas en la tabla 401-1 del Libro Azul, se utilicen únicamente en capas intermedias, dentro de las estructuras de pavimento, o sea, como bases negras asegurándose de colocar las superficies de rodadura lo antes posible para evitar deterioros prematuros.
2. Que las mezclas de concreto asfáltico en caliente, logradas con las graduaciones tipo D y E indicadas en la tabla 401-1 de Libro Azul, se usen como capas de superficies de rodadura.
3. Que las mezclas de concreto asfáltico en caliente, logradas con la graduación tipo F indicada en la tabla 401-1 de Libro Azul, se usen como superficies de desgaste para mejorar el IRI, bacheo y como recapeos de mantenimiento preventivo.
4. Debido al deterioro prematuro que se ha observado en la última década en las mezclas utilizadas en la red vial de Guatemala, se deben usar aditivos mejoradores de adherencia agregado-cemento asfáltico.
5. Debido al incremento del parque de vehículos pesados, en Guatemala, para incrementar la durabilidad de los concretos asfálticos en caliente utilizados como superficie de rodadura en las carreteras de primer orden o carreteras principales, usar asfaltos modificados con polímeros.

BIBLIOGRAFÍA

1. *AASHTO. American Association of State Highways and Transportation Official. Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing, Part 1. Sixteen Editions. 1993*
2. *ASPHALT INSTITUTE. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt Institute. Serie de manuales No. 22 (MS-22).1992*
3. *ASPHALT INSTITUTE. Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types. Asphalt Institute. Manual series No.2 (MS-2) 1988*
4. *ASTM. American Society for Testing and Materials. Volumen 04.02 Concrete and aggregates. 2004*
5. *ASTM. American Society for Testing and Materials. Volumen 04.03 Road and Paving materials, vehicle-pavement system. 2004*
6. *DGC. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda República de Guatemala. Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. 2001*
7. *The Shell bitumen handbook. Read, John. Fifth Edition. United Kingdom. 2003; 460*

ANEXOS

Requisitos de los agregados

AGREGADO GRUESO	
Abrasión, %	< 35
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio, %	< 12
Caras fracturadas, %	
1 cara fracturada	> 90
2 cara fracturada	> 75
Partículas planas y/o alargadas, %	< 8
Ensayo de adherencia, %	> 95
AGREGADO FINO	
Equivalente de arena, %	> 35
Plasticidad, %	< 4

Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Tamaño nominal máximo del agregado en mm	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)		
	Marshall		
	3% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾	5% ⁽¹⁾
9.50	14	15	16
12.50	13	14	15
19.00	12	13	14
25.00	11	12	13
37.50	10	11	12
50.00	9.5	10.5	11.5

Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico

MÉTODO DE DISEÑO	VALORES LÍMITES	
<u>MARSHALL</u> (AASHTO T 245)	<u>MÍNIMO</u>	<u>MÁXIMO</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de 	0.25 Pa-s (250 cS)	0.31 Pa-s (310 cS)
<ul style="list-style-type: none"> • Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen 	75	75
<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad 	5,338 N (1,200 libras)	
<ul style="list-style-type: none"> • Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulg.) <ul style="list-style-type: none"> • Tránsito < 10⁶ ESAL • Tránsito > 10⁶ ESAL 	8 8	16 14
<ul style="list-style-type: none"> • Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0.01 pulg.) 	120	275
<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada 	3	5
<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto <ul style="list-style-type: none"> • Tránsito < 10⁶ ESAL • Tránsito > 10⁶ ESAL 	65 65	78 75
<ul style="list-style-type: none"> • Relación finos/bitumen 	0.6	1.6
<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283 Resistencia retenida 	80 %	
<ul style="list-style-type: none"> • Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195 	95 %	

Cantidad de cemento asfáltico (ASTM D 3515)

Graduación designada y tamaño máximo nominal					
A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12

Tabla para corrección de estabilidad por volumen de probeta.

Volumen del espécimen, cc		Espesor aproximado del especimen		Relación de correlación
		pulgadas	mm	
200	213	1	25.4	5.56
214	225	1 1/16	27.0	5.00
226	237	1 1/8	28.6	4.55
238	250	1 3/16	30.2	4.17
251	264	1 1/4	31.8	3.85
265	276	1 5/16	33.3	3.57
277	289	1 3/8	34.9	3.33
290	301	1 7/16	36.5	3.03
302	316	1 1/2	38.1	2.78
317	328	1 9/16	39.7	2.50
329	340	1 5/8	41.3	2.27
341	353	1 11/16	42.9	2.08
354	367	1 3/4	44.5	1.92
368	379	1 13/16	46.0	1.79
380	392	1 7/8	47.6	1.67
393	405	1 15/16	49.2	1.56
406	420	2	50.8	1.47
421	431	2 1/16	52.4	1.39
432	443	2 1/8	54.0	1.32
444	456	2 3/16	55.6	1.25
457	470	2 1/4	57.2	1.19
471	482	2 5/16	58.7	1.14
483	495	2 3/8	60.3	1.09
496	508	2 7/16	61.9	1.04
509	522	2 1/2	63.5	1.00
523	535	2 9/16	65.1	0.96
536	546	2 5/8	66.7	0.93
547	559	2 11/16	68.3	0.89
560	573	2 3/4	69.9	0.86
574	585	2 13/16	71.4	0.83
586	598	2 7/8	73.0	0.81
599	610	2 15/16	74.6	0.78
611	625	3	76.2	0.76

