



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

**MANUAL DE LABORATORIO PARA ESTUDIANTES PARA EL
DESARROLLO DE ENSAYOS EN CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE**

Pablo Missael Cox Tuch

Asesorado por el Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANUAL DE LABORATORIO PARA ESTUDIANTES PARA EL
DESARROLLO DE ENSAYOS EN CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PABLO MISSAEL COX TUCH

ASESORADO POR EL ING. WUILLIAN RICARDO YON CHAVARRÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

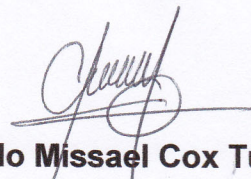
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Walter Rolando Salazar González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

MANUAL DE LABORATORIO PARA ESTUDIANTES PARA EL DESARROLLO DE ENSAYOS EN CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 07 de mayo 2014.



Pablo Missael Cox Tuch

Guatemala, 17 de febrero de 2015

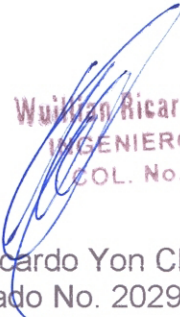
Ingeniero Guillermo Francisco Melini Salguero
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Área de Materiales de construcción y Obras Civiles
Coordinador

Respetable Ingeniero Melini:

Me dirijo a usted para manifestarle que he asesorado el trabajo de tesis titulado: **“MANUAL DE LABORATORIO PARA ESTUDIANTES PARA EL DESARROLLO DE ENSAYOS EN CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE”**, desarrollado por el estudiante universitario Pablo Missael Cox Tuch, previo a optar el título de Ingeniero Civil.

Al haber concluido este trabajo y habiendo efectuado la revisión final, manifiesto a usted que dicho trabajo de Tesis cumple con los requerimientos establecidos para su desarrollo y proporciona una herramienta valiosa para la comunidad estudiantil, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Wuillian Ricardo Yon Ch.
INGENIERO CIVIL
COL. No. 2029

Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarria
Colegiado No. 2029
ASESOR



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
27 de febrero de 2015

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación MANUAL DE LABORATORIO PARA ESTUDIANTES PARA EL DESARROLLO DE ENSAYOS EN CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Pablo Missael Cox Tuch, quien contó con la asesoría del Ing. Wuillian Ricardo Von Chavarría.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
ÁREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Pablo Missael Cox Tuch, titulado **MANUAL DE LABORATORIO PARA ESTUDIANTES PARA EL DESARROLLO DE ENSAYOS EN CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco **DIRECTOR**



Guatemala, marzo 2015

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





DTG. 130.2015

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: **MANUAL DE LABORATORIO PARA ESTUDIANTES PARA EL DESARROLLO DE ENSAYOS EN CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE**, presentado por el estudiante universitario: **Pablo Missael Cox Tuch**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 23 de marzo de 2015

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Quien merece toda la honra y gloria.
Mis padres	Pablo Cox y Clara Tuch, como una muestra de su apoyo incondicional.
Mis hermanos	María Angélica Tuch y Luis Miguel Batz Tuch (q.e.p.d.), con mucho cariño y aprecio.
Mis tios	Por alentarme a seguir adelante. En especial a María Angélica Bixcul, por ser un pilar en mi preparación universitaria, con todo cariño.
Mis primos	Con mucho cariño y aprecio.
Mi sobrino	Juan José Gonzalez Tuch, por la alegría que me inspira, con todo cariño
Amigos y compañeros	Por las experiencias y momentos compartidos, con mucho aprecio.
Mi familia política	Por su apoyo constante, en especial a Luis Raymundo Batz.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la vida y sabiduría.
Mi familia	Por ser un pilar en mi vida y por el apoyo que siempre me han dado.
Mis amigos de la Facultad	Wilmer López, Oscar Alvarado y a todos con los que compartí experiencias, por su grandiosa amistad incondicional.
Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría	Por su valiosa colaboración en la asesoría del presente trabajo de graduación.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el templo de mi formación académica.
Facultad de Ingeniería	Por los conocimientos adquiridos, con mucho cariño y respeto.
Padegua	Por permitirme ser parte de su equipo y por su valiosa colaboración en la elaboración del presente trabajo.
Proequipos S. A.	A todo el personal. Especialmente al Ing. Pedro Luis Rocco, al señor Carlos Ovalle, Tomas Mejía y Edwin Rodríguez.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. DIAGNÓSTICO DE LABORATORIO	1
1.1. Tipos de ensayos realizados para el control de calidad de mezclas asfálticas en caliente	1
1.2. Equipo necesario para la realización de ensayos.....	2
1.3. Equipo disponible en el laboratorio para la realización de ensayos	3
1.4. Aplicación y ensayos propuestos	5
1.4.1. Directrices de los ensayos.....	5
1.4.2. Ensayos propuestos	5
2. GENERALIDADES DEL ASFALTO.....	7
2.1. Concreto asfáltico	7
2.2. Antecedentes.....	7
2.3. Resumen histórico.....	8
2.4. Definición.....	10
2.5. Producción del asfalto	10
2.6. Composición química del asfalto	13
2.7. Propiedades físicas del asfalto de pavimentación	13

2.7.1.	Durabilidad	14
2.7.2.	Adhesión y cohesión	14
2.7.3.	Susceptibilidad a la temperatura	14
2.7.4.	Endurecimiento y envejecimiento.....	16
2.7.5.	Pureza.....	17
2.8.	Clasificación de los asfaltos de pavimentación	17
2.8.1.	Cementos asfálticos	17
2.8.1.1.	Caracterización por penetración.....	19
2.8.1.2.	Caracterización por viscosidad.....	19
2.8.1.3.	Caracterización por comportamiento....	20
2.8.2.	Asfaltos rebajados.....	20
2.8.2.1.	Asfalto fluidificado	21
2.8.2.2.	Asfalto de curado rápido (RC)	21
2.8.2.3.	Asfalto de curado medio (MC).....	21
2.8.2.4.	Asfalto de curado lento (SC)	21
2.8.3.	Asfalto emulsificado	22
2.8.3.1.	Emulsión aniónica	22
2.8.3.2.	Emulsión catiónica	22
3.	AGREGADOS.....	23
3.1.	Términos típicos.....	23
3.2.	Clasificación de los agregados.....	23
3.2.1.	Ígneas.....	24
3.2.2.	Sedimentarias	24
3.2.3.	Metamórficas.....	24
3.3.	Origen de los agregados.....	25
3.3.1.	Agregados naturales	25
3.3.2.	Agregados procesados	25
3.4.	Producción, manipulación y muestreo de los agregados	26

3.4.1.	Manipuleo de los agregados.....	27
3.4.2.	Muestreo de los agregados	27
3.5.	Propiedades de los agregados	28
3.5.1.	Tamaño máximo de la partícula y graduación	28
3.5.2.	Gradación	29
3.5.3.	Limpieza	30
3.5.4.	Rugosidad.....	30
3.5.5.	Forma de la partícula.....	31
3.5.6.	Textura de la superficie	32
3.5.7.	Capacidad de absorción	32
3.5.8.	Afinidad para el asfalto	33
4.	ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD	35
4.1.	Ensayo de extracción de asfalto en la mezcla (ASTM D 2172).....	35
4.1.1.	Maquinaria y equipo	35
4.1.2.	Procedimiento.....	36
4.1.3.	Cálculos.....	39
4.1.4.	Ejemplo práctico	40
4.1.5.	Reportar.....	41
4.1.6.	Análisis de resultados.....	41
4.1.7.	Conclusión.....	42
4.1.8.	Recomendaciones	42
4.2.	Ensayo de granulometría de los agregados sin asfalto (AASHTO T-11, T-27).....	43
4.2.1.	Maquinaria y equipo	43
4.2.2.	Procedimiento.....	44
4.2.3.	Cálculos.....	47
4.2.4.	Ejemplo práctico	48

4.2.5.	Reportar	49
4.2.6.	Análisis de resultados	50
4.2.7.	Conclusiones.....	50
4.2.8.	Recomendaciones.....	50
4.3.	Gravedad específica del concreto asfáltico compactado (AASHTO T 166-05).....	51
4.3.1.	Maquinaria y equipo	51
4.3.2.	Procedimiento	52
4.3.3.	Cálculos.....	56
4.3.4.	Ejemplo práctico.....	56
4.3.5.	Reportar	58
4.3.6.	Análisis de resultados	59
4.3.7.	Conclusiones.....	59
4.3.8.	Recomendaciones.....	60
4.4.	Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall (AASHTO T-245, ASTM D -6927)	60
4.4.1.	Maquinaria y equipo	61
4.4.2.	Procedimiento	61
4.4.3.	Cálculos.....	64
4.4.4.	Ejemplo práctico.....	64
4.4.5.	Reportar	67
4.4.6.	Análisis de resultados	67
4.4.7.	Conclusiones.....	67
4.4.8.	Recomendaciones.....	68
4.5.	Determinación de porcentaje de vacíos en la mezcla (AASHTO T-269).....	68
4.5.1.	Procedimiento	69
4.5.2.	Cálculos.....	70
4.5.3.	Ejemplo práctico.....	71

4.5.4.	Reportar.....	73
4.5.5.	Análisis de resultados.....	73
4.5.6.	Conclusiones.....	73
4.5.7.	Recomendaciones.....	74
4.6.	Determinación de la gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico en caliente (Método Rice, ASTM D-2041, AASHTO T-209).....	74
4.6.1.	Maquinaria y equipo.....	75
4.6.2.	Procedimiento.....	75
4.6.3.	Cálculos.....	77
4.6.4.	Ejemplo práctico.....	77
4.6.5.	Reportar.....	78
4.6.6.	Análisis de resultados.....	78
4.6.7.	Conclusión.....	78
4.6.8.	Recomendaciones.....	79
4.7.	Prueba de penetración del bitumen asfáltico (AASHTO T-49, ASTM D-5).....	79
4.7.1.	Maquinaria y equipo.....	79
4.7.2.	Procedimiento.....	82
4.7.3.	Cálculos y reporte.....	83
4.7.4.	Ejemplo práctico.....	84
4.7.5.	Análisis de resultados.....	85
4.7.6.	Conclusiones.....	85
4.7.7.	Recomendaciones.....	85
4.8.	Prueba de ablandamiento del bitumen (AASHTO T-53).....	86
4.8.1.	Maquinaria y equipo.....	86
4.8.2.	Procedimiento.....	91
4.8.3.	Cálculos y reporte.....	92
4.8.4.	Ejemplo práctico.....	93

4.8.5.	Análisis de resultados	93
4.8.6.	Conclusiones.....	93
4.8.7.	Recomendaciones.....	94
5.	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MÉTODO MARSHALL)	95
5.1.	Toma de muestra en banco de materiales	96
5.2.	Identificación de materiales según el tipo de mezcla a diseñar	97
5.3.	Caracterización de los agregados	98
5.4.	Análisis granulométrico de los agregados (AASHTO T 11).....	99
5.5.	Combinación granulométrica de los agregados	102
5.6.	Porcentajes teóricos de asfalto presente en la mezcla de diseño.....	103
5.7.	Dosificación de materiales para la elaboración de mezcla asfáltica en caliente.....	104
5.8.	Preparación de mezcla asfáltica en caliente y compactación de briquetas Marshall	105
5.8.1.	Dosificación	105
5.8.2.	Temperatura de mezclado.....	106
5.8.3.	Elaboración de mezcla	106
5.9.	Elaboración de briquetas Marshall	109
5.10.	Ensayos y resultados de la briquetas Marshall	111
5.10.1.	Gravedad específica de la mezcla compactada y cálculo de vacíos.....	111
5.10.2.	Estabilidad y fluencia de las briquetas Marshall	118
5.11.	Resultados	121
5.11.1.	Análisis de resultados	126

CONCLUSIONES	129
RECOMENDACIONES	131
BIBLIOGRAFÍA.....	133
ANEXOS.....	135

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Gráfica de esquema de fabricación del asfalto	12
2.	Consistencia del asfalto	15
3.	Máquina de Los Ángeles.....	31
4.	Fraccionamiento de la mezcla.....	37
5.	Colocación de muestra y filtro	38
6.	Extracción de asfalto (centrífuga).....	38
7.	Mezcla sin asfalto.....	39
8.	Lavado de material sin asfalto.....	45
9.	Agregado seco para tamizado	46
10.	Tamizado de agregados.....	46
11.	Curva de graduación granulométrica obtenida.....	49
12.	Compactación de briquetas Marshall	54
13.	Extracción de briquetas.....	54
14.	Peso de briquetas seco saturadas	55
15.	Peso briquetas en agua	55
16.	Briquetas en baño de María	62
17.	Colocación de briquetas a la máquina Marshall.....	63
18.	Lectura de dial de carga y de flujo	63
19.	Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica.....	72
20.	Vibrodesairador y mezcla para gravedad específica Rice.....	76
21.	Penetrómetro para asfaltos	80
22.	Aguja de acero inoxidable	81
23.	Anillos de latón	87

24.	Sistema de soporte	88
25.	Montaje de sistema de soporte	89
26.	Guías de latón para centrar esferas.....	90
27.	Muestras de agregado	96
28.	Gráfico de curva de combinación granulométrica	103
29.	Agregados combinados	107
30.	Agregados y asfalto previo a ser mezclados	107
31.	Mezclado	108
32.	Mezcla asfáltica en caliente	108
33.	Briquetas Marshall	109
34.	Vacíos de aire <i>versus</i> porcentaje de AC.....	122
35.	Gravedad específica de la mezcla compactada <i>versus</i> porcentaje de AC... ..	123
36.	Vacíos en agregado mineral <i>versus</i> porcentaje de AC	123
37.	Vacíos de relleno asfáltico <i>versus</i> porcentaje de AC.....	124
38.	Estabilidad <i>versus</i> porcentaje de AC	124
39.	Fluencia <i>versus</i> porcentaje de AC	125
40.	Relación estabilidad/fluencia <i>versus</i> porcentaje de AC	125

TABLAS

I.	Equipo de laboratorio existente	3
II.	Equipo de laboratorio nuevo.....	4
III.	Composición química del asfalto	13
IV.	Graduación de agregados para pavimento asfáltico	29
V.	Graduación granulométrica mezcla tipo E	48
VI.	Datos de pesos y volumen de briquetas Marshall	57
VII.	Factores de corrección por temperatura.....	58
VIII.	Resultados de gravedad específica de mezcla compactada.....	58

IX.	Datos y lecturas de estabilidad y fluencia Marshall	65
X.	Factores de corrección de estabilidad	66
XI.	Equivalencias entre grado de penetración y grado de viscosidad.....	84
XII.	Tipos de mezclas asfálticas	97
XIII.	Agregados para diseño de mezcla	98
XIV.	Graduación granulométrica según el tipo de mezcla	99
XV.	Granulometría de agregado $\frac{1}{2}$ " – 0.....	100
XVI.	Granulometría de agregado $\frac{3}{8}$ " # 8.....	100
XVII.	Granulometría de agregado $\frac{3}{4}$ " especial.....	101
XVIII.	Granulometría de agregado 1" #56.....	101
XIX.	Combinación granulométrica de diseño.....	102
XX.	Porcentajes teóricos de contenido asfáltico	104
XXI.	Dosificación de materiales	104
XXII.	Parámetros de diseño Marshall	110
XXIII.	Vacíos en el agregado mineral (VAM)	110
XXIV.	Gravedad específica de mezcla compactada con 4,0 por ciento de AC.....	112
XXV.	Gravedad específica de mezcla compactada con 4,5 por ciento de AC.....	112
XXVI.	Gravedad específica de mezcla compactada con 5,0 por ciento de AC.....	113
XXVII.	Gravedad específica de mezcla compactada con 5,5 por ciento de AC.....	113
XXVIII.	Gravedad específica de mezcla compactada con 6.0 por ciento de AC.....	114
XXIX.	Porcentaje de vacíos en la mezcla con 4,0 por ciento de AC	116
XXX.	Porcentaje de vacíos en la mezcla con 4,5 por ciento de AC	117
XXXI.	Porcentaje de vacíos en la mezcla con 5,0 por ciento de AC	117

XXXII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla con 5,5 por ciento de AC.....	117
XXXIII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla con 6,0 por ciento de AC.....	118
XXXIV.	Estabilidad y fluencia de mezcla con 4,0 por ciento de AC	119
XXXV.	Estabilidad y fluencia de mezcla con 4,5 por ciento de AC	119
XXXVI.	Estabilidad y fluencia de mezcla con 5,0 por ciento de AC	120
XXXVII.	Estabilidad y fluencia de mezcla con 5,5 por ciento de AC	120
XXXVIII.	Estabilidad y fluencia de mezcla con 6,0 por ciento de AC	121
XXXIX.	Resumen de resultados.....	122

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC-20	Asfalto convencional
AC	Cemento asfáltico
cm³	Centímetro cúbico
DTM	Densidad teórica máxima
Ftemp k	Factor de corrección por temperatura del agua
Fvol	Factor de corrección por volumen
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramos
Gb	Gravedad específica del asfalto
Gmb	Gravedad específica de la mezcla compactada en (g/cm ³)
GSE	Gravedad específica efectiva del agregado integrado
Gmm	Gravedad específica máxima de la mezcla.
Ldc	Lectura del dial de carga
Ldf	Lectura del dial de flujo
Lbs	Libras
PB	Peso bruto de la muestra de mezcla
PBE	Peso bruto de material de la mezcla seca sin asfalto
Pb	Peso bruto de material de la mezcla sin asfalto sin lavar
PBR	Peso bruto retenido acumulado de material lavado en cada tamiz

Pa	Peso de papel filtro antes de la extracción
Pd	Peso de papel filtro después de la extracción
Ppa	Peso del picnómetro más agua
Ppma	Peso del picnómetro, agua y muestra
Waguasss	Peso en agua de la muestra en estado sss en g
Ws	Peso en el aire de la muestra en estado seco en g
Wairesss	Peso en el aire de la muestra en estado sss en g
Pma	Peso neto de la muestra al aire
%	Porcentaje
% Ag	Porcentaje de agregado en la mezcla
% AC	Porcentaje de bitumen asfáltico
% pasa	Porcentaje de material pasante en cada tamiz
% Ret	Porcentaje de peso retenido
% Ret. ac	Porcentaje de peso retenido acumulado
sss	Saturado superficialmente seco
REF	Relación estabilidad/fluencia
VA	Vacíos de aire
VAM	Vacíos en agregado mineral
VRA	Vacíos en relleno de asfalto

GLOSARIO

AASHTO	Siglas que corresponden a la entidad, American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes).
Abrasión	Desgaste derivado de la acción mecánica por la fricción entre dos superficies.
Agreca	Agregados de Centro América S. A.
Agregado	Material que conforma el esqueleto granular de la mezcla.
Agregado grueso	Agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (N° 4).
Agregado fino	Agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (N° 4).
Agregado filler	Polvo mineral de tamaño menor que pasa el tamiz de 0,075 mm (N° 200).
ASTM	Siglas que corresponden a la entidad, American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).

Asfalto	También denominado betún, es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante para la construcción de carreteras.
Bitumen	Sustancia cementante visco elástica proveniente de la refinación del petróleo.
Briqueta	Mezcla asfáltica compactada en moldes cilíndricos.
Cemento asfáltico	Asfalto controlado para ser usado como aglomerante en la preparación de mezclas asfálticas.
Compactación	Acción de comprimir o compactar una masa determinada de un material a una densidad requerida.
Densidad	Grado de solidez y rigidez de una mezcla uniformemente compactada distribuyendo su masa en todo su volumen.
Estabilidad	Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo cargas aplicadas.
Fluencia	Capacidad de una mezcla asfáltica de acomodarse a los asentamientos en presencia de una carga aplicada.
Padegua	Pavimentos de Guatemala S. A.

Pétreo	Material que proviene de la roca, de una piedra o de un peñasco.
PPO	Planta Palín Oeste.
Tara	Recipiente o vehículo donde se transporta una muestra de determinado material.
Viscosidad	Parámetro usado para medir la consistencia del asfalto.

RESUMEN

La mezcla asfáltica en caliente es un producto empleado para la pavimentación de vías de comunicaciones terrestres y calles de acceso. Es un material muy noble debido a su flexibilidad proporcionado por las propiedades del bitumen asfáltico. Sin embargo, para que una mezcla asfáltica en caliente tenga calidad y durabilidad, tiene que cumplir con ciertos requisitos de diseño tales como: granulometría de los agregados, densidad y porcentaje de vacíos de la mezcla compactada, estabilidad, fluencia, desgaste de los agregados y consistencia del bitumen asfáltico.

Para determinar la calidad de la mezcla asfáltica es necesario emplear una serie de ensayos para los cuales es necesario detallar lo siguiente: el equipo necesario, el procedimiento a seguir y poder realizar el análisis de los resultados obtenidos, compararlos con los parámetros y especificaciones de diseño.

Para tal efecto el estudiante de la carrera de Ingeniería Civil puede contar con un manual práctico para el desarrollo de estos ensayos. También puede interactuar con el diseño de mezcla por medio del Método Marshall, desarrollado por el ingeniero Bruce Marshall, el cual permite determinar el contenido óptimo de asfalto para una mezcla en caliente involucrando las características de los agregados utilizados.

OBJETIVOS

General

Brindar al estudiante una herramienta para poder realizar ensayos en concreto asfáltico, y así poder interpretar los parámetros de control de calidad para determinar si una mezcla asfáltica es adecuada y acorde al diseño original.

Específicos

1. Que el estudiante conozca los tipos de mezclas asfálticas y los usos adecuados para cada una de estas.
2. Brindarle al estudiante una herramienta práctica para diseñar concreto asfáltico, tomando en cuenta la proporción de cada material a utilizar, las condiciones de mezclado y el ensayo de control de calidad.
3. Darle a conocer al estudiante los ensayos realizados a cada material del concreto asfáltico.
4. Brindarle al estudiante una herramienta para poder calcular los parámetros y compararlos con los requerimientos para que pueda interpretar y analizar cada una de estas.

INTRODUCCIÓN

El concreto asfáltico en caliente es una mezcla empleada para la construcción de carreteras y accesos viales. El estudiante de la carrera de Ingeniería Civil debe tener conocimientos de los tipos de mezclas que se emplean en el país, su diseño, materiales, especificaciones y ensayos de control de calidad.

El siguiente trabajo se realizó con el fin de brindarle al estudiante un manual de laboratorio, para tener una base de conocimientos acerca del control de calidad de la mezcla asfáltica en caliente. Por medio de este se puede determinar si los materiales empleados en la mezcla del asfalto cumplen con los parámetros mínimos de diseño, como el porcentaje de asfalto presente en la mezcla, granulometría de los materiales pétreos, verificación de estabilidad y fluencia por medio de ensayos practicados en un laboratorio calificado.

El estudiante debe tener conocimientos de cada ensayo para determinar estos parámetros, también del equipo a utilizar para luego poder analizar los resultados obtenidos de los ensayos y compararlos con los requerimientos mínimos de diseño, de esta manera poder formarse un criterio de la calidad del concreto asfáltico en caliente y poder tomar decisiones para el uso respecto a este.

1. DIAGNÓSTICO DE LABORATORIO

1.1. Tipos de ensayos realizados para el control de calidad de mezclas asfálticas en caliente

Las mezclas asfálticas son una combinación de materiales pétreos y materiales bituminosos diseñados para ser utilizados en las carpetas de rodadura de pavimento flexible. Se ha desarrollado una serie de ensayos para poder determinar ciertas características de las mezclas, los cuales son:

- Extracción (porcentaje de asfalto)
- Granulometría de la mezcla
- Gravedad específica del concreto asfáltico compactado
- Gravedad específica del concreto asfáltico (Método Rice)
- Estabilidad Marshall
- Fluencia
- Determinación de vacíos en la mezcla
- Prueba de penetración
- Prueba de punto de ablandamiento
- Ensayo de Los Ángeles (abrasión)
- Peso unitario suelto
- Gravedad específica de los agregados
- Preparación de mezclas

1.2. Equipo necesario para la realización de ensayos

Para poder realizar los ensayos es necesario contar con equipos y herramientas normadas y calibradas, para que los resultados obtenidos sean más exactos y precisos. A continuación se enlistan los equipos para cada ensayo.

- Extractor centrífugo de asfalto
- Papel filtro
- Solvente
- Desairador por vibración
- Bomba de vacío
- Tamices
- Baño de María
- Hornos
- Máquina de estabilidad Marshall
- Indicador del flujo del asfalto con freno
- Cabezal de rotura para ensayo de estabilidad Marshall
- Pedestal de compactación
- Moldes de compactación para asfalto
- Martillo de compactación para asfalto
- Extractor de muestras de asfalto
- Termómetros
- Taras
- Espátulas
- Estufa
- Máquina tamizadora
- Cronómetro

- Balanzas
- Vernier
- Penetrómetro
- Recipiente de muestra para penetración
- *Aguja standard*
- Plato caliente (*hot plate*)
- Anillos y balines calibrados
- Máquina de abrasión Los Ángeles

1.3. Equipo disponible en el laboratorio para la realización de ensayos

El equipo con que cuenta el Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería en el Centro de Investigaciones de Ingeniería se detalla en el siguiente listado:

Tabla I. **Equipo de laboratorio existente**

Item	Cantidad	Descripción	OBSERVACIONES
1	1	Pedestal de martillo Marshall	COMPLETO
2	1	Martillo Marshall	COMPLETO
3	6	Moldes para probetas Marshall	COMPLETO
4	3	Bases para probetas Marshall	COMPLETO
5	2	Extractora de bitumen (centrifugadora)	UNA NECESITA REPARACIÓN
6	1	Penetrómetro para determinar viscosidad	FALTAN TARROS NORMADOS
7	1	Tamiz N° 20 para bitumen	COMPLETO
8	1	Marco Marshall	COMPLETO
9	1	Set para gravedad específica Rice	COMPLETO
10	1	Bomba de vacíos	NO FUNCIONA, NECESITA REPARACIÓN

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. USAC.

Tabla II. **Equipo de laboratorio nuevo**

Item	Cantidad	Descripción	OBSERVACIONES
1	1	Horno de película delgada	NECESITA COMPRESOR PARA FUNCIONAR
2	1	Viscosímetro	COMPLETO
3	1	Punto de ablandamiento	COMPLETO
4	1	Set para gravedad específica	COMPLETO
5	1	<i>Flash Point</i> por medio de la copa abierta <i>Cleveland</i>	COMPLETO
6	1	Mezcladora	COMPLETO
7	1	Destilación	COMPLETO
8	1	Set adaptador para determinación de fuerza a tensión	NECESITA COMPLEMENTO (ESTA EN LA COMPRA DE BCIE)
9	2	Termómetro infrarrojo	COMPLETO
10	5	Probeta de vidrio de 100 ml	COMPLETO
11	3	Probeta de vidrio de 500 ml	COMPLETO
12	3	Probeta de vidrio de 1000 ml	COMPLETO
13	3	<i>Beaker</i> de vidrio de 500 ml	COMPLETO
14	3	<i>Beaker</i> de vidrio de 100 ml	COMPLETO
15	1	Mordaza <i>Lottman</i> de 4"	COMPLETO
16	1	Mordaza <i>Lottman</i> de 6"	COMPLETO
17	1	Balanza de Precisión Semi-analítica	COMPLETO
18	1	Potenciómetro	COMPLETO
19	1	Dispositivo <i>Caliper</i> Proporcional (planas y alargadas)	COMPLETO
20	1	Penetrómetro de bolsillo	COMPLETO
21	2	Indicador desecante (repuesto, sulfato de calcio anhídrido)	COMPLETO

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. USAC.

1.4. Aplicación y ensayos propuestos

El estudiante de la carrera de Ingeniería Civil debe conocer e interactuar con los distintos tipos de materiales que componen la mezcla asfáltica, tal como su aplicación, ensayos y parámetros a cumplir para que la mezcla sea la más adecuada para el trabajo que se efectúa.

1.4.1. Directrices de los ensayos

Los ensayos para la mezcla de concreto asfáltico en caliente se rigen por normas nacionales e internacionales, las cuales velan los parámetros de las características físicas y mecánicas de cada uno de los materiales que constituyen dicha mezcla.

Para la realización de cada ensayo a los materiales que constituyen la mezcla, están regidos por los requisitos de las normas con referencia al tipo de ensayo a realizar, el equipo y maquinaria a utilizar, la cantidad de muestra, los datos de la muestra, los procesos a realizar, resultados de los ensayos. Verificarlos con las tablas y rangos de las normas, verificar si los materiales cumplen con los requisitos establecidos y de esta manera determinar la calidad de la mezcla asfáltica según su tipo y diseño.

1.4.2. Ensayos propuestos

De acuerdo al equipo necesario y el equipo disponible se pueden emplear los siguientes ensayos de control de calidad de mezcla asfáltica en caliente, tomando en cuenta el equipo con desperfectos y que son reparables según inventario del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

- Extracción (porcentaje de asfalto)
- Granulometría de la mezcla
- Gravedad específica del concreto asfáltico
- Gravedad específica del concreto asfáltico (Método Rice)
- Estabilidad Marshall
- Fluencia de la mezcla compactada
- Determinación de vacíos en la mezcla
- Prueba de penetración
- Prueba de punto de ablandamiento
- Preparación de mezclas

Con estos ensayos propuestos se puede determinar la calidad y verificar si la mezcla asfáltica cumple con los requerimientos de las normas establecidas.

2. GENERALIDADES DEL ASFALTO

2.1. Concreto asfáltico

Es el sistema de construcción asfáltica, que consiste en la elaboración en caliente de una mezcla de proporciones estrictamente controladas de materiales pétreos, polvo mineral, cemento asfáltico y aditivos. Se obtiene un producto de alta resistencia y duración, con características de calidad uniformes. Esta mezcla se puede tender y compactar de inmediato en la carretera, en una o en varias capas para proporcionar las características de resistencia y textura a las capas de soporte o de superficie.

2.2. Antecedentes

El término asfalto se deriva del vocablo acadio *asphatu* o *asphallo*, que significa dividirse, resquebrajarse. Posteriormente, fue adoptado por los griegos como adjetivo cuyo significado es estable, seguro y del verbo estabilizar o asegurar. Se supone que el primer uso del asfalto, en las civilizaciones antiguas, fue utilizado en forma de cemento, para asegurar o unir objetos. Del griego pasó al latín, después al francés (*asphalte*) y finalmente al inglés (*asphalt*)¹.

Desde la antigüedad hasta hoy en día, el asfalto ha sido utilizado como cemento para ligar, cubrir o impermeabilizar objetos. Es un material muy

¹ Herbert Abraham Asphalts and Allied Substance (New York, 1916) p.3

versátil, se puede decir que es el material de ingeniería más antiguo utilizado por el hombre².

A inicios del siglo XIX, el descubrimiento del asfalto refinado por medio de la destilación del petróleo crudo y el auge de la industria del automóvil, dio lugar al crecimiento del consumo de este material cementante. Su principal aplicación fue la de pavimentar carreteras, así como también otras aplicaciones.

2.3. Resumen histórico

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos y su historia comenzó hace miles de años. El asfalto se produce naturalmente en lagos de asfalto y en asfalto roca (una mezcla de arena, piedra caliza y asfalto). Los antiguos mesopotámicos lo utilizaban para impermeabilizar los baños y tanques de agua del templo. Los fenicios calafateaban las costuras de los buques mercantes con asfalto.

Prehistoria: se han encontrado esqueletos de animales prehistóricos conservados intactos hasta nuestros días en depósitos superficiales de asfalto en pozo La Brea, en Los Ángeles, California.

6000 a. C.: en Sumeria, se utilizaba en la industria de navegación. La torre de Babel es una de las tantas construcciones en donde se utilizó como mortero.

3200 – 2600 a. C.: utilizado por los egipcios para impermeabilizar.

2600 – 540 a. C.: excavaciones arqueológicas recientes indican el amplio uso del asfalto en Mesopotamia y el Valle del Indo como aglomerante para

² JPh. Pfeiffer. The properties of Asphaltic Bitumen (London, 1950) p.3

albañilería y construcción de carreteras y para capas de impermeabilización en estanques y depósitos de agua.

300 a. C.: se emplea ampliamente en Egipto para embalsamientos.

1802 d. C.: en Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.

1838 d. C.: en Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras.

1870 d. C.: construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga.

1876 d. C.: construcción del primer pavimento de tipo *sheet asphalt* en Washington D. C. con asfalto de lago importado.

1902 d. C.: en Estados Unidos se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 20 000 toneladas de asfalto al año.

A partir de 1924. El asfalto de petróleo producido anualmente en Estados Unidos ha crecido constantemente desde 3 millones de toneladas en 1924 a unos 9 millones de toneladas en 1946.

A partir de esta fecha, se ha más que duplicado, llegando a unos 19 millones de toneladas en 1 956.

2.4. Definición

El asfalto es un material aglomerante de color que varía de pardo oscuro a negro, los constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza, que se obtienen en la destilación del petróleo. El asfalto entra en proporciones variables en la constitución de la mayor parte de los crudos del petróleo.

Definición dada por la ASTM: asfaltos. Materiales aglomerantes sólidos o semisólidos de color que varía de negro a pardo oscuro y que se licúan gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo; o combinaciones de estos entre sí o con el petróleo producido derivados de estas combinaciones. (ASTM Standard D8).

2.5. Producción del asfalto

El crudo de petróleo es una mezcla de distintos hidrocarburos que incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos cuales son los componentes del asfalto. Para obtener este debe separarse entonces las distintas fracciones del crudo del petróleo por destilaciones que se realizan en las refinerías de petróleo:

Destilación primaria: es la operación a que se somete el crudo. Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375 grados Celsius. Los componentes livianos (nafta, *kerosene*, *gas oil*), hierven hasta esta temperatura y se transforman en vapor. La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionada. El líquido o residuo de destilación primaria se

junta todo el fondo de la columna y de ahí se bombea a otras unidades de la refinería.

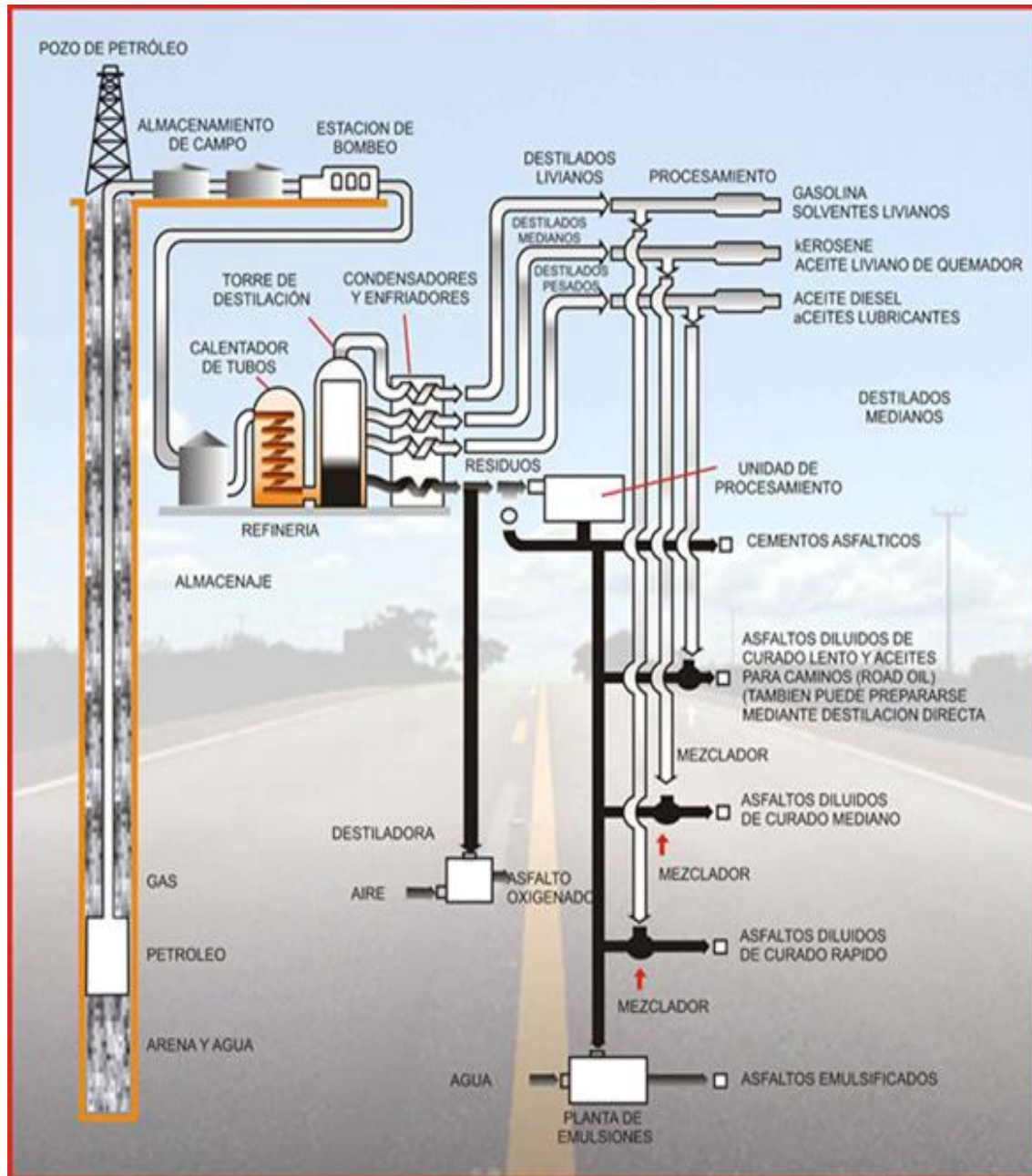
Destilación al vacío: para separar la destilación primaria, otra fracción libre de asfaltenos y la otra con el concentrado de ellos, se recurre comúnmente a la destilación al vacío. Difiere de la destilación primaria, en que mediante equipos especiales se baja la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionada, lográndose así que las fracciones pesadas hiervan a menor temperatura que aquella a la que hervían a la presión atmosférica.

El producto del fondo de la columna, es un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente, se denomina de vacío. De acuerdo a la cantidad de vacío que se practica en la columna de destilación, se obtendrá distintos cortes de asfaltos que ya se pueden ser utilizados como cementos asfálticos.

Desasfaltización con propano o butano: El residuo del vacío obtenido, contiene los asfaltenos dispersos en un aceite muy pesado, que a la baja presión (alto vacío) y alta temperatura de la columna de vacío no hierve sino que se destila.

Una forma de separar el aceite de los asfaltenos es disolver o extraer ese aceite en gas licuado de petróleo. El proceso se denomina desasfaltización y el aceite muy pesado obtenido, aceite desasfaltizado. Se utiliza como solvente propano o butano líquido, a presión alta y temperaturas relativamente moderadas (70 a 120 grados Celsius). El gas licuado extrae el aceite y que da un residuo semisólido llamado bitumen.

Figura 1. Gráfica de esquema de fabricación del asfalto



Fuente: http://asfaltos.petroperu.com.pe/diagrama_de_flujo.html. Consulta: 24 de febrero 2015.

2.6. Composición química del asfalto

Está constituido por tres grupos básicos: asfáltenos, resinas y aceites (aromáticos y saturados). Los asfaltos sometidos a temperaturas típicas de trabajo son un sistema disperso, ya que las partículas de la fase dispersa son las micelas en las cuales el núcleo o agregado es el asfáltenos.

En los asfáltenos se concentran todos los metales contenidos en el crudo: Ni, V, Fe, Co, Mn, en una proporción apreciable el oxígeno, el azufre y el nitrógeno. El 80 – 85 por ciento de los asfáltenos son átomos de carbono, la relación C:H se encuentra entre 0,8 y 0,87. Los asfáltenos son producto de la condensación de las resinas.

Tabla III. **Composición química del asfalto**

Elemento	Concentración (%)
Carbono	82-88%
Hidrógeno	8-11%
Azufre	0-6%
Oxígeno	0-1.5%
Nitrógeno	0-1%

Fuente: introducción a la química del asfalto, Ing. German Garzón, Costa Rica, 2004.

2.7. Propiedades físicas del asfalto de pavimentación

El asfalto es un material adhesivo y cohesivo, susceptible al cambio de temperatura que provoca su endurecimiento y oxidación provocando su envejecimiento.

Las propiedades de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos son:

2.7.1. Durabilidad

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto debido a que el comportamiento del pavimento es afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción y otras variables que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

2.7.2. Adhesión y cohesión

La adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para separarse a altas temperaturas y para adherirse al agregado después de enfriarse en la mezcla de pavimentación, aún en presencia de agua o al paso de vehículos.

Cohesión por otro lado, es la capacidad del asfalto de mantener firmes las partículas del agregado en el pavimento compactado y enfriado a temperatura ambiente.

2.7.3. Susceptibilidad a la temperatura

El asfalto es un material termoplástico, se vuelve más viscoso (duro), a medida que su temperatura disminuye y menos viscoso (blando), conforme su

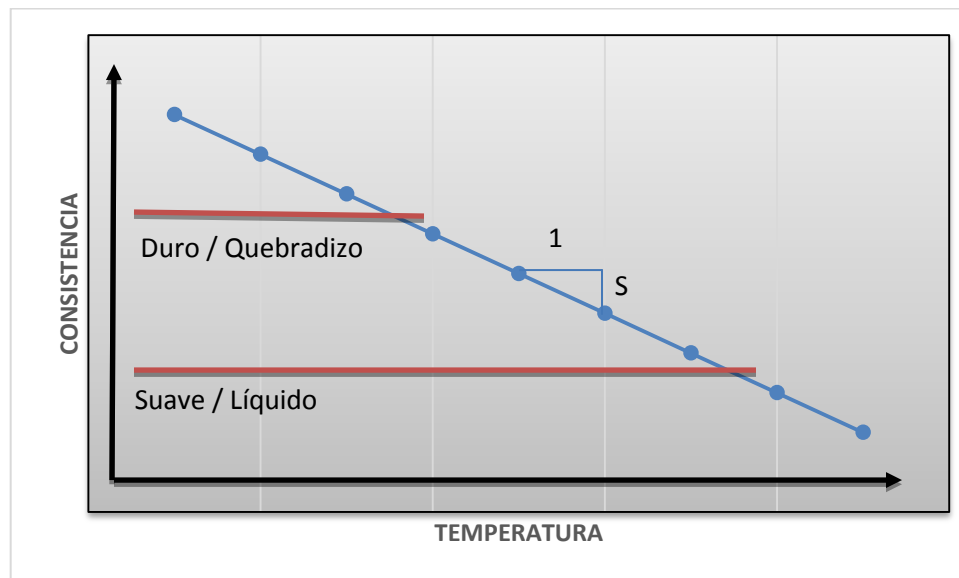
temperatura aumenta. Esta característica es conocida como susceptibilidad a la temperatura.

La susceptibilidad térmica varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aun si estos tienen el mismo grado de consistencia.

Su importancia radica en que el asfalto debe tener suficiente fluidez a temperaturas altas para que pueda cubrir las partículas del agregado durante el mezclado, y así permitir que estas se desplacen unas con respecto de otras durante la compactación.

Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperatura ambiente normal para mantener unidas las partículas del agregado.

Figura 2. **Consistencia del asfalto**



Fuente: elaboración propia.

La gráfica muestra como el asfalto cambia de consistencia conforme cambia de temperatura, a este cambio se le conoce como susceptibilidad térmica y es la pendiente de la recta (S).

2.7.4. Endurecimiento y envejecimiento

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas del agregado).

El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas, mientras está revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado, esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa.

No todos endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento y así ajustar las técnicas constructivas para minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene en el pavimento terminado, una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas del agregado.

2.7.5. Pureza

El cemento asfáltico está constituido en su mayor parte por bitumen, el cual es por definición un material totalmente soluble en bisulfuro de carbono. Aproximadamente el 99,5 por ciento de los asfaltos refinados son solubles en bisulfuro de carbono y si contienen impurezas estas son inertes.

Normalmente el cemento asfáltico carece de agua, ya que esta fue perdida durante el proceso de refinación. Cuando no pierde toda el agua se vuelve espumoso al ser calentado a temperaturas superiores a 100 grados Celsius (212 grados Fahrenheit). La pureza de un cemento asfáltico está definida por su carencia de humedad, así como de cualquier impureza.

2.8. Clasificación de los asfaltos de pavimentación

El uso de los tipos de asfaltos para pavimentación depende del uso o necesidad que se presente en el campo de trabajo. Existen asfaltos para producción de mezclas asfálticas, asfaltos líquidos para emulsiones y ligas entre otros, a continuación se detallan cada uno de estos.

2.8.1. Cementos asfálticos

El cemento asfáltico es un producto homogéneo y normalizado de color negro y consistencia sólida o semisólida a temperatura ambiente, compuesto por una mezcla de hidrocarburos obtenidos del proceso de destilación del petróleo. Para su utilización puede ser licuado mediante aplicación controlada de calor. Se designan por las letras AC seguidas por dos cifras que indican los límites de penetración de aguja en décimas de milímetro.

El cemento asfáltico, tal como su nombre lo indica, es un material cementante de gran versatilidad para su empleo en pavimentos debido a sus características, que se pueden resumir en las siguientes:

- Alta impermeabilidad, adherencia y cohesión, propiedades que le otorga la mezcla asfáltica que se obtiene al mezclarlos con áridos de variada procedencia.
- Posee consistencia y viscosidad controlada que permite la obtención de un pavimento estable a diferentes temperaturas, bajo la acción de distintas sollicitaciones de tránsito.
- Otorga a las mezclas con árido características de flexibilidad que permiten a la estructura del pavimento adaptarse a deformaciones graduales sin agrietarse.
- Proporciona a la mezclas con árido características resistentes ante la acción de cargas repetidas, otorgando el aporte estructural al pavimento.

De acuerdo a las diferentes aplicaciones del cemento asfáltico en pavimentos de carreteras, aeropuertos, calles, zonas de estacionamiento, pavimentos industriales, deportivos, carpetas de recubrimiento en obras hidráulicas y puentes, canales de riego y otros. Se tienen distintos tipos según sea su uso en mezclas, riego o tratamientos.

La utilización del cemento asfáltico en pavimentos se presenta en tres áreas: mezclas asfálticas en caliente, tratamientos asfálticos superficiales y sellos de fricción. En este caso se trata de dar énfasis en las mezclas asfálticas en caliente.

Los cementos asfálticos se dividen en tres diferentes sistemas, cada uno abarca diferentes grados con distintos rangos de consistencia.

2.8.1.1. Caracterización por penetración

Se aplica la Norma ASTM D-946 (Clasificación Estándar por Grado de Penetración para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación). Esta abarca los siguientes grados de penetración:

40 – 50
60 – 70
85 – 100
120 – 150

Para la realización de este método se deja penetrar una aguja dentro de una muestra de asfalto con una temperatura y una carga dada. La distancia que penetra la aguja en la muestra se muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetros (0,1 mm). Un grado 200 – 300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas de 200 a 300 décimas de milímetro. Esta es una indicación de que un asfalto es blando, un grado 40 – 50 indica que el asfalto es duro.

2.8.1.2. Caracterización por viscosidad

Se aplica la Norma ASTM D – 3381 (Clasificación Estándar por Grado de Viscosidad para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación) clasifica los asfaltos en base a su viscosidad absoluta a 60 grados Celsius. El poise (P) es la unidad normal de medida. Dependiendo de esta, los asfaltos se clasifican en:

- AC – 5 (500 ± 100): utilizado en la producción de emulsión asfáltica para riego de impregnación, riego de liga, en estabilizaciones y en mezclas asfálticas en caliente.
- AC – 10 (1 000 ± 200): utilizado en la producción de emulsión asfáltica para carpetas y morteros de mezcla en frío.
- AC – 20 (2 000 ± 400): utilizado en la producción de mezcla asfáltica en caliente, emulsiones asfálticas usadas en mortero y carpetas de mezclas en frío.
- AC – 30 (3 000 ± 600): utilizado en la producción de mezcla en caliente, emulsiones para carpetas y mezclas en frío.

2.8.1.3. Caracterización por comportamiento

Se aplica la Norma ASTM D – 6373 (Especificación Estándar por Grado de Comportamiento), propuesto por el programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), el cual fue elaborado por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos. Incluye el conocimiento de las temperaturas máximas y mínimas del pavimento en función de la temperatura del aire y la latitud geográfica. La ventaja de este sistema es que predice como se va a comportar el asfalto al envejecer. Se puede envejecer el asfalto a corto y a largo plazo, posteriormente se mide su viscosidad.

2.8.2. Asfaltos rebajados

Conocidos también como asfalto líquido. Es un material asfáltico cuya consistencia blanda o fluida hace que se salga del campo en el que

normalmente se aplica el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300. Son asfaltos líquidos los siguientes productos:

2.8.2.1. Asfalto fluidificado

Betún asfáltico que ha sido fluidificado mezclándolo con disolventes de petróleo, como por ejemplo los asfaltos líquidos tipo RC y MC. Al exponer estos productos a los agentes atmosféricos los disolventes se evaporan, dejando solamente el betún asfáltico en condiciones de cumplir su cometido.

2.8.2.2. Asfalto de curado rápido (RC)

Asfalto líquido compuesto de betún asfáltico y un disolvente de tipo nafta o gasolina, muy volátil. De esto se obtienen los asfaltos rebajados de curado rápido y se designan con las letras RC (*Rapid Curing*), seguidos por un número que indica el grado de viscosidad cinemática en *centi-strokes*.

2.8.2.3. Asfalto de curado medio (MC)

Asfalto líquido compuesto de betún asfáltico y un disolvente de tipo queroseno de volatilidad media, se designa con las letras MC (*Medium Curing*), seguidos con un número que indica el grado de viscosidad cinemática medida en *centi-strokes*.

2.8.2.4. Asfalto de curado lento (SC)

Asfalto líquido compuesto de betún asfáltico y aceites livianos relativamente poco volátiles, se designa por las letras SC (*Slow Curing*),

seguidos con un número que indica el grado de viscosidad cinemática medida en *centi-strokes*.

2.8.3. Asfalto emulsificado

Emulsión de betún asfáltico en agua que contiene pequeñas cantidades de agentes emulsificantes. Es un sistema heterogéneo que contiene dos fases normalmente inmiscibles (asfalto y agua), en el que el agua forma la fase continua de la emulsión y la fase discontinua está constituida por pequeños glóbulos de asfalto. Los asfaltos emulsificados pueden ser de tipo aniónico o catiónico, según el tipo de agente emulsificante empleado.

2.8.3.1. Emulsión aniónica

Los glóbulos de asfalto están cargados negativamente, presentando afinidad por los cuerpos con carga positiva. Los emulsionantes que permiten esta polaridad son generalmente oléalos o resíalos de sosa o de potasa, u otros jabones similares.

2.8.3.2. Emulsión catiónica

Los glóbulos de asfalto están cargados positivamente, presentando por tanto afinidad por los cuerpos de carga negativa. Los emulsionantes que las producen son sales cuaternarias de amonio como el bromuro de cetil irimetril amonio, el cual forma un anión de bromo y un catión que es el radical cetil trimetril amonio, cargado positivamente que rodea a las partículas de betún y se adhiere con gran facilidad a los áridos que presentan carga débil negativa.

3. AGREGADOS

3.1. Términos típicos

Es un material común, existen varios términos para describirlos. Estos términos descriptivos están basados sobre la procedencia, tamaño, forma, tipo uso y otras características.

- Agregado fino (arena): partículas de agregado, principalmente entre 4,75 milímetros (tamiz N° 4) y 75 micromilímetros (tamiz N° 200) en tamaño.
- Agregado ordinario (grava): partículas de agregado retenido por el tamiz N° 4, agregado ordinario con tamaño mayor a 4,75 milímetros.
- Grava triturada: material que ha sido puesto a través de una máquina trituradora para quebrar muchas de sus partículas redondeadas a tamaño pequeño para obtener superficies rugosas.
- Roca triturada: agregado procedente de la trituración de roca sólida, todas las partes son angulares, no redondeadas como la grava.
- Finos: material que pasa el tamiz N° 200.

3.2. Clasificación de los agregados

Los agregados para construcciones de carreteras se obtienen de rocas naturales las cuales se clasifican en:

- Ígneas
- Sedimentarias
- Metamórficas

3.2.1. Ígneas

Son rocas formadas por el enfriamiento de magma. Se clasifican según el tamaño de sus partículas, en gruesas (mayor de 2 milímetros), medianas (2 a 0,2 milímetros) o finas (menor de 0,2 milímetros). Según su composición en ácidas (más del 66 por ciento de sílice), básicas (55 a 66 por ciento de sílice). Las rocas ácidas se caracterizan por la presencia de cuarzo libre y peso específico inferior a 2,75. Las rocas básicas se caracterizan por la ausencia de cuarzo y su peso específico superior a 2,75.

3.2.2. Sedimentarias

Están formadas por el transporte de los materiales granulares insolubles, que resultan de la desintegración de las rocas previamente existentes o por los restos inorgánicos de los animales marinos, que se depositan en grandes cantidades en el fondo de los mares o raramente por la cristalización de minerales solubles en sus soluciones. Estas se clasifican según el mineral predominante en: calcáreas, silíceas o arcillosas.

3.2.3. Metamórficas

Las rocas metamórficas son rocas ígneas o sedimentarias que han sufrido un metamorfismo térmico, o sea que han estado sometidas a gran calor o rocas que han sufrido metamorfismo regional a casusa de estar sometidas a una gran

presión y calor, que han dado lugar a la formación de minerales y la aparición de texturas diferentes de la roca original.

3.3. Origen de los agregados

Agregado para pavimentos asfálticos son, generalmente, clasificados de acuerdo con sus orígenes o procedencia. Ellos incluyen agregados naturales, agregados procesados y agregados sintéticos o artificiales.

3.3.1. Agregados naturales

Son aquellos usados en forma natural, casi sin ningún procesamiento o tratamiento. Están constituidos por partículas producidas por la erosión natural y proceso de degradación, tal como la acción del viento, agua, movimiento de hielo. La forma de las partículas individuales es un largo resultado de los agentes actuantes sobre ellos.

Los dos mayores tipos de agregados naturales usado en la construcción de un pavimento son grava y arena. La grava tiene partículas de 6,35 milímetros o más largas en tamaño. La arena tiene partículas menores que 6,35 milímetros y retenidos por el tamiz N° 200. Las partículas que pasan el tamiz N° 200 o sea materiales con partículas menores de 0,075 milímetros son consideradas como *filler* o polvo mineral.

3.3.2. Agregados procesados

Son agregados que han sido triturados o molidos para determinado uso. Existen gravas naturales que son molidas para el uso adecuado en mezclas y

fragmentos de roca sólida que deben ser reducidas en tamaño antes de ser empleadas en una mezcla.

Estos materiales son molidos con el propósito de cambiar la textura de la superficie de las partículas, de suave a rugosas; para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular; para reducir y mejorar la distribución del tamaño de la partícula, así cumplir con una granulometría determinada. Es esencial asegurar que la operación de triturado sea continuo, monitoreado y supervisado para que los agregados cumplan con las especificaciones de graduación.

3.4. Producción, manipulación y muestreo de los agregados

Los agregados son materiales que conforman el esqueleto de la mezcla, por lo tanto su producción debe ser uniforme evitando su contaminación y alteración en sus propiedades físicas.

En la producción de los agregados para la mezcla asfáltica es necesario tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Clasificación de los agregados
- Limpieza
- Graduación

Es importante tomar en cuenta que en donde existe arena y grava se debe tener cuidado especial al ser removida la capa superficial o material contaminado, el cual puede ser suelo arrastrado por viento u otro material transportado, tener cuidado con la vegetación u otro material que pueda adversamente afectar el comportamiento de la mezcla del pavimento.

3.4.1. Manipuleo de los agregados

Todo grado de manipuleo conduce a variaciones de los materiales. Esto es debido a que al momento de manipular los agregados pueden formarse degradaciones o segregación que podrían alterar su graduación y de este modo afectar su uso.

Es importante tomar en cuenta que cuando se manipule el material, se debe hacer de forma uniforme y de este modo tratar de no perder su correcta distribución de tamaño de partículas, evitando el problema de degradación o segregación.

3.4.2. Muestreo de los agregados

Para poder tener un buen material se deben practicar los buenos procedimientos de producción, almacenamiento y manipuleo al momento del muestreo evitando así la segregación y alteración de la granulometría.

Las muestras de agregados deben tener el siguiente control:

- Asegurar que solo material satisfactorio es usado en la mezcla de pavimento.
- Proveer un registro permanente como evidencia que el material reúne las especificaciones de trabajo.

Se deben tener muestras representativas para que los materiales sean exactos y así poder determinar la calidad del agregado.

3.5. Propiedades de los agregados

En un pavimento de mezcla asfáltica en caliente de grado denso, el agregado constituye de un 92 a un 96 por ciento, según su tipo el peso total de la mezcla. Esto hace que la calidad del agregado sea un factor crítico del comportamiento del pavimento, además de la calidad de los agregados se debe tener consideración del costo y disponibilidad que son necesarios para la decisión sobre la selección de un buen agregado.

Para que un agregado cumpla con los requerimientos de calidad debe tener:

- Graduación y tamaño máximo de partícula
- Limpieza
- Rugosidad
- Forma de partícula
- Textura superficial
- Capacidad de absorción
- Afinidad para asfalto

3.5.1. Tamaño máximo de la partícula y graduación

Toda especificación de mezcla asfáltica en caliente debe estar dentro de cierto rango de tamaños y proporción. Esta distribución de varios tamaños de agregado es llamado la graduación del agregado o graduación de mezcla.

3.5.2. Gradación

Las fracciones de agregado deben ser dimensionales, graduadas y combinadas en proporciones dosificadas que resulten en una mezcla compuesta con una curva granulométrica continua, sin quiebres bruscos, situada dentro de los límites para el tamaño máximo nominal apropiado del agregado indicado en la siguiente tabla correspondiente a graduaciones densas.

Tabla IV. **Graduación de agregados para pavimento 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: tabla 401-1 *Especificaciones generales para construcción de puentes y carreteras* de la Dirección General de Caminos. Guatemala.

3.5.3. Limpieza

Entre los requisitos de los materiales para mezclas asfálticas, el agregado debe estar libre de materia vegetal, basura, terrones de arcilla o sustancias que puedan provocar fallas en el pavimento. La determinación de la limpieza del agregado debe ser monitoreada a menudo, por inspección visual y por un análisis de tamizado en limpio o lavado comparándolo con un análisis de tamizado en sucio y verificar el porcentaje de material dañino presente en la muestra.

3.5.4. Rugosidad

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la manipulación, colocado y compactado de la mezcla y durante la vida de servicio del pavimento bajo cargas de tránsito actual. Agregados que se encuentran en la superficie del pavimento o cerca de ella deben estar más duros que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto es debido a que las capas superiores absorben la presión directa de las cargas.

La prueba de abrasión en la máquina de Los Ángeles (AASHTO T-96) mide la resistencia de determinado agregado al desgaste. La máquina se muestra en la siguiente figura.

Figura 3. **Máquina de Los Ángeles**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

3.5.5. Forma de la partícula

La forma de la partícula influye en la trabajabilidad de la mezcla de pavimento durante el colocado, también como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. Durante la vida del pavimento, las formas de las partículas también tienen influencia hacia la fuerza de la estructura del pavimento.

Partículas con irregularidades angulares tienden a compactarse mejor, usualmente estas resisten desplazamiento en el pavimento final. Mejor adherencia es generalmente obtenida con formas de esquinas y partículas de forma cúbica que son obtenidas por trituración de rocas. Casi siempre, las partículas redondas son usadas exitosamente en mezclas asfálticas de grado denso, teniendo cuidado en su colocación y compactación.

Muchas mezclas de pavimento contienen ambas, partículas angulares y redondeadas. Las partículas del agregado ordinario (largo) son usualmente piedra triturada o grava triturada que da fuerza al pavimento. Las partículas finas del agregado son usualmente, una arena natural la cual a la mezcla la trabajabilidad necesaria.

3.5.6. Textura de la superficie

La textura de las partículas de agregados es un factor que determina no solo la trabajabilidad y fuerza de una mezcla sino también, las características de resistencia al deslizamiento de la superficie pavimentada.

3.5.7. Capacidad de absorción

Todos los agregados son porosos, algunas más que otros. Para determinar la porosidad un agregado, se satura de agua y se determina la cantidad de líquido que es capaz de absorber.

La capacidad de un agregado para absorber agua o asfalto es una información sumamente importante ya que con esto se determina el asfalto efectivo en la mezcla. Si un agregado es altamente absorbente, continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando menos asfalto sobre la superficie para ligar y tener una buena adherencia entre los otros agregados. Debido a esto, un agregado poroso requiere significativamente más asfalto para hacer una mezcla más apropiada que lo haría un agregado menos poroso.

3.5.8. Afinidad para el asfalto

Una afinidad del agregado para asfalto es su tendencia a aceptar y retener una capa de asfalto. Las piedras que tienen alta afinidad con el asfalto son llamadas hidrofobias (repelen el agua), ellas resisten a los esfuerzos del agua para despojar el asfalto de ellas.

Agregados hidrofílicos son aquellos que se disuelven y son atraídos por el agua, tienen baja afinidad para el asfalto. Consecuentemente, ellos tienden a separarse de películas de asfalto cuando se exponen al agua. Agregados de silíceo: cuarzo y otros granos son ejemplos de agregados que son dispuestos a despojo y deben ser usados, cuidadosamente.

4. ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD

4.1. Ensayo de extracción de asfalto en la mezcla (ASTM D 2172)

Con este método se determina el porcentaje de material bituminoso contenido en una mezcla asfáltica en caliente, empleando un extractor centrífugo y utilizando como solvente gasolina. Los agregados obtenidos mediante este método se pueden utilizar para el ensayo de granulometría.

4.1.1. Maquinaria y equipo

Para la realización de este ensayo es necesario contar con equipo y herramientas calibradas y adecuadas para evitar derrames y fugas de materiales con los solventes a utilizar, y también controlar su inflamabilidad.

A continuación se detalla el equipo a utilizar en el ensayo:

- Extractor centrífugo con capacidad de 1 500 gramos
- Anillos de papel filtro
- Estufa eléctrica
- Partidor de muestras
- Solvente (gasolina súper)
- Balanza sensible a 0,1 gramos de 2 610 gramos de capacidad
- Termómetro (-50 a +200 grados Celsius)
- Espátulas
- Brochas
- Taras (recipiente metálico)

4.1.2. Procedimiento

El ensayo de extracción se debe hacer con el mayor cuidado posible, ya que se debe evitar el derrame de material al momento de limpiar el extractor centrífugo y los filtros de papel. La pérdida de material en estos procesos puede alterar el resultado.

A continuación se detallan los pasos a seguir en el procedimiento del ensayo:

- Se toma una muestra de mezcla asfáltica y luego se fracciona en cuatro partes iguales para tener una buena distribución de tamaño de los agregados y así evitar la segregación al momento de realizar el ensayo de granulometría.
- Se pesan 800 ± 50 gramos netos de la muestra para su extracción.
- Se pesan los anillos del papel filtro totalmente seco antes de la extracción.
- Se procede a colocar la muestra en el extractor luego se satura de solvente (gasolina súper) y se colocan en este caso 2 anillos de papel filtro entre el plato del extractor y la tapa.
- Se procede al lavado de la mezcla realizando una serie de lavadas, dependiendo hasta que la gasolina saliente del extractor salga con su color ámbar, indicando que el bitumen fue extraído de la mezcla quedando solamente los agregados.

- Después de la extracción se procede a secar el material sobre una estufa eléctrica velando su peso hasta que quede constante.
- Por medio de diferencia de pesos se calcula el porcentaje de asfalto presente en la mezcla.

En las siguientes imágenes se muestran los procesos del ensayo.

Figura 4. **Fraccionamiento de la mezcla**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 5. **Colocación de muestra y filtro**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 6. **Extracción de asfalto (centrífuga)**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 7. **Mezcla sin asfalto**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

4.1.3. **Cálculos**

El cálculo del porcentaje de asfalto presente en la mezcla se realiza por diferencia entre el peso neto de la mezcla y peso neto de la mezcla seca sin asfalto, dividido entre el peso neto de la mezcla y el resultado es multiplicado por cien.

Para el cálculo del porcentaje de asfalto presente en la mezcla se tienen los siguientes datos:

- Fecha de producción y procedencia
- Tipo de mezcla y porcentaje de asfalto de diseño
- PB = peso bruto de la muestra de mezcla
- Tara = recipiente utilizado para contener la muestra

- PN = peso neto de la mezcla (PB – TARA)
- Pa = peso de papel filtro antes de la extracción
- Pd = peso del papel filtro después de la extracción
- PBE = peso bruto de material de la mezcla seco sin asfalto
- Pne = peso neto de material de la mezcla seco sin asfalto

Para determinar el contenido asfáltico:

$$Pne = (PBE + Pd) - (Tara + Pa)$$

$$\% \text{ asfalto} = \frac{PN - Pne}{PN} * 100$$

4.1.4. Ejemplo práctico

Para la realización de este ensayo se debe contar con la información necesaria de la mezcla y de este modo poder proceder a determinar su porcentaje de contenido asfáltico. Los datos necesarios son el tipo de mezcla y el porcentaje de asfalto de diseño, a partir de esto comparar si la mezcla cumple con el parámetro de diseño.

A continuación se muestran los datos del ejemplo:

Fecha: 16 de julio de 2014

Procedencia: Planta ASTEC PADEGUA

Tipo de mezcla: E (12,5 mm) ½”

Porcentaje de asfalto de diseño: 5,10%

Pb = 801,5 g

Tara = 107,6 g

$$PN = 693,9 \text{ g}$$

$$Pa = 5,8 \text{ g}$$

$$Pd = 6,8 \text{ g}$$

$$PBE = 764,9 \text{ g}$$

$$Pne = (764,9 + 6,8) - (107,6 + 5,8) = 658,3 \text{ g}$$

$$\% \text{ asfalto} = \frac{693,9 - 658,3}{693,9} * 100 = 5,13 \%$$

4.1.5. Reportar

Se reporta el tipo de mezcla ensayada, los pesos netos de la mezcla con asfalto, el peso neto seco sin asfalto y la cantidad de asfalto contenido en la mezcla, en porcentaje y su diferencia en base al porcentaje óptimo de diseño con una tolerancia de $\pm 0,3$ por ciento.

% asfalto óptimo de diseño: 5,10%

% asfalto extraído: 5,13%

Diferencia: 0,03%

4.1.6. Análisis de resultados

De los resultados obtenidos del ensayo de extracción el porcentaje de asfalto presente en la mezcla producida en planta es 0,03 por ciento mayor al porcentaje óptimo de diseño. La diferencia se encuentra dentro del rango de tolerancia, por lo tanto la mezcla cumple con las especificaciones de diseño.

4.1.7. Conclusión

Las condiciones de diseño en laboratorio son controladas para el asfalto y los agregados ya que se producen a pequeña escala. Hacen que los resultados difieran con la producción de planta ya que en planta, los agregados están expuestos a la intemperie y la producción sean a gran escala, lo que modifica los resultados respecto a los del diseño.

4.1.8. Recomendaciones

Para que el ensayo de extracción sea preciso y exacto se debe tener el mayor cuidado al momento de realizar cada uno de los procedimientos establecidos y garantizar los resultados obtenidos durante el ensayo. A continuación se muestran las recomendaciones a seguir en el ensayo.

- Para realizar un buen ensayo de extracción se recomienda fraccionar adecuadamente en cuatro partes iguales la mezcla y así tener una buena distribución de los agregados que influyen en la extracción.
- Al momento de realizar la extracción tener cuidado en ajustar bien la tapa del extractor y los filtros para que los agregados finos no se escapen provocando el aumento erróneo del porcentaje de asfalto.
- Realizar las lavadas necesarias hasta que el material quede sin asfalto.
- Evaporar adecuadamente el solvente hasta que el peso de la muestra se mantenga constante.
- Ser precisos en los pesos de la mezcla y el material sin asfalto.

4.2. Ensayo de granulometría de los agregados sin asfalto (AASHTO T-11, T-27)

Con este método se calcula el tamaño de las partículas de los agregados y se controla si se encuentra dentro de los límites permitidos, según la especificación mediante su paso por una serie de mallas con abertura determinada.

4.2.1. Maquinaria y equipo

El equipo para la ejecución de esta prueba debe estar en óptimas condiciones de operación, calibrado y limpio, ya que dependiendo del tipo de materiales a ensayar es necesario que el equipo cuente con todas sus partes.

- Tamices N°:
 - tapa
 - 1"
 - 3/4"
 - 1/2"
 - 3/8"
 - N° 4
 - N° 8
 - N° 50
 - N° 200
 - fondo
- Tamizadora
- Balanza con precisión de 0,1 gramos de 2 610 gramos de capacidad
- Taras
- Cepillo con cerdas metálicas

- Brochas
- Horno
- Estufa eléctrica
- Cronómetro

4.2.2. Procedimiento

Previo a la realización del ensayo se debe contar con la información del tipo de material a tamizar para poder armar la serie de tamices. Para el armado de la serie de tamices se debe hacer en el orden según el tipo de mezcla ensayado.

A continuación se detalla el procedimiento del ensayo:

- Del material sin asfalto se procede a lavarlo y pasarlo por el tamiz N° 200 para que los finos del material no se pierdan.
- Después del lavado se procede a secarlo en horno o estufa eléctrica hasta que ya no tenga humedad.
- Después de secado se deja enfriar el material a temperatura ambiente.
- Se arma la serie de tamices de la siguiente manera:
 - Tapa
 - 3/4"
 - 1/2"
 - N° 4
 - N° 8
 - N° 50

- N° 200
- Fondo

- Se coloca el material en la serie de tamices y luego se coloca en la tamizadora y se deja tamizar por 12 minutos.

- Pasado los 12 minutos se procede a calcular los pesos retenidos en cada tamiz.

A continuación se muestran las imágenes del proceso de este ensayo.

Figura 8. **Lavado de material sin asfalto**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 9. **Agregado seco para tamizado**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 10. **Tamizado de agregados**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

4.2.3. Cálculos

El análisis granulométrico del material utilizado en mezclas asfálticas en caliente es calculado mediante el porcentaje pasante en cada malla de los tamices armados que van desde tamaños gruesos, hasta llegar a los más finos que son los pasantes en la malla N° 200.

Para el cálculo de la graduación granulométrica es necesario contar con los siguientes datos.

Pb = peso bruto de material de la mezcla sin asfalto sin lavar

Pne = peso neto de material de la mezcla sin asfalto (pb – Tara)

PBR = peso bruto retenido acumulado de material lavado en cada tamiz

PNR = peso neto retenido individual en cada tamiz

% Ret. = porcentaje de peso retenido

% Ret. ac. = porcentaje de peso retenido acumulado

% PASA = porcentaje de material pasante en cada tamiz

Ecuaciones para determinar la graduación granulométrica.

$$\text{PNR}(\text{para el primer tamiz}) = (\text{PBR} - \text{Tara})$$

$$\text{PNR}(\text{para los siguientes tamices}) = \text{PBR}_{n-1}$$

$$\% \text{ Ret.} = \frac{\text{PNR}}{\text{Pne}} * 100$$

$$\% \text{ Ret. ac.} = \% \text{ Ret}_{n+1}$$

$$\% \text{ PASA} = 100 - \% \text{ Ret. ac.}$$

4.2.4. Ejemplo práctico

Para efectuar el ensayo es necesario contar con la información del tipo de mezcla ensayado en la extracción o el tipo de material a tamizar. Luego se arma la serie de tamices según sea su especificación respetando los límites establecidos.

De los datos del ensayo de extracción:

$$P_b = 765,9 \text{ g}$$

$$Tara = 107,6 \text{ g}$$

$$P_{ne} = 658,3 \text{ g}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los pesos retenidos obtenidos en cada tamiz, como también el cálculo porcentajes de retenidos y pasantes.

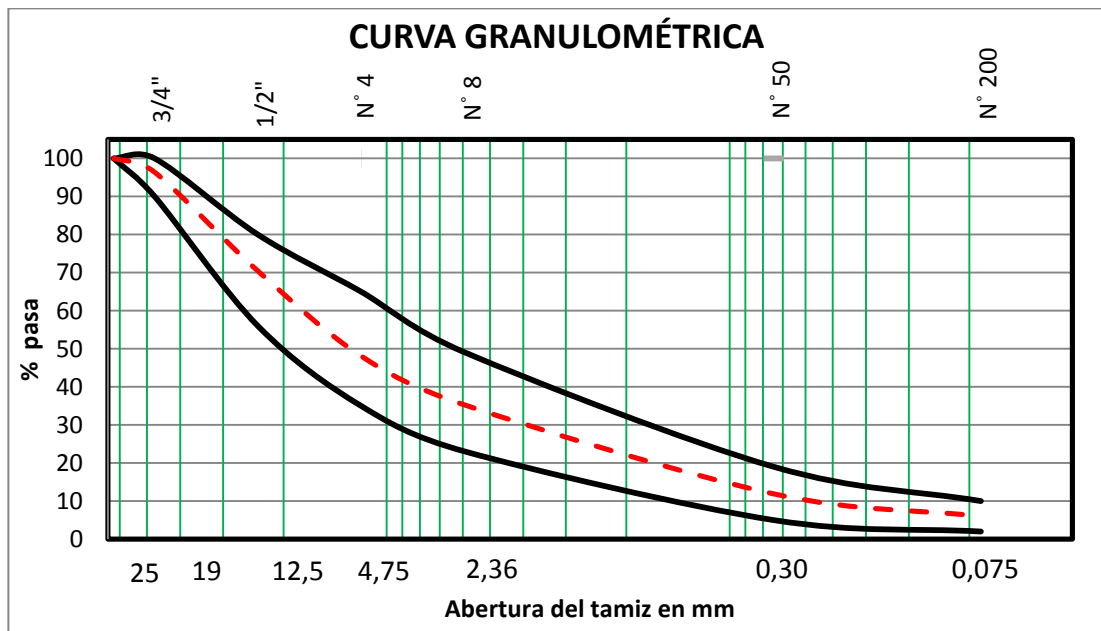
Tabla V. **Graduación granulométrica mezcla tipo E**

TAMIZ	PBR	PNR	% RET.	% RET. AC.	% PASA	ESPECIFICACIÓN	
3/4"	107,7	0	0	0	100	100	100
1/2"	133,5	25,9	3,93	3,93	96,07	90	100
4	370,2	236,7	35,96	39,89	60,11	44	74
8	483,4	113,2	17,2	57,09	42,91	28	58
50	668,2	184,8	28,07	85,16	14,84	5	21
200	722,2	54,00	8,2	93,36	6,64	2	10

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente figura se muestra la gráfica granulométrica mostrando la curva de resultado de la graduación obtenida y los límites especificados.

Figura 11. **Curva de graduación granulométrica obtenida**



Fuente: elaboración propia.

4.2.5. Reportar

De este ensayo se calculan y se reportan los porcentajes de la masa pasante en cada malla del tamiz, según sea el tipo de mezcla ensayada tomando el dato desde el agregado grueso hasta el agregado pasante en el tamiz N° 200.

4.2.6. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos de la granulometría se encuentran dentro de los límites especificados los cuales hacen que la mezcla tenga una buena apariencia granulométrica uniforme. Si los resultados se encuentran fuera de los límites la mezcla puede quedar con partículas demasiado gruesas o muy finas.

4.2.7. Conclusiones

Dependiendo del tipo de mezcla o material ensayado, ya que la granulometría representa un parámetro de mucha importancia en las mezclas asfálticas en caliente. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Si una mezcla es muy fina o gruesa puede ser debido a la segregación al momento del muestreo en planta.
- La mezcla puede alterarse cuando no se hace un buen fraccionamiento de los agregados y esto afecta la distribución de las partículas de los agregados.

4.2.8. Recomendaciones

Es de mucha importancia tomar en cuenta las siguientes recomendaciones al momento de realizar cada proceso del ensayo de forma precisa y exacta, considerando las normas de ensayos establecidos. Es importante tomar en cuenta que el ensayo debe ser realizado con material lavado y libre de humedad para que los resultados sean más precisos.

- Para tener una granulometría ideal es necesario hacer un buen fraccionamiento de la mezcla antes de su ensayo.
- Al momento de lavado se debe tener cuidado de no perder ninguna partícula que no pase del tamiz N° 200.
- Se deben limpiar y pesar exactamente el material retenido en cada tamiz.
- Controlar y cumplir con el tiempo de tamizado para obtener resultados más precisos.

4.3. Gravedad específica del concreto asfáltico compactado (AASHTO T 166-05)

Parte importante del diseño de mezclas es la determinación de la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, este método es útil en la determinación de vacíos en la mezcla. Esta prueba se realiza mediante la metodología del diseño Marshall.

4.3.1. Maquinaria y equipo

Para la realización de este ensayo es necesario contar con el equipo adecuado, calibrado y en óptimas condiciones de uso. A continuación se detalla la maquinaria y equipo idóneo para la realización del ensayo.

- Balanza electrónica
- Pedestal de compactación
- Moldes de compactación para asfalto
- Mazo de compactación para asfalto

- Extractor de briquetas (gato hidráulico)
- Tanque con agua
- Termómetro (-50 a +200 grados Celsius)
- Vernier

4.3.2. Procedimiento

Los procedimientos para la ejecución de este ensayo, mostrados son una guía de cómo realizar de manera adecuada cada uno de los procesos de la prueba en forma ordenada, recomendando las cantidades y parámetros necesarios para su efecto.

- De la muestra tomada en planta se pesan dos muestras con 1 270 gramos cada uno y se colocan en los moldes cilíndricos para su compactación.
- Se toma la temperatura de la mezcla la cual no tiene que ser menor a 270 grados Fahrenheit ni mayor a 290 grados Fahrenheit para su compactación.
- Cuando tenga una temperatura en el rango indicado se procede a apisonar la mezcla con una espátula 25 veces y después se compacta con el mazo con 75 golpes cada lado de la briqueta.
- Después de la compactación se almacena el molde con la briqueta en un lugar seco a temperatura ambiente para su posterior ensayo.

- Pasado 24 horas se desencofra la briqueta del molde con el gato hidráulico y se mide su espesor con un vernier tomando 3 medidas y luego se saca el promedio de ellas.
- Se pesa cada briqueta (peso al aire).
- Después se pesa en agua dentro del tanque (peso en agua).
- Luego se seca la briqueta superficialmente y luego se pesa (peso seco saturado).
- Se calcula su densidad por medio del Principio de Arquímedes (volumen por desplazamiento de agua).
- Se toma la temperatura del agua para la corrección de la gravedad específica.

A continuación se muestran las imágenes del proceso de este ensayo.

Figura 12. **Compactación de briquetas Marshall**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 13. **Extracción de briquetas**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 14. **Peso de briquetas seco saturadas**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 15. **Peso briquetas en agua**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

4.3.3. Cálculos

Para determinar la gravedad específica de la mezcla compactada se divide el peso en el aire de la briqueta en estado seco y dividido por el producto del volumen y su factor de corrección. A continuación se muestran los datos necesarios y la ecuación para el cálculo de estos resultados.

Datos:

W_s = peso en el aire de la muestra en estado seco en gramos

$W_{agua\ sss}$ = peso en agua de la muestra en estado saturado superficialmente seco en gramos

$W_{aire\ sss}$ = peso en el aire de la muestra en estado saturado superficialmente seco en gramos

S_{ss} = saturado superficialmente seco

G_{mb} = gravedad específica de la mezcla compactada (briquetas) en gramos sobre centímetros cúbicos

$F_{temp\ k}$ = factor de corrección por temperatura del agua

Volumen = ($W_{aire\ sss} - W_{agua\ sss}$) en centímetros cúbicos

$$G_{mb} = \frac{W_s}{(W_{aire\ sss} - W_{agua\ sss}) * F_{temp}}$$

4.3.4. Ejemplo práctico

El desarrollo de este ensayo comienza al momento de la compactación y extracción hasta el cálculo del peso de cada briqueta. A continuación se muestran los datos obtenidos de cada briqueta y su factor de corrección debido a la temperatura del agua al momento del cálculo de pesos.

Datos:

Tabla VI. **Datos de pesos y volumen de briquetas Marshall**

BRIQUETA	1	2	3
% asfalto	5,13	5,13	5,13
Ws	1273	1270	1270
Wagua sss	742	743	742
Waire sss	1 275	1 272	1 272
Ftemp K 24°C	1,000253	1,000253	1,000253
Volumen	533	529	530

Fuente: elaboración propia.

Calculando la gravedad específica de la mezcla compactada:

Briqueta 1:

$$G_{mb} = \frac{1273}{(1275 - 743) * 1,000253} = 2,3923$$

Briqueta 2:

$$G_{mb} = \frac{1270}{(1272 - 742) * 1,000253} = 2,3956$$

Briqueta 3:

$$G_{mb} = \frac{1270}{(1272 - 742) * 1,000253} = 2,3956$$

Los factores de corrección de temperatura se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Factores de corrección por temperatura**

Temperatura, (°C)	Densidad absoluta del agua	Factor de Corrección K
10	0.999728	1.002661
11	0.999634	1.002567
12	0.999526	1.002458
13	0.999406	1.002338
14	0.999273	1.002204
15	0.999129	1.002060
16	0.998972	1.001903
17	0.998804	1.001734
18	0.998625	1.001555
19	0.998435	1.001364
20	0.998234	1.001162
21	0.998022	1.000950
22	0.997801	1.000728
23	0.997569	1.000495
24	0.997327	1.000253
25	0.997075	1.000000
26	0.996814	0.999738
27	0.996544	0.999467
28	0.996264	0.999187
29	0.995976	0.998898
30	0.995678	0.998599

Fuente: tabla 1. I.N.V. E – 733 – 07.

4.3.5. Reportar

Al finalizar el ensayo de determinación de gravedad específica de la mezcla compactada, se reporta el resultado del promedio de la gravedad específica de las tres briquetas y el porcentaje de contenido asfáltico de diseño.

Tabla VIII. **Resultados de gravedad específica de mezcla compactada**

BRIQUETA	Gmb	% AC
1	2,3923	5,1
2	2,3956	5,1
3	2,3956	5,1
PROMEDIO	2,3945	5,1

Fuente: elaboración propia.

4.3.6. Análisis de resultados

Del resultado obtenido se debe comprobar la diferencia con el resultado de diseño, ya que la gravedad específica de la mezcla compactada puede afectar en el porcentaje de vacíos en la mezcla. En este caso de prueba se puede determinar que la gravedad específica de la mezcla compactada cumple. De lo contrario si la diferencia entre el resultado de este ensayo varía demasiado con el resultado de diseño se debe verificar la compactación y temperatura de la mezcla, ya que estos factores son determinantes en los resultados.

4.3.7. Conclusiones

Las conclusiones que a continuación se muestran resaltan que la gravedad específica de la mezcla compactada depende esencialmente de la temperatura y de la buena práctica de compactación de cada briqueta.

- Por medio de este ensayo se determina la densidad de compactación que tiene la mezcla asfáltica relacionando su peso con su volumen.
- A mayor temperatura de compactación mayor será la gravedad específica de la mezcla compactada, debido a que su peso se mantiene constante pero el volumen se reduce al evacuar los vacíos de aire.
- Se debe compactar a temperatura establecida para que los resultados no varíen y no se vean alterados con respecto al diseño.

4.3.8. Recomendaciones

Al momento de efectuar el ensayo se debe tomar en consideración las recomendaciones que a continuación se muestran, a modo de no tener complicaciones durante el ensayo y sin que los resultados se vean alterados.

- Al momento de realizar la compactación es recomendable lubricar los moldes de las briquetas cilíndricas de manera que al momento de desencostrar no sea difícil.
- Se recomienda compactar la mezcla a temperatura especificada ya que si se compacta con alta o baja temperatura puede alterar el resultado y el ensayo deberá repetirse.
- Se recomienda emplear un sistema adecuado al momento de tomar los pesos de las briquetas tanto al aire como en agua para tener datos más precisos.

4.4. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall (AASHTO T-245, ASTM D -6927)

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla y la fluencia mide la deformación. El valor de estabilidad Marshall es una medida de carga bajo la cual el espécimen cede totalmente o falla.

4.4.1. Maquinaria y equipo

Para este ensayo es necesario contar con el equipo completo y el anillo de la máquina Marshall, debe estar debidamente calibrada para que la lectura del dial de carga sea traducida correctamente en la estabilidad de la briqueta compactada.

- Máquina de compresión Marshall
- Sujetador de briquetas
- Dial medidor de flujo
- Baño de María
- Cronómetro

4.4.2. Procedimiento

Para la realización del ensayo de deben seguir los siguientes pasos que van desde la toma de medidas de espesores de las briquetas hasta el cálculo del valor de la estabilidad y el valor de la fluencia.

- Del ensayo de la gravedad específica se toma el dato del espesor de las briquetas ensayadas.
- Se sumergen las briquetas en baño de María a una temperatura de 140 grados Fahrenheit por un período de 35 minutos.
- Pasado los 35 minutos se procede a ensayar las briquetas en la máquina Marshall colocando una briqueta a la vez en el sujetador para ser sometidas a compresión.

- Se toma la lectura del dial de medición de carga como también la de medición de flujo.
- Después de ensayar las briquetas se procede al cálculo de la estabilidad de la mezcla.

A continuación se muestran las imágenes del proceso de este ensayo.

Figura 16. **Briquetas en baño de María**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 17. **Colocación de briquetas a la máquina Marshall**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 18. **Lectura de dial de carga y de flujo**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

4.4.3. Cálculos

Para el cálculo del valor de la estabilidad Marshall y el valor de fluencia de las briquetas se harán a partir de las lecturas del dial de carga, el cual es introducido en la ecuación de estabilidad que se muestra a continuación.

Datos:

Ldc = lectura del dial de carga

Ldf = lectura del dial indicador de fluencia en 0,01 de pulgada.

Fvol = factor de corrección por volumen de la biqueta

Ecuación de estabilidad según la calibración de la máquina Marshall.

$$\text{Estabilidad} = (\text{Ldc} * 7,4736 + 11,1604) * \text{Fvol}.$$

4.4.4. Ejemplo práctico

Para efectos prácticos se toman 3 briquetas para su ensayo, al cual se le toman los datos de espesor y volumen previo a ser sometidos a la máquina Marshall para determinar su estabilidad bajo una carga aplicada, tomando en cuenta las correcciones de volumen que afectan directamente la estabilidad de las briquetas. En la siguiente tabla se muestran los datos del ejemplo práctico.

Tabla IX. **Datos y lecturas de estabilidad y fluencia Marshall**

Briqueta	1	2	3
Ldc	385	376	380
ESPESOR (h)	68	67,5	67,7
Fvol.	0,96	0,96	0,96
FLOW (Ldf) 0,01"	13	12	13
Volumen	533	529	530

Fuente: elaboración propia.

Calculando la estabilidad de cada briqueta:

Briqueta 1:

$$\text{Estabilidad} = (385 * 7,4736 + 11,1604) * 0,96 = 2\ 773 \text{ lbs}$$

Briqueta 2:

$$\text{Estabilidad} = (376 * 7,4736 + 11,1604) * 0,96 = 2\ 708 \text{ lbs}$$

Briqueta 3:

$$\text{Estabilidad} = (380 * 7,4736 + 11,1604) * 0,96 = 2\ 737 \text{ lbs}$$

Promedio de estabilidad de las tres briquetas: 2 739 lbs

Promedio de fluencia de las tres briquetas: 13

Relación estabilidad/fluencia: 211

Tomando como factor de corrección por volumen, se toma el rango de los volúmenes de las briquetas, que van desde 529 a 533 centímetros cúbicos los

cuales se encuentran dentro del rango de 523 a 535 centímetros cúbicos de la tabla de corrección, dichos factores se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla X. Factores de corrección de estabilidad

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

Fuente: tabla 5.6, Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica.

4.4.5. Reportar

De los resultados se reporta el promedio del valor de la estabilidad de las tres briquetas ensayadas de la misma muestra, como también el promedio de la fluencia de dichas briquetas.

4.4.6. Análisis de resultados

Con los promedios de estos valores los resultados del ensayo cumplen con las especificaciones ya que la estabilidad debe ser mayor a 1 200 libras y la fluencia se debe encontrar entre 120 y 275, por lo tanto los resultados cumplen con la especificación.

4.4.7. Conclusiones

El valor de la estabilidad y de la fluencia es un indicador en el diseño que determina si la mezcla es rígida o muy blanda, como también indica si una mezcla contiene un alto o un bajo porcentaje de asfalto.

- Si la mezcla presenta una alta resistencia a la carga y una baja fluencia se dice que la mezcla es muy rígida, o de lo contrario si la mezcla tiene una baja capacidad de carga se dice que la mezcla es muy flexible y presenta una fluencia alta.
- Los resultados de la estabilidad y la fluencia son debido a la dosificación de asfalto en la mezcla. A más contenido asfáltico en la mezcla mayor fluencia presentará.

4.4.8. Recomendaciones

Durante el proceso de este ensayo es importante tomar en cuenta las siguientes recomendaciones, ya que el ensayo se debe realizar de una forma adecuada y correcta para que los resultados sean precisos.

- Al momento de realizar el ensayo se debe controlar de forma continua el tiempo en el que las briquetas son sumergidas en el baño de María a temperatura constante, ya que la variación de estos factores pueden afectar los resultados del ensayo.
- Lubricar los sujetadores antes de colocar las briquetas en su base para que éstas no se adhieran al momento de terminar el ensayo.
- Tomar las lecturas de forma simultánea tanto de estabilidad como de fluencia para que los resultados sean más precisos.

4.5. Determinación de porcentaje de vacíos en la mezcla (AASHTO T-269)

Los vacíos son un parámetro importante en el diseño de mezcla asfáltica por el Método Marshall, el cual determina el porcentaje de contenido asfáltico presente en la mezcla y el contenido de material mineral.

Vacíos de aire (VA): los vacíos son pequeñas bolsas de aire que se localizan entre las partículas del agregado revestidas de asfalto y puede ser calculado a partir del peso específico de los componentes de la mezcla asfáltica. La cantidad de vacíos en la mezcla es inversamente proporcional a la

demanda de asfalto en la mezcla, entre más cantidad de asfalto tenga la mezcla, la cantidad de vacíos disminuye y viceversa.

Vacíos de agregado mineral (VAM): los vacíos en el agregado mineral (VAM) son definidos como espacios vacíos granulares internos entre las partículas de agregado en una mezcla pavimentada compactada que incluye vacíos de aire y el contenido de asfalto, expresado como un porcentaje del volumen total. Cuanto mayor sea el (VAM) más espacio habrá disponible para las películas de asfalto, si la película de asfalto que cubre las partículas del agregado es más gruesa, la mezcla será más durable.

Vacíos de relleno asfáltico (VRA): los vacíos de rellenos de asfalto (VRA) indican el porcentaje de vacíos entre las partículas de agregado (VAM) que se encuentran llenas de asfalto. El (VAM) abarca asfalto y aire, por lo tanto el (VRA) se calcula al restar los vacíos de aire (VA) del (VAM) y luego dividiéndolo por el (VAM), y expresando el valor final como un porcentaje.

4.5.1. Procedimiento

Para el cálculo de vacíos totales en la mezcla es necesario conocer la densidad teórica de la mezcla y con esto se debe tener los datos del porcentaje de agregados y bitumen asfáltico como también la gravedad específica de cada uno de estos.

- Del resultado de la gravedad específica de la mezcla compactada y la densidad teórica máxima se procede a calcular los vacíos presentes en la mezcla asfáltica.

4.5.2. Cálculos

Para el cálculo de los vacíos es necesario contar con los datos de las gravedades específicas, tanto de la mezcla compactada como del asfalto y los agregados, otra variable importante en el cálculo de los vacíos son los porcentajes de materiales utilizados.

Datos:

GSE = gravedad específica efectiva del agregado integrado

Gb = gravedad específica del asfalto

% Ag. = porcentaje de agregados en la mezcla

% AC = porcentaje de bitumen asfáltico

Gmb = densidad de la mezcla asfáltica

DTM = densidad teórica máxima

VA = porcentaje de vacíos de aire

Para determinar los vacíos se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$DTM = \frac{100}{\frac{\% AG.}{GSE} + \frac{\% AC}{Gb}}$$

$$VA = 100 * \frac{(DTM - Gmb)}{DTM}$$

$$VAM = 100 - \frac{Gmb - \%AG}{GSB}$$

$$VRA = 100 * \frac{VAM - VA}{VAM}$$

4.5.3. Ejemplo práctico

Con los datos de las gravedades específicas de los materiales y de la mezcla se calculan los porcentajes de vacíos presentes en la mezcla asfáltica obtenidos en los ensayos anteriores.

Datos:

$$\% \text{ Ag.} = 94,95\%$$

$$\% \text{ AC} = 5,05 \%$$

$$\text{GSE} = 2,6890 \text{ (ver anexo N}^\circ \text{ 4)}$$

$$\text{Gb} = 1,062 \text{ (ver anexo N}^\circ \text{ 1)}$$

$$\text{Gmb} = 2,3834$$

Calculando la densidad teórica máxima

$$\text{DTM} = \frac{100}{\frac{94,95}{2,6890} + \frac{5,05}{1,062}} = 2,4959$$

Calculando el % de Vacíos presente en la mezcla:

$$\text{VA} = 100 * \frac{(2,4959 - 2,3834)}{2,4959} = 4,50\%$$

A continuación se calculan los resultados de VAM y VRA.

Datos a utilizar:

$$\text{Gmb} = 2,3834$$

$$\% \text{ Ag} = 94,95\%$$

GSB = 2,6637 (ver anexo N° 4)

VA = 4,5 %

Vacíos de agregado mineral (VAM)

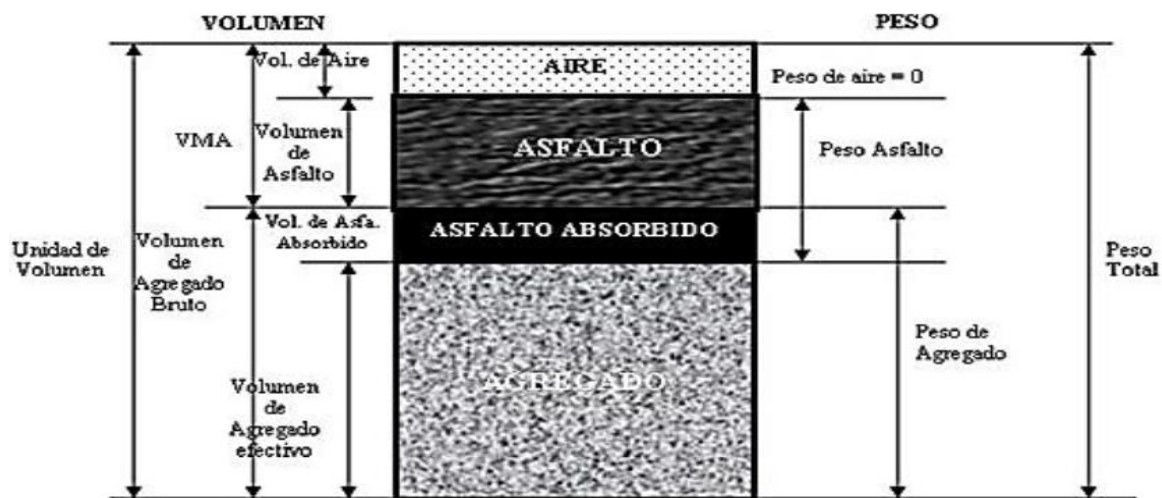
$$VAM = 100 - \frac{2,3834 * 94,95}{2,6637} = 15,04\%$$

Vacíos de relleno asfáltico (VRA)

$$VRA = 100 * \frac{15,04 - 4,5}{15,04} = 70,08\%$$

A continuación se muestra una representación de los vacíos en la mezcla asfáltica.

Figura 19. **Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica**



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

4.5.4. Reportar

Al finalizar el cálculo de estos parámetros se debe reportar el porcentaje de vacíos de aire presentes en la mezcla ya que es un parámetro determinante en el diseño, como también verificar los resultados de los vacíos de agregado minera y los vacíos de relleno asfáltico los cuales dependen directamente de los vacíos de aire.

4.5.5. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en esta prueba cumplen con las especificaciones de diseño, tanto en vacíos que se encuentran dentro del rango de 3 a 5 por ciento de vacíos de aire, como también los vacíos de agregado mineral los cuales cumplen con el mínimo de un 15 por ciento y los vacíos de relleno asfáltico cumplen con el rango de 65 a 75 por ciento, por lo tanto la mezcla cumple con las especificaciones de diseño.

4.5.6. Conclusiones

A partir de los resultados se determina si los vacíos de la mezcla cumplen con las especificaciones y según el análisis se llega a las siguientes conclusiones que relacionan los vacíos con el porcentaje de asfalto en la mezcla.

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.

- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con incrementos en el contenido de asfalto en la mezcla.
- El porcentaje de vacíos con relleno asfáltico (VRA) aumenta con incrementos en el contenido de asfalto en la mezcla.

4.5.7. Recomendaciones

Los vacíos son un parámetro que determina la cantidad de asfalto óptimo para una mezcla asfáltica en caliente y el cual se debe calcular con precisión y exactitud, por lo que se recomienda lo siguiente:

- Para realizar este ensayo es de suma importancia conocer los datos y factores que influyen en la mezcla, como la gravedad específica de los materiales como también la gravedad específica de la mezcla compactada.
- Verificar que la gravedad específica de la mezcla compactada coincida con la de diseño para que los datos no varíen y los resultados no queden fuera de los parámetros establecidos.

4.6. Determinación de la gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico en caliente (Método Rice, ASTM D-2041, AASHTO T-209)

También conocida como gravedad específica Rice, debido a su autor James Rice. Este método determina la gravedad específica de una mezcla

asfáltica en caliente, en su estado suelto eliminando la presencia de vacíos posible.

El peso específico es la relación del peso de un volumen dado de material a una temperatura 25 grados Celsius con respecto de un volumen igual de agua a la misma temperatura.

4.6.1. Maquinaria y equipo

El equipo utilizado en este ensayo debe estar calibrado, limpio y en óptimas condiciones de uso, ya que se debe evitar desgastes de cada uno de los equipos que puedan afectar los resultados del ensayo.

- Balanza electrónica.
- Picnómetro de vacío, con capacidad de 2 000 gramos.
- Vibrodesairador, conjunto de vibrador con base para el picnómetro y el conjunto de tuberías de extracción de vacíos de aire.
- Bomba de vacíos, acoplado al picnómetro para la extracción de vacíos de aire en la mezcla.
- Agua limpia a 25 grados Celsius.
- Taras.

4.6.2. Procedimiento

Para la realización de este ensayo se debe realizar en orden y siguiendo cada paso que se detalla a continuación y de este modo evitar complicaciones al momento de la ejecución del ensayo.

- Se toma una muestra de 1000 ± 200 gramos de concreto asfáltico dejándolo a temperatura ambiente y desgranada para evitar bolsas de aire dentro de ella.
- Se pesa el picnómetro.
- Se pesa el picnómetro completamente lleno con agua.
- Se agrega el material en el picnómetro y luego se llena a $\frac{3}{4}$ del volumen del picnómetro y se coloca en la base del vibrodesairador, se arma el sistema y se pone a funcionar en conjunto con la bomba de vacíos en un período de 15 minutos.
- Después del período de vibro desairado, se procede a llenar completamente el picnómetro y se pesa el picnómetro junto con la mezcla y el agua, se registra el dato.

A continuación se muestran las imágenes del sistema de este ensayo.

Figura 20. **Vibrodesairador y mezcla para gravedad específica Rice**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

4.6.3. Cálculos

La gravedad específica máxima Rice se obtiene a través del peso neto de la mezcla al aire dividiéndolo entre la sumatoria del peso neto de la muestra al aire más el peso del picnómetro y restándole el peso del picnómetro, agua y muestra. Para tal efecto se necesitan los siguientes datos:

Peso neto de la muestra al aire = pma

Peso del picnómetro más agua = ppa

Peso del picnómetro, agua y muestra = ppma

Gravedad específica máxima de la mezcla = Gmm

Ecuación a utilizar:

$$Gmm = \frac{pma}{pma + ppa - ppma}$$

4.6.4. Ejemplo práctico

Se toma una muestra de mezcla y con los datos siguientes obtenidos del ensayo se procede a calcular la gravedad específica máxima con el Método Rice. En este caso se utiliza mezcla a temperatura ambiente y desgranada.

Datos:

pma = 1 255 g

ppa = 7 454 g

ppma = 8 204 g

$$G_{mm} = \frac{1\ 255}{1\ 255 + 7\ 454 - 8\ 204} = 2,4851$$

4.6.5. Reportar

Del ensayo se reporta el resultado de la gravedad específica máxima Rice (Gmm), en el caso de diseño se realizan tres ensayos para poder determinar un promedio y tener un dato más confiable.

4.6.6. Análisis de resultados

Con este resultado se determina el vacío de aire real en la mezcla. Si el resultado es menor que el de diseño indica que algún material es muy absorbente, eso da la pauta que los vacíos quedan fuera de los parámetros y altera la demanda de porcentaje de asfalto para la mezcla. Un parámetro importante es que el resultado debe ser comparado con la densidad teórica máxima (DTM). Los resultados de estos dos parámetros se asemejan cuando en la mezcla se llega al punto de porcentaje óptimo de contenido de asfalto.

4.6.7. Conclusión

A través de este ensayo se puede obtener los vacíos reales del diseño de la mezcla y por lo tanto, también a través de este ensayo se obtiene el porcentaje de contenido óptimo de asfalto para las mezclas asfálticas en caliente.

4.6.8. Recomendaciones

Es importante tomar en cuenta las siguientes recomendaciones al momento de realizar este ensayo para que los resultados sean más exactos y confiables para tener mayor seguridad en el resultado de los datos obtenidos.

- Para obtener un resultado preciso en este ensayo es recomendable desairar el agua a utilizar hirviéndolo previamente, para luego utilizarlo a temperatura ambiente de 25 grados Celsius.
- La mezcla debe estar a temperatura ambiente y en estado suelto (sin compactar).
- Controlar el tiempo de vibrado y desairación a modo que quede evacuados todos los vacíos posibles que se encuentren dentro de la mezcla.

4.7. Prueba de penetración del bitumen asfáltico (AASHTO T-49, ASTM D-5)

Esta prueba permite determinar la consistencia del bitumen asfáltico, mediante la penetración vertical de una aguja en muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

4.7.1. Maquinaria y equipo

El siguiente equipo para la ejecución de este ensayo debe estar en óptimas condiciones para su uso, calibrado, limpio, completo en todas sus partes y sin desgaste alguno para su buen funcionamiento.

- Aparato de penetración o penetrómetro para asfaltos, capaz de sujetar una aguja como se especificará en el siguiente punto y provisto de un dispositivo para medir la profundidad de penetración de la aguja, en décimos de milímetro. También contará con un mecanismo que permita aproximar la aguja a la muestra de prueba y con pesas o lastres de 50 y 100 gramos tal como se muestra en la siguiente figura.

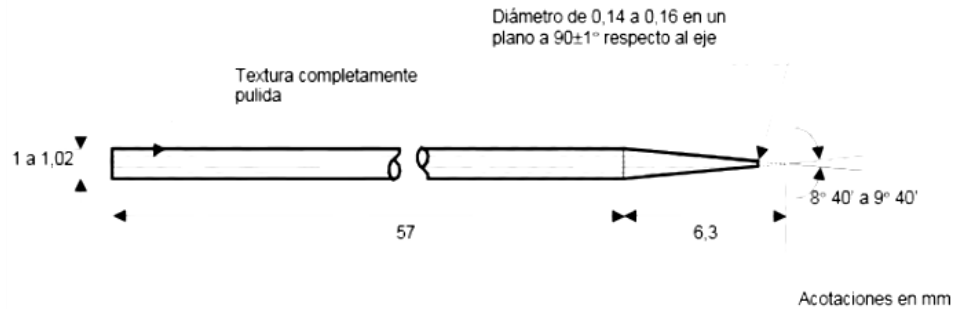
Figura 21. **Penetrómetro para asfaltos**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

- Agujas, de acero inoxidable, totalmente endurecidas y perfectamente pulidas, con la forma y dimensiones como se muestran en la siguiente figura, que se acoplen al penetrómetro mediante un casquillo de bronce o de acero inoxidable, sobresaliendo de este último entre 40 y 45 milímetros.

Figura 22. **Aguja de acero inoxidable**



Fuente: métodos de muestreo y prueba de materiales. M-MMP-4-05-006.

- Cápsula de penetración, de metal o de vidrio refractario, de forma cilíndrica y con el fondo plano; con diámetro interior de 55 milímetros y una altura interior de 35 milímetros, para penetraciones menores de 200×10^{-1} milímetros; o diámetro interior de 70 milímetros y altura interior de 45 milímetros para penetraciones entre 200 y 350×10^{-1} milímetros.
- Baño de María, con temperatura controlable hasta 50 grados Celsius y aproximación de 0,1 grados Celsius.
- Termómetro, con rango de 0 a 50 grados Celsius y aproximación de 1 grados Celsius.
- Cronómetro.
- Recipiente de manejo, puede ser de plástico o vidrio, de forma cilíndrica adecuada para manejar y mantener sumergida la cápsula de penetración que contenga la muestra de prueba.

4.7.2. Procedimiento

Para una buena ejecución de este ensayo se detalla el procedimiento siguiente y se debe tomar en cuenta cada uno de estos pasos para que el ensayo sea realizado con el mayor orden y cuidado posible.

- Se coloca la cápsula de penetración que contiene la muestra de prueba dentro del recipiente de manejo, para luego introducirlo en el baño de María, cuando este mantenga una temperatura de 25 grados Celsius o 77 grados Fahrenheit o lo que especifique la prueba. Se sumerge dicho recipiente completamente y se mantiene así por espacio de 2 horas con objeto de que la muestra asfáltica adquiera esa temperatura.
- Se coloca el penetrómetro sobre una superficie plana, firme y sensiblemente horizontal, se le acopla la aguja y se lastra par que el elemento que se desplaza tenga una masa de $100 \pm 0,1$ gramos o la masa que se especifique para la prueba y finalmente se nivela perfectamente el penetrómetro.
- Se saca del baño de María el recipiente de manejo, el cual contiene la muestra de prueba en su cápsula de penetración, cuidando de que tenga agua suficiente para cubrir completamente la cápsula. Se colocan el recipiente y la cápsula sobre la base del penetrómetro, de tal manera que la muestra quede bajo la aguja. Se ajusta la altura de la aguja hasta que haga contacto con la superficie de la muestra, lo que se logra haciendo coincidir la punta de la aguja con la de su imagen reflejada en la superficie de la muestra.

- Se hace coincidir la manecilla del penetrómetro con el cero de su carátula, hecho esto se oprime el sujetador para liberar la aguja únicamente durante 5 segundos o durante el tiempo que se especifique para la prueba, después de lo cual se toma la lectura registrándolo en décimos de milímetro.
- Se deben hacer por lo menos tres penetraciones sobre puntos diferentes de la superficie de la muestra de prueba, separados entre sí y de la pared de la cápsula de penetración 10 milímetros como mínimo. Se limpiará cuidadosamente la aguja después de cada penetración sin desmontarla y, de ser necesario, para ajustar la temperatura a 25 grados Celsius o 77 grados Fahrenheit o a la especificada para la prueba, se regresará el recipiente de manejo con la muestra al baño de María.

4.7.3. Cálculos y reporte

Se reporta como resultado de la prueba, el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja por lo menos tres penetraciones, expresadas en décimos de milímetro y con aproximación a la unidad, valor conocido como también como grado de penetración. A continuación se muestra el cuadro que especifica el grado de penetración por el grado de viscosidad.

Tabla XI. **Equivalencias entre grado de penetración y grado de viscosidad**

Grado de Penetración	Grado de Viscosidad AC (Asphalt Cement)
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

Fuente: *Reglamento Técnico Centroamericano RCTA 75.01.22:047.*

En el reporte quedarán asentados la temperatura, la masa y el tiempo de penetración con los que se realice la prueba.

4.7.4. **Ejemplo práctico**

Para realizar esta prueba se toma una muestra para realizarle 3 penetraciones en diferentes puntos, de estas se registran la lectura en el dial del penetrómetro y se promedia el valor de los tres resultados obtenidos.

Penetración 1 = 77

Penetración 2 = 75

Penetración 3 = 78

$$\text{Promedio penetración} = \frac{77 + 75 + 78}{3} = 77 \times 10^{-1} \text{ mm}$$

4.7.5. Análisis de resultados

Según los resultados, el asfalto cumple con la especificación del rango mínimo, el cual indica que el asfalto es un asfalto muy blando, de lo contrario si el resultado fuera menor a 60, indica que el asfalto es muy rígido y que ha perdido sus propiedades por oxidación.

4.7.6. Conclusiones

Dependiendo del análisis de los resultados se puede tomar en consideración las siguientes conclusiones al momento de clasificar o seleccionar el material asfáltico para el diseño de mezclas en caliente.

- Con este ensayo se determina la dureza del asfalto a temperatura ambiente controlada.
- Las condiciones ambientales son determinantes en los resultados del ensayo, tanto en temperatura y tiempo de penetración.
- Si los resultados de penetración no cumplen con las especificaciones, el asfalto no se puede utilizar para diseño de mezcla asfáltica en caliente.

4.7.7. Recomendaciones

Al momento de la realización de este ensayo se debe tomar en cuenta las siguientes recomendaciones, para evitar posibles errores de procedimiento y tomar en cuenta las precauciones necesarias.

- Tener cuidado en realizar la prueba bajo las condiciones adecuadas de temperatura, masa y tiempo de penetración que se especifiquen.
- Cuidar que no existe aire atrapado en la muestra de prueba.
- Confirmar que la aguja esté perfectamente limpia en el momento de la penetración.
- Verificar que la aguja esté en contacto con la superficie de la muestra de prueba al iniciar la penetración.
- Cuidar que la aguja no toque el fondo del recipiente antes de finalizar el tiempo especificado.

4.8. Prueba de ablandamiento del bitumen (AASHTO T-53)

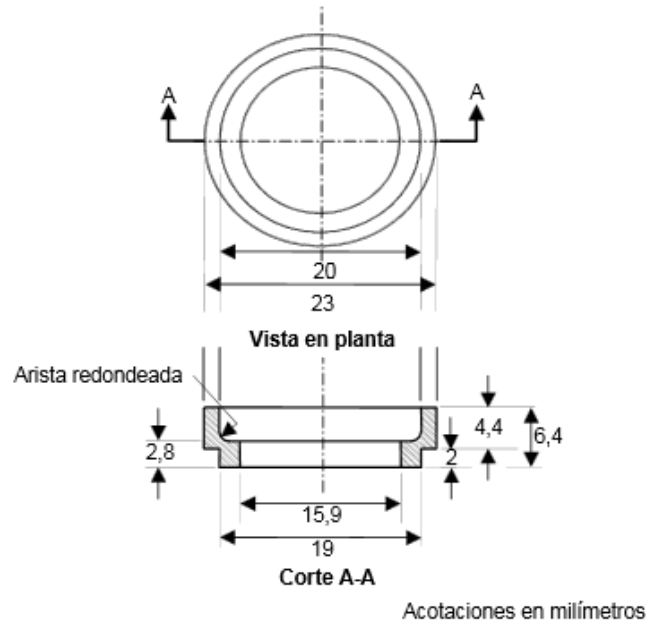
Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos y se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 milímetros, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta dentro de un recipiente con agua.

4.8.1. Maquinaria y equipo

El siguiente equipo para la ejecución de este ensayo debe estar en óptimas condiciones para su uso, calibrado, limpio, completo en todas sus partes y sin desgaste alguno, todos los equipos tienen que ser de buena calidad debido a que son sometidos a altas temperaturas.

- Dos anillos de latón, con el diseño y dimensiones señalados en la siguiente figura.

Figura 23. Anillos de latón

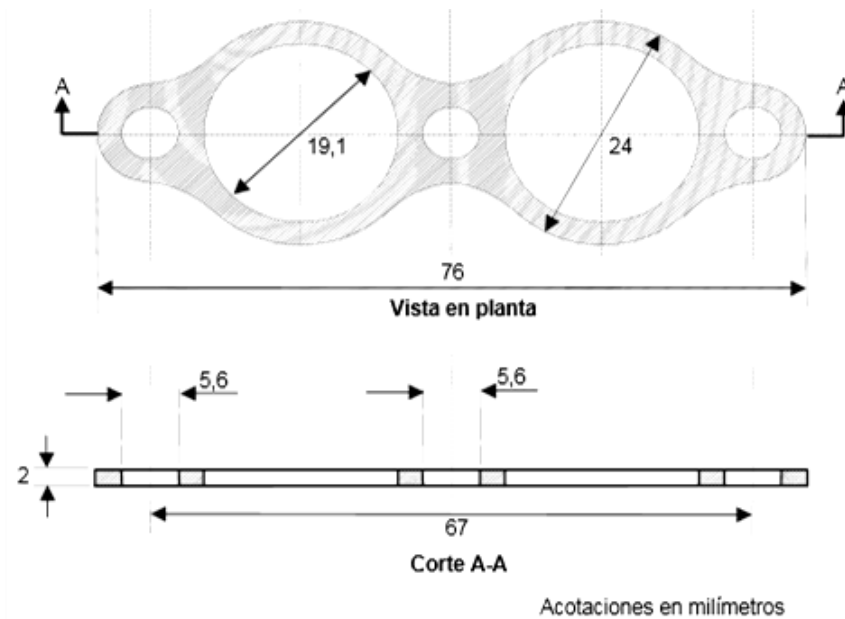


Fuente: métodos de muestreo y prueba de materiales. M-MMP-4-05-006.

- Vaso de vidrio refractario, con diámetro interior de 85 milímetros y altura de 120 milímetros.
- Sistema de soporte, un porta anillos de latón con la forma y dimensiones señaladas en la siguiente figura, con un soporte de metal resistente a la corrosión, integrado por dos columnas que sostengan al porta anillos y a una placa rectangular inferior de forma que la distancia entre la parte inferior de aquel y la superior de ésta sea de 25 milímetros, y sujetas a una placa circular que sirva de tapa para el vaso refractario. El soporte debe estar dispuesto de manera que la parte inferior de la placa

rectangular se ubique a 16 ± 3 milímetros del fondo del vaso, como se muestran en la figura de montaje de sistema de soporte.

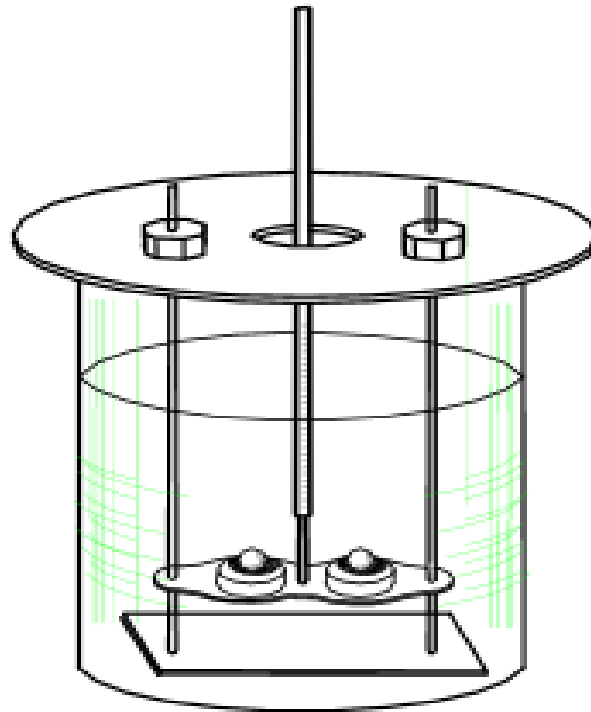
Figura 24. Sistema de soporte



Fuente: métodos de muestreo y prueba de materiales. M-MMP-4-05-006.

- Dos esferas de acero, de 9,5 milímetros de diámetro y de $3,5 \pm 0,05$ gramos de masa.

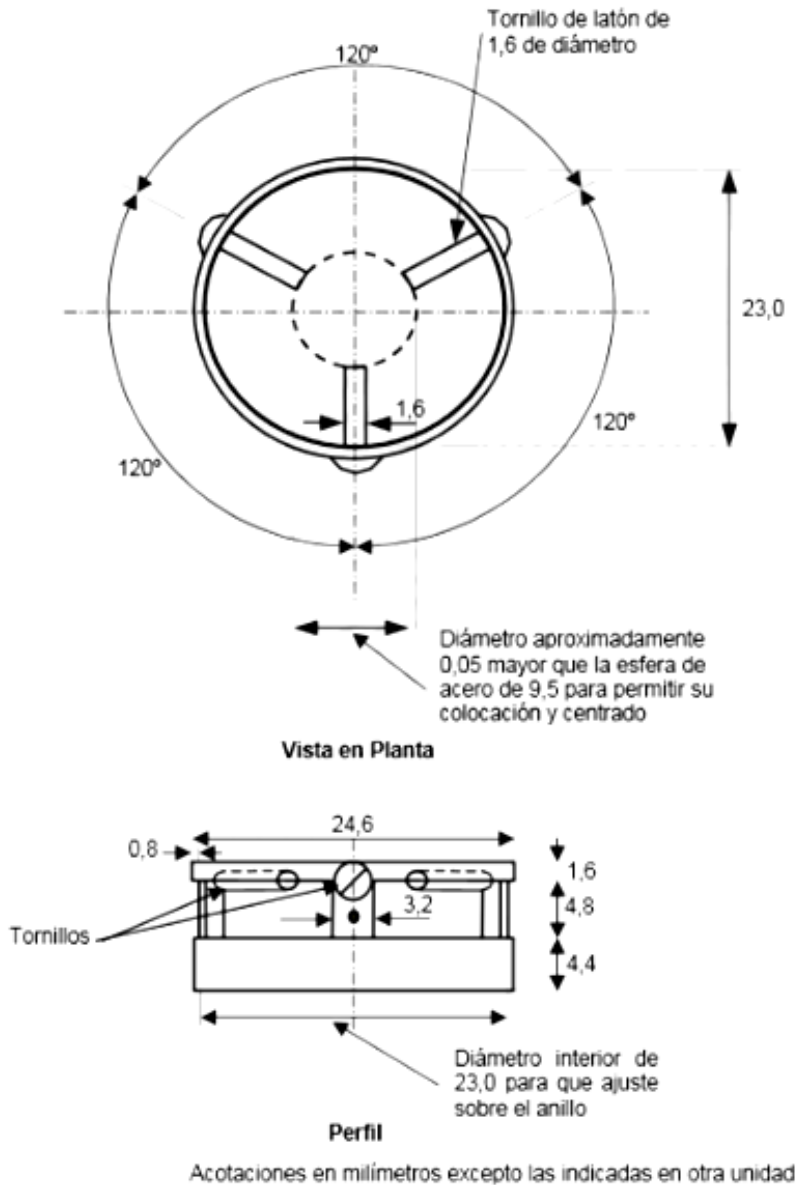
Figura 25. **Montaje de sistema de soporte**



Fuente: métodos de muestreo y prueba de materiales. M-MMP-4-05-006.

- Dos guías de latón para centrar las esferas, con la forma y dimensiones mostradas en la siguiente figura:

Figura 26. Guías de latón para centrar esferas



Fuente: métodos de muestreo y prueba de materiales. M-MMP-4-05-006.

- Parrilla eléctrica (*hot plate*) o mechero, adaptada para controlar la aplicación de calor.

- Termómetro de inmersión total con rango de -1 a 175 grados Celsius y aproximación de 0,5 grados Celsius.
- Pinzas
- Espátula o cuchillo
- Agua limpia

4.8.2. Procedimiento

Para una adecuada ejecución de este ensayo se detalla el procedimiento siguiente y se debe tomar en cuenta cada uno de estos pasos para que el ensayo sea realizado con el mayor orden y cuidado posible.

- Se toma una muestra de cemento asfáltico calentada a una temperatura de 300 grados Fahrenheit y se coloca en los anillos sobre una base de vidrio lubricado para evitar que se adhieran.
- Después de que la muestra llegue a una temperatura igual a la del ambiente se procede a tallar o rasar la muestra a nivel de los anillos con una espátula o cuchillo calentado para facilitar el corte.
- Se ensambla el sistema de soporte colocando en su lugar los anillos con la muestra de prueba, las guías y el termómetro de manera que la parte inferior de su bulbo quede al mismo nivel que la parte inferior de los anillos, sin que toque las paredes del orificio central del porta anillos. Se llena el vaso de vidrio hasta una altura de 10 centímetros, con agua potable a 5 ± 1 grados Celsius su el punto de ablandamiento esperado es

menor de 80 grados Celsius y con las pinzas se colocan las esferas en el fondo del vaso. Se introduce en el vaso el sistema de soporte y se deja el conjunto durante 15 minutos, manteniéndolo a la temperatura indicada.

- Se extrae el sistema de soporte, con las pinzas se colocan las esferas en las guías e inmediatamente se vuelve a introducir en el vaso, quedando el montaje del equipo como se ilustra en la figura de montaje.
- Se coloca el conjunto en la parrilla eléctrica o mechero y se incrementa uniformemente la temperatura del líquido a razón de 5 grados Celsius por minuto con una tolerancia de $\pm 0,5$ grados Celsius en las lecturas hechas cada minuto después de los primeros 3 minutos.
- Se registra para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte, con la aproximación de $\pm 0,5$ grados Celsius. las temperaturas registradas no deben diferir entre sí en más de 1 grados Celsius, de lo contrario se debe repetir la prueba utilizando una nueva muestra de prueba.

4.8.3. Cálculos y reporte

Se reporta como punto de ablandamiento del cemento asfáltico el promedio de las temperaturas registradas al momento de que las esferas hagan contacto con la plancha inferior del sistema de soporte.

4.8.4. Ejemplo práctico

Para realizar esta prueba se toma una muestra y se coloca en los anillos según el procedimiento indicado al finalizar el ensayo de los datos obtenidos se promedia el valor de las dos temperaturas obtenidas.

Temperatura esfera 1:

45,7 °C – 114,26 °F

Temperatura esfera 2:

45,5 °C – 113,90 °F

Temperatura Promedio:

45,6 °C – 114,08 °F

4.8.5. Análisis de resultados

Con el resultado de la prueba, la consistencia del asfalto a una temperatura de 45,6 grados Celsius cede a una deformación pasando de estado sólido a estado líquido de forma gradual. Este resultado es un indicador de que el asfalto fluye a esta temperatura al momento de su período de servicio.

4.8.6. Conclusiones

Dependiendo del análisis de los resultados, se puede tomar en consideración las siguientes conclusiones al momento de clasificar o seleccionar el material asfáltico para el diseño de mezclas en caliente.

- Los productos asfálticos son materiales viscoelásticos que no cambian de estado sólido a estado líquido a una temperatura determinada, 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 la clasificación productos asfálticos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a altas temperaturas, durante su vida de servicio. También es útil para verificar la uniformidad de los lotes de asfaltos utilizados en planta de producción.

4.8.7. Recomendaciones

Al momento de la realización de este ensayo se debe tomar en cuenta las siguientes recomendaciones, para evitar posibles errores de procedimiento y tomar en cuenta las precauciones necesarias.

- Cuidar que durante el llenado de muestra en los anillos no se formen burbujas de aire en la superficie o en el interior de la muestra.
- Realizar la prueba en un ambiente libre de corriente de aire y a la temperatura indicada.
- Controlar adecuadamente el gradiente de temperatura especificado.
- Limpiar de forma adecuada cada uno de los equipos y utensilios utilizados al finalizar la prueba.

5. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MÉTODO MARSHALL)

Para el diseño de mezcla asfáltica se utiliza el Método MARSHALL debido a que se encuentra dentro de las *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes* de la Dirección General de Caminos, de 2001, sección 401.

El concepto de este método fue desarrollado por Bruce Marshall, ingeniero de asfalto del Departamento de Autopistas del Estado de Mississippi. El propósito de este método es determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre densidades y contenidos óptimos de vacíos en la mezcla que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El método originalmente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 milímetros (1 pulgada) o menor. El método utiliza especímenes de prueba (briquetas) estándar de 64 milímetros aproximadamente de alto y 102 milímetros de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto agregado (ASTM D1559)-(AASHTO T-245).

Los dos aspectos principales del Método Marshall son:

- La densidad – análisis de vacíos
- Estabilidad – flujo de los especímenes compactados

A continuación se presenta la metodología del diseño a realizar.

5.1. Toma de muestra en banco de materiales

Al momento de seleccionar la muestra en la pila o banco de materiales se debe realizar de la misma forma en que se dosifican las tolvas que alimentan la mezcladora en planta, para que los resultados de laboratorio no sean diferentes a los resultados de la producción en planta.

Para este proceso se utiliza un cargador frontal que recoge el material y lo deposita en el recipiente de muestreo.

Figura 27. Muestras de agregado



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

5.2. Identificación de materiales según el tipo de mezcla a diseñar

Los tipos de mezclas asfálticas en caliente más utilizados en Guatemala se detallan en la siguiente tabla, clasificándolo por el tamaño del agregado, rango de porcentaje de asfalto a utilizar y su uso recomendado.

Tabla XII. Tipos de mezclas asfálticas

TIPO DE MEZCLA	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO	RANGO DE PORCENTAJES DE CEMENTO ASFÁLTICO A UTILIZAR	USOS RECOMENDADOS
D	19,0 mm (3/4")	4 - 10	Autopistas, Calzadas y avenidas principales
E	12,5 mm (1/2")	4 - 11	Uso general
F	9,5 mm (3/8")	5 - 12	Residenciales, condominios y parqueos

Fuente: elaboración propia.

Existen varios tipos de agregado en los bancos de materiales los cuales se caracterizan por su granulometría.

Entre los materiales comerciales que ofrecen las trituradoras están:

- 1/2" – 0
- 3/4" especial
- 3/8"
- 3/8" #8
- 1" #56
- 1"

- 1" – 0
- Arena de río.

Cada uno de estos materiales tiene su propia granulometría por su tamaño máximo nominal.

Para este caso se diseñará una mezcla tipo D (19 mm) $\frac{3}{4}$ de pulgada, y para esto se utilizarán los siguientes agregados:

Tabla XIII. **Agregados para diseño de mezcla**

AGREGADO	BANCO	PROCEDENCIA
$\frac{1}{2}$ " – 0	PADEGUA	PPO AGRECA
$\frac{3}{8}$ " # 8	PADEGUA	PPO AGRECA
$\frac{3}{4}$ " especial	PADEGUA	PPO AGRECA
1" # 56	PADEGUA	PPO AGRECA

Fuente: elaboración propia.

5.3. Caracterización de los agregados

Previo a la realización del diseño de la mezcla es necesario conocer las características de cada uno de los agregados a utilizar, a continuación se presentan los requerimientos necesarios para cada una de ellas:

- Análisis granulométrico (AASHTO T 11)
- Determinación del peso específico del agregado.
- Desintegración al sulfato de sodio (AASHTO T 104)
- Prueba de abrasión de Los Ángeles (AASHTO T 96)

- Partículas planas y alargadas
- Equivalente de arena (AASHTO T 176)
- Índice plástico (AASHTO T 90)

5.4. Análisis granulométrico de los agregados (AASHTO T 11)

Para el siguiente diseño se procede a conocer el tamaño máximo nominal de cada uno de los agregados en estado seco (libre de humedad) por medio de una serie de tamices y de esta forma determinar su escala granulométrica.

En la siguiente tabla se muestra el tamaño máximo nominal de cada tipo de mezcla y la abertura de los tamices requeridos para los porcentajes pasantes para un diseño de una mezcla tipo D (19 mm) $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Tabla XIV. Graduación granulométrica según el tipo de mezcla

Tamaño del Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	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 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

Fuente: *Especificaciones generales para construcción de puentes y carreteras* de la Dirección General de Caminos. Guatemala.

A continuación se muestra la granulometría individual de los agregados.

Agregado: ½" – 0

PN = 1 140,6 g

Tabla XV. **Granulometría de agregado ½" – 0**

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso bruto retenido	% Peso pasante
1	25,00	110,4	100,00
¾"	19,00	110,4	100,00
⅜"	9,50	125,2	98,70
N° 4	4,75	257,6	87,09
N° 8	2,36	487,5	66,94
N° 50	0,29718	1 004,6	21,60
N° 200	0,07366	1 132,2	10,42

Fuente: elaboración propia.

Agregado: ⅜" #8

PN = 1 147,2 g

Tabla XVI. **Granulometría de agregado ⅜" # 8**

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso bruto Retenido	% Peso pasante
1	25,00	110,1	100,00
¾"	19,00	110,1	100,00
⅜"	9,50	204,3	91,79
N° 4	4,75	1 026	20,16
N° 8	2,36	1 197	5,26
N° 50	0,29718	1 229,2	2,45
N° 200	0,07366	1 237,4	1,73

Fuente: elaboración propia.

Agregado: ¾" especial

PN = 1 134,7 g

Tabla XVII. Granulometría de agregado ¾" especial

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Bruto Retenido	% Peso pasante
1	25,00	117,7	100,00
¾"	19,00	117,7	100,00
3/8"	9,50	880,7	32,76
N° 4	4,75	1 183,8	6,05
N° 8	2,36	1 216,8	3,14
N° 50	0,29718	1 226	2,33
N° 200	0,07366	1 231,7	1,82

Fuente: elaboración propia.

Agregado: 1" # 56

PN = 1 841,4 g

Tabla XVIII. Granulometría de agregado 1" #56

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Bruto Retenido	% Peso pasante
1	25,00	110,6	100,00
¾"	19,00	554,6	75,89
3/8"	9,50	1 858,2	5,09
N° 4	4,75	1 912	2,17
N° 8	2,36	1 913,2	2,11
N° 50	0,29718	1 920,5	1,71
N° 200	0,07366	1 929,8	1,21

Fuente: elaboración propia.

5.5. Combinación granulométrica de los agregados

Con la granulometría individual de cada agregado se procede a la combinación granulométrica para llegar a la curva granulométrica deseada, en el siguiente cuadro se muestra la integración de cada una de las granulometrías.

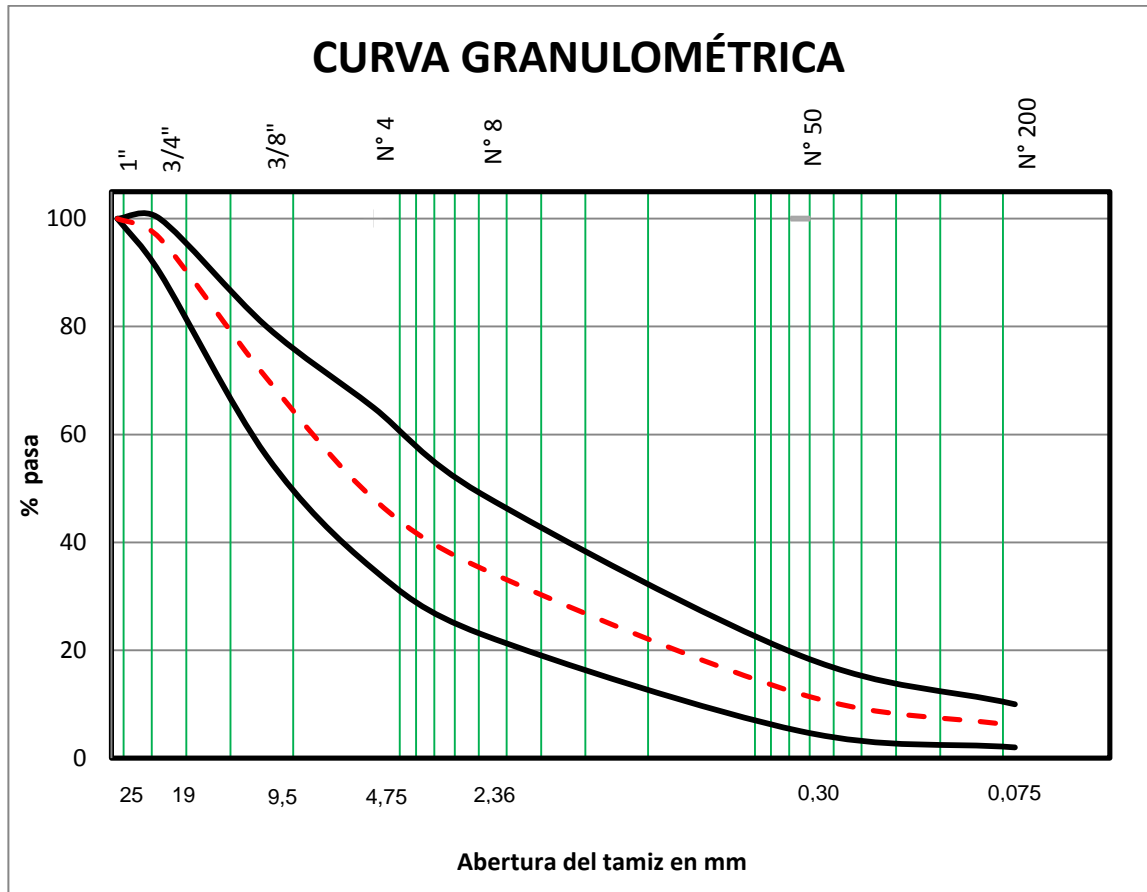
Tabla XIX. **Combinación granulométrica de diseño**

TAMICES		COMBINACIONES DE AGREGADOS				%TOTAL	ÓPTIMO	ESPECIFICACIONES	
Pulgadas	mm	1/2 a 0"	3/8 N° 8	3/4" esp.	1" N° 56			TIPO	
		50,00	15,00	20,00	15,00			D	
1"	25	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100	100	100
3/4"	19	100,00	100,00	100,00	75,89	96,38	95	90	100
3/8"	9,5	98,70	91,79	32,76	5,09	70,44	68	56	80
N° 4	4,75	87,09	20,16	6,05	2,17	48,11	50	35	65
N° 8	2,36	66,94	5,26	3,14	2,11	35,20	36	23	49
N° 50	0,29718	21,60	2,45	2,33	1,71	11,89	12	5	19
N° 200	0,074	10,42	1,73	1,82	1,21	6,01	6	2	10

Fuente: elaboración propia.

De esta integración granulométrica según las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes* de la Dirección General de Caminos, se cumplen con los límites establecidos en dichas especificaciones los cuales se pueden apreciar en la curva granulométrica que se muestra a continuación.

Figura 28. **Gráfico de curva de combinación granulométrica**



Fuente: elaboración propia.

5.6. **Porcentajes teóricos de asfalto presente en la mezcla de diseño**

Para establecer los porcentajes teóricos de asfalto en la mezcla se debe conocer el porcentaje de peso de aporte establecido en la granulometría combinada para saber la cantidad de cada agregado a utilizar.

Los porcentajes a establecer son los siguientes:

Tabla XX. **Porcentajes teóricos de contenido asfáltico**

Punto	% AC	% Agregado	% Total de la mezcla
1	4,00%	96,00%	100%
2	4,50%	95,50%	100%
3	5,00%	95,00%	100%
4	5,50%	94,50%	100%
5	6,00%	94,00%	100%

Fuente: elaboración propia.

5.7. Dosificación de materiales para la elaboración de mezcla asfáltica en caliente

Para la preparación de la mezcla se toma una cantidad de 1 200 gramos de agregado libre de suciedad y humedad por cada punto, en el siguiente cuadro se muestra la cantidad de material a utilizar.

Tabla XXI. **Dosificación de materiales**

AGREGADOS		PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO
		1	2	3	4	5
		%	%	%	%	%
MATERIAL	PORCENTAJES	96	95,5	95	94,5	94
1/2 a 0	50	600	600	600	600	600
3/8" # 8	15	180	180	180	180	180
3/4 esp.	20	240	240	240	240	240
1" N° 56	15	180	180	180	180	180
PESO DE AGREGADO TOTAL A UTILIZAR		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200

Continuación de la tabla XXI.

PORCENTAJE DE AC -20 A UTILIZAR	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%
PESO DE CEMENTO ASFÁLTICO A UTILIZAR	50	56,54	63,16	69,84	76,60
PESO TOTAL DE LA MEZCLA	1 250	1 256,54	1 263,16	1 269,84	1 276,60

Fuente: elaboración propia.

En el cuadro anterior se observa que para el punto 1 se utiliza 1 200 gramos de agregados (96,0 por ciento) y 50 gramos de AC-20 (4,0 por ciento), los agregados están distribuidos de la siguiente manera: 600 gramos de ½ “– 0, 180 gramos de 3/8” #8, 240 gramos de ¾“ especial y 180 gramos de 1” N° 56; la sumatoria de los agregados y el AC hacen un total de 1 250 gramos.

5.8. Preparación de mezcla asfáltica en caliente y compactación de briquetas Marshall

Para la preparación de mezcla asfáltica en caliente, se preparan con las dosificaciones dadas cuidando el peso de cada material a utilizar para no alterar tanto la granulometría como el porcentaje de asfalto a utilizar.

5.8.1. Dosificación

Con los datos de dosificación de cada uno de los materiales a utilizar en cada punto según el porcentaje de asfalto, se elaboran como mínimo 3 muestras por cada punto.

5.8.2. Temperatura de mezclado

Los agregados y el cemento asfáltico deben estar entre 300 a 320 grados Fahrenheit, o según especifique los resultados de análisis de laboratorio, en este caso la temperatura de mezclado es de 300 grados Fahrenheit.

5.8.3. Elaboración de mezcla

Con la medida y temperatura de cada material a utilizar en el diseño de mezcla se procede a realizar la mezcla asfáltica de manera uniforme evitando grumos, la mezcla se realiza de la siguiente manera.

- En un recipiente se coloca el agregado pesado con una temperatura de 300 grados Fahrenheit.
- Luego se agrega el bitumen asfáltico según el porcentaje, el peso que corresponda.
- En una estufa calibrada se coloca el recipiente y se mezclan los materiales en un período de 3 a 5 minutos (esto se hace simulando el tiempo de mezclado en planta).

Este proceso se hace con el debido cuidado ya que los materiales son mezclados a altas temperaturas y para esto la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente se debe realizar con equipo de protección especial, a continuación se muestran las figuras del proceso de mezclado.

Figura 29. **Agregados combinados**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 30. **Agregados y asfalto previo a ser mezclados**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 31. **Mezclado**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

Figura 32. **Mezcla asfáltica en caliente**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

5.9. Elaboración de briquetas Marshall

Teniendo los agregados y el cemento asfáltico debidamente mezclados se procede a compactarlos en los moldes normados con 75 golpes de cada lado, según las *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes* de la Dirección General de Caminos de Guatemala.

La compactación se realiza a una temperatura de 280 a 290 grados Fahrenheit.

Figura 33. **Briquetas Marshall**



Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

A continuación se muestra el cuadro de especificaciones de compactación

Tabla XXII. **Parámetros de diseño Marshall**

METODO DE DISEÑO	VALORES LÍMITES	
	MINIMO	MAXIMO
1) MARSHALL (AASHTO T 245)		
• Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de	0.25 Pa-s (250 cS)	0.31 Pa-s (310 cS)
• Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen	75	75
• Estabilidad	5,338 N (1,200 libras)	
• Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulg.)		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	8	16
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	8	14
• Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0.01 pulg.)	120	275
• Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada	3	5
• Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	Tabla 401-13	
• Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	65	78
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	65	75
• Relación finos/bitumen	0.6	1.6
• Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283		
Resistencia retenida	80 %	
• Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95 %	

Fuente: *Especificaciones generales para construcción de puentes y carreteras* de la Dirección General de Caminos. Guatemala.

Tabla XXIII. **Vacíos en el agregado mineral (VAM)**

Tamaño nominal máximo del agregado en mm	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)			
	Marshall			Superpave
	3% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾	5% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾
9.50	14	15	16	15
12.50	13	14	15	14
19.00	12	13	14	13
25.00	11	12	13	12
37.50	10	11	12	11
50.00	9.5	10.5	11.5	No aplicable

⁽¹⁾ Porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada.

Fuente: *Especificaciones generales para construcción de puentes y carreteras* de la Dirección General de Caminos. Guatemala.

5.10. Ensayos y resultados de la briquetas Marshall

Para el diseño de mezcla asfáltica en caliente, utilizando el Método Marshall se deben ensayar las briquetas compactadas para conocer su gravedad específica, sus vacíos, su estabilidad y su fluencia.

5.10.1. Gravedad específica de la mezcla compactada y cálculo de vacíos

Tal como se explicó en los subtítulos 4,3 y 4,5 se procede a los ensayos de la determinación de la gravedad específica de la mezcla compactada como su porcentaje de vacíos. Como primer paso se extraen las briquetas de los moldes cilíndricos con el extractor de briquetas.

Se mide el espesor de cada briqueta para posteriormente calcular su gravedad específica:

Datos:

W_s = peso en el aire de la muestra en estado seco

$W_{agua\ sss}$ = peso en agua de la muestra en estado saturado
superficialmente seco

$W_{aire\ sss}$ = peso en el aire de la muestra en estado saturado
superficialmente seco

S_{ss} = saturado superficialmente seco

G_{mb} = gravedad específica de la mezcla compactada (briquetas)

F_{temp} = factor de corrección volumétrico por temperatura

Temperatura: 21 grados Celsius

Factor de corrección: 1,000950

$$Gmb = \frac{Ws}{(Waire\ sss - Wagua\ sss) * Ftemp}$$

A continuación se muestran los resultados en los cuadros siguientes:

Tabla XXIV. **Gravedad específica de mezcla compactada con 4,0 por ciento de AC**

PUNTO 1							
% AC-20	4			VOLUMEN	VOLUMEN CORREGIDO	Gmb	PROMEDIO
BRIQUETA	Ws	Wagua sss	Waire sss				
1	1 249	723	1 255	532	532,51	2,3455	2,3525
2	1 247	726	1 252	526	526,50	2,3685	
3	1 248	724	1 256	532	532,51	2,3436	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Gravedad específica de mezcla compactada con 4,5 por ciento de AC**

PUNTO 2							
% AC-20	4,5			VOLUMEN	VOLUMEN CORREGIDO	Gmb	PROMEDIO
BRIQUETA	Ws	Wagua sss	Waire sss				
4	1 245	726	1 250	524	524,50	2,3737	2,3707
5	1 247	727	1 252	525	525,50	2,3730	
6	1 243	725	1 250	525	525,50	2,3654	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Gravedad específica de mezcla compactada con 5,0 por ciento de AC**

PUNTO 3							
% AC-20	5			VOLUMEN	VOLUMEN CORREGIDO	Gmb	PROMEDIO
BRIQUETA	Ws	Wagua sss	Waire sss				
7	1 251	731	1 255	524	524,50	2,3851	2,3872
8	1 250	729	1 252	523	523,50	2,3878	
9	1 248	728	1 250	522	522,50	2,3885	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Gravedad específica de mezcla compactada con 5,5 por ciento de AC**

PUNTO 4							
% AC-20	5,5			VOLUMEN	VOLUMEN CORREGIDO	Gmb	PROMEDIO
BRIQUETA	Ws	Wagua sss	Waire sss				
10	1 265	742	1 267	525	525,50	2,4072	2,4062
11	1 268	745	1 271	526	526,50	2,4084	
12	1 270	746	1 274	528	528,50	2,4030	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Gravedad específica de mezcla compactada con 6.0 por ciento de AC**

PUNTO 5							
% AC-20	6			VOLUMEN	VOLUMEN CORREGIDO	Gmb	PROMEDIO
BRIQUETA	Ws	Wagua sss	Waire sss				
13	1 260	740	1 261	521	521,49	2,4161	2,4142
14	1 258	739	1 260	521	521,49	2,4123	
15	1 259	739	1 260	521	521,49	2,4142	

Fuente: elaboración propia.

De estos resultados obtenidos se procede a calcular los vacíos de aire en la mezcla, los vacíos de agregado mineral (VAM) y los vacíos de relleno asfáltico (VRA).

Para tener estos resultados partimos de los datos del ensayo de determinación de vacíos que se encuentran en el capítulo 4 los cuales son:

- GSE = gravedad específica efectiva del agregado integrado
- GSB = gravedad específica neta total del agregado integrado
- Gb = gravedad específica del asfalto
- % Ag. = porcentaje de agregados en la mezcla
- % AC = porcentaje de bitumen asfáltico
- Gmb = densidad de la mezcla asfáltica
- DTM = densidad teórica máxima
- VA = porcentaje de vacíos de aire
- VAM = porcentaje de vacíos de agregado mineral

- VRA = porcentaje de vacíos de relleno asfáltico

Para la determinación de los vacíos primero determinamos la densidad teórica máxima (DTM), para esto se tomará como ejemplo el punto 1 con 4 por ciento de contenido asfáltico.

$$DTM = \frac{100}{\frac{\% \text{ AG.}}{GSE} + \frac{\% \text{ AC}}{Gb}}$$

$$DTM = \frac{100}{\frac{96}{2,6890} + \frac{4}{1,062}} = 2,5337$$

Posteriormente se calcula el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla tomando como referencia los datos de la briqueta N° 1.

$$VA = 100 * \frac{(DTM - Gmb)}{DTM}$$

$$VA = 100 * \frac{(2,5337 - 2,3455)}{2,5337} = 7,43\%$$

A continuación se calculan los resultados de VAM y VRA.

Datos a utilizar:

Gmb = 2,3455

% Ag = 96%

GSB = 2,6637

$$VA = 7,43 \%$$

Vacíos de agregado mineral (VAM)

$$VAM = 100 - \frac{Gmb - \%AG}{GSB}$$

$$VAM = 100 - \frac{2,3455 * 96}{2,6637} = 15,47$$

Vacíos de relleno asfáltico (VRA)

$$VRA = 100 * \frac{VAM - VA}{VAM}$$

$$VRA = 100 * \frac{15,47 - 7,43}{15,47} = 51,97$$

En los siguientes cuadros se muestran los resultados de cada briqueta.

Tabla XXIX. **Porcentaje de vacíos en la mezcla con 4,0 por ciento de AC**

% AC-20	4,0 %				
BRIQUETA	Gmb	DTM	Vacíos de aire	VAM	VAR
1	2,3455	2,5337	7,43	15,47	51,97
2	2,3685		6,52	14,64	55,45
3	2,3436		7,50	15,54	51,71
PROMEDIO	2,3525	2,5337	7,15	15,21	53,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Porcentaje de vacíos en la mezcla con 4,5 por ciento de AC**

% AC-20	4,5 %				
BRIQUETA	Gmb	DTM	Vacíos de aire	VAM	VAR
4	2,3737	2,5156	5,64	14,90	62,14
5	2,3730		5,67	14,92	62,02
6	2,3654		5,97	15,20	60,71
PROMEDIO	2,3707	2,5156	5,76	15,01	61,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Porcentaje de vacíos en la mezcla con 5,0 por ciento de AC**

% AC-20	5,0 %				
BRIQUETA	Gmb	DTM	Vacíos de aire	VAM	VAR
7	2,3851	2,4977	4,51	14,93	69,83
8	2,3878		4,40	14,84	70,35
9	2,3885		4,37	14,81	70,50
PROMEDIO	2,3872	2,4977	4,42	14,86	70,23

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla con 5,5 por ciento de AC**

% AC-20	5,5 %				
BRIQUETA	Gmb	DTM	Vacíos de aire	VAM	VAR
10	2,4072	2,4800	2,94	14,60	79,89
11	2,4084		2,89	14,56	80,15
12	2,4030		3,11	14,75	78,94
PROMEDIO	2,4062	2,4800	2,98	14,64	79,66

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla con 6,0 por ciento de AC**

% AC-20	6,0 %				
BRIQUETA	Gmb	DTM	Vacios de aire	VAM	VAR
13	2,4161	2,4626	1,89	14,74	87,19
14	2,4123		2,04	14,87	86,26
15	2,4142		1,97	14,80	86,72
PROMEDIO	2,4142	2,4626	1,97	14,80	86,72

Fuente: elaboración propia.

De los cuadros anteriores se observa el promedio de cada uno de los resultados calculados los cuales servirán para el análisis gráfico de la determinación del porcentaje óptimo de asfalto.

5.10.2. Estabilidad y fluencia de las briquetas Marshall

La estabilidad y la fluencia de la mezcla compactada es un parámetro importante de diseño, el cual es necesario conocer al momento de realizar un diseño. A continuación se procede a determinar la estabilidad y fluencia de cada una de las briquetas como se indica en el subtítulo 4.4.

Calculando la estabilidad de briquetas.

Se toma como referencia la biqueta N° 1

$$\text{Estabilidad} = (310 * 7,4736 + 11,1604) * 0,96 = 2\ 235 \text{ lbs}$$

Lectura de fluencia: 10 x 0,01”

A continuación se muestra el cuadro de resultados de cada una de las briquetas.

Tabla XXXIV. **Estabilidad y fluencia de mezcla con 4,0 por ciento de AC**

PUNTO 1	4,0 % AC			
Briqueta	1	2	3	PROMEDIO
Espesor (h)	63	62	62	
Volumen	532,51	526,5	532,51	
Fvol.	0,96	0,96	0,96	
Ldc	310	305	315	
FLOW (Ldf) 0,01"	10	9	10	10
ESTABILIDAD (lbs)	2 235	2 199	2 271	2 235
Relación estabilidad/fluencia	223	244	227	232

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Estabilidad y fluencia de mezcla con 4,5 por ciento de AC**

PUNTO 2	4,5 % AC			
Briqueta	1	2	3	PROMEDIO
Espesor (h)	63	64	63	
Volumen	524,5	525,5	525,5	
Fvol.	0,96	0,96	0,96	
Ldc	330	335	330	
FLOW (Ldf) 0,01"	11	10	11	11
ESTABILIDAD (lbs)	2 378	2 414	2 378	2 390
Relación estabilidad/fluencia	216	241	216	225

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Estabilidad y fluencia de mezcla con 5,0 por ciento de AC

PUNTO 3	5,0 % AC			
Briqueta	1	2	3	PROMEDIO
Espesor (h)	64	62	62	
Volumen	524,5	523,5	522,5	
Fvol.	0,96	0,96	1	
Ldc	385	380	360	
FLOW (Ldf) 0,01"	12	12	13	12
ESTABILIDAD (lbs)	2 773	2 737	2 702	2 737
Relación estabilidad/fluencia	231	228	208	222

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. Estabilidad y fluencia de mezcla con 5,5 por ciento de AC

PUNTO 4	5,5 % AC			
Briqueta	1	2	3	PROMEDIO
Espesor (h)	64	64	65	
Volumen	525,5	526,5	528,5	
Fvol.	0,96	0,96	0,96	
Ldc	355	360	365	
FLOW (Ldf) 0,01"	14	12	12	13
ESTABILIDAD (lbs)	2 558	2 594	2 629	2 594
Relación estabilidad/fluencia	183	216	219	206

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Estabilidad y fluencia de mezcla con 6,0 por ciento de AC**

PUNTO 5	6,0 % AC			
Briqueta	1	2	3	PROMEDIO
Espesor (h)	63	63	64	
Volumen	521,49	521,49	521,49	
Fvol.	1	1	1	
Ldc	320	310	315	
FLOW (Ldf) 0,01"	14	15	14	14
ESTABILIDAD (lbs)	2 403	2 328	2 365	2 365
Relación estabilidad/fluencia	172	155	169	165

Fuente: elaboración propia.

5.11. Resultados

Con estos datos obtenidos se procede a determinar el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla de agregados por medio del análisis gráfico de cada uno de estos resultados.

A continuación se muestra el resumen de los promedios de cada resultado obtenido de cada parámetro calculado.

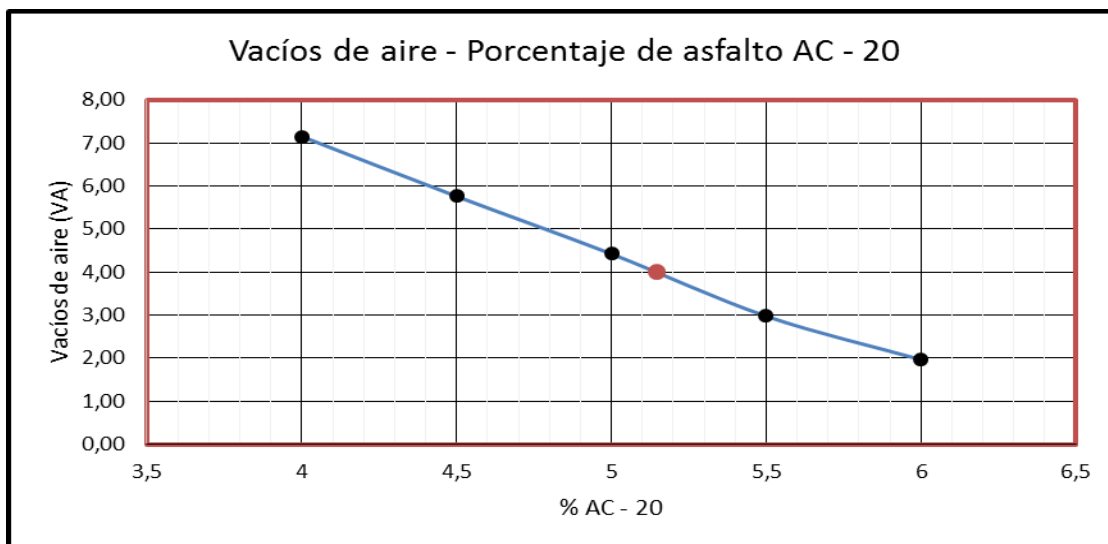
Tabla XXXIX. **Resumen de resultados**

PUNTO	% AC	Gmb	Vacios de aire	VAM	VRA	ESTABILIDAD	FLUENCIA	REF
1	4,0	2,3525	7,15	15,21	53,04	2 235	10	232
2	4,5	2,3707	5,76	15,01	61,62	2 390	11	225
3	5,0	2,3872	4,42	14,86	70,23	2 737	12	222
4	5,5	2,4062	2,98	14,64	79,66	2 594	13	206
5	6,0	2,4142	1,97	14,80	86,72	2 365	14	165
óptimo	5,15	2,3927	4,0	14,78	73,00	2 732	12,50	219

Fuente: elaboración propia.

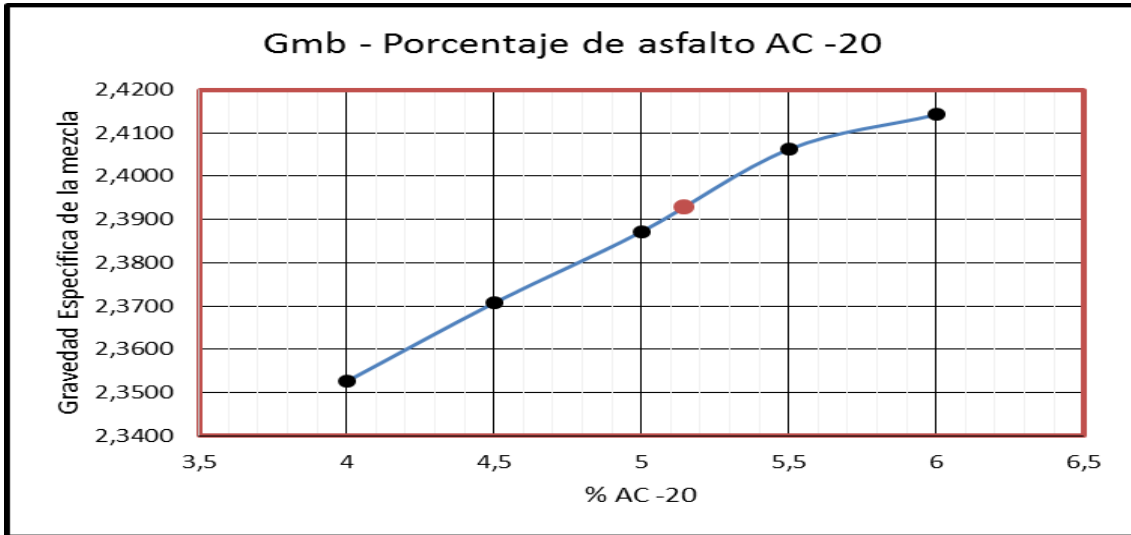
Para localizar el punto óptimo de asfalto se tomó como punto de referencia el vacío óptimo, según la especificación el cual es de 4 por ciento de vacíos de aire presente en la mezcla, estos resultados se obtuvieron a través de las siguientes gráficas:

Figura 34. **Vacios de aire versus porcentaje de AC**



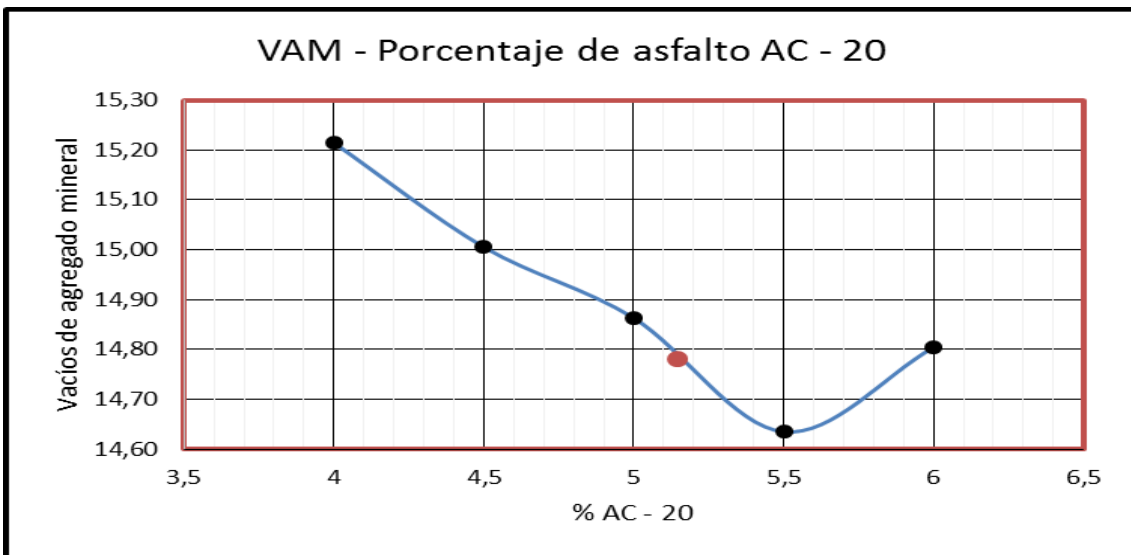
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gravedad específica de la mezcla compactada versus porcentaje de AC**



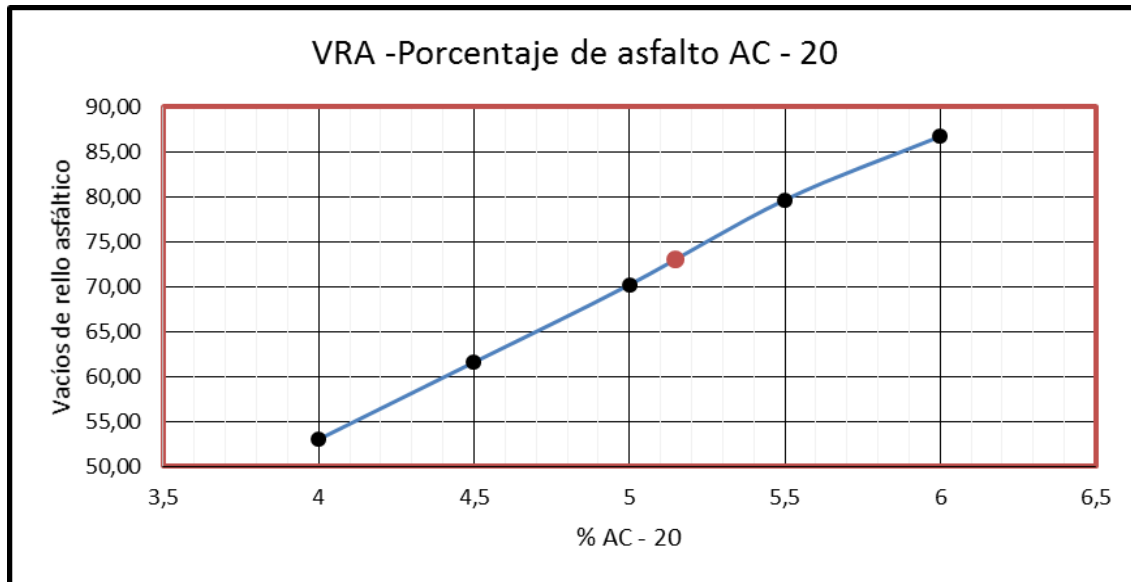
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Vacíos en agregado mineral versus porcentaje de AC**



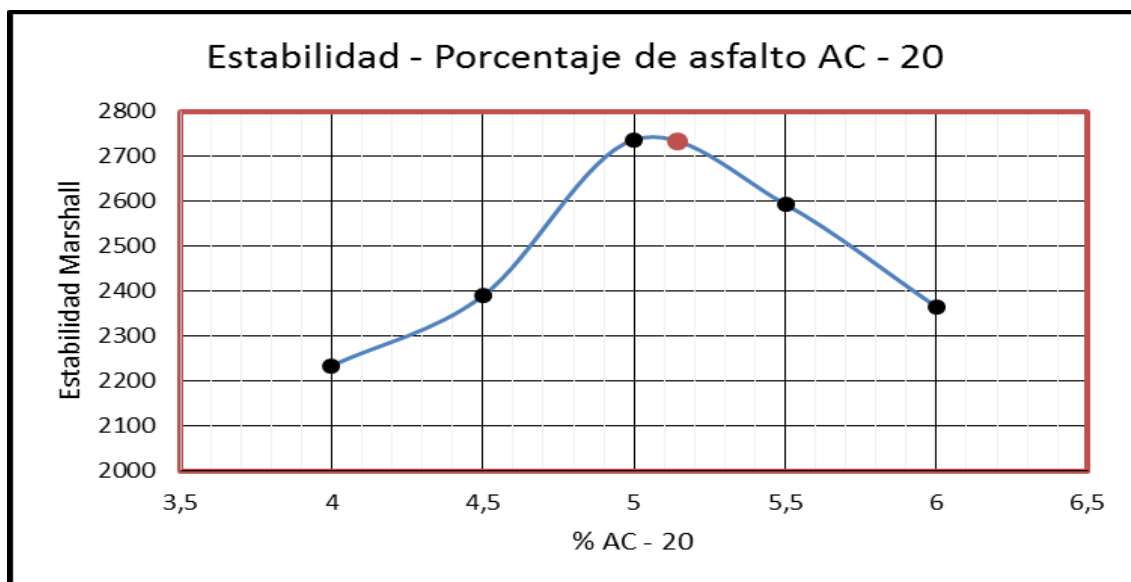
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Vacíos de relleno asfáltico *versus* porcentaje de AC



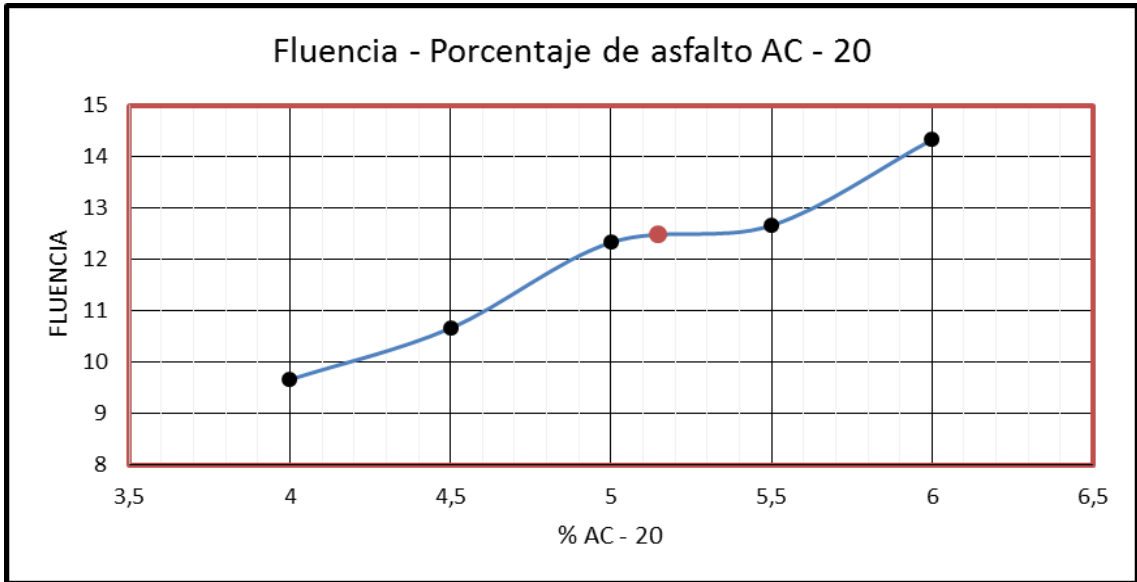
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Estabilidad *versus* porcentaje de AC



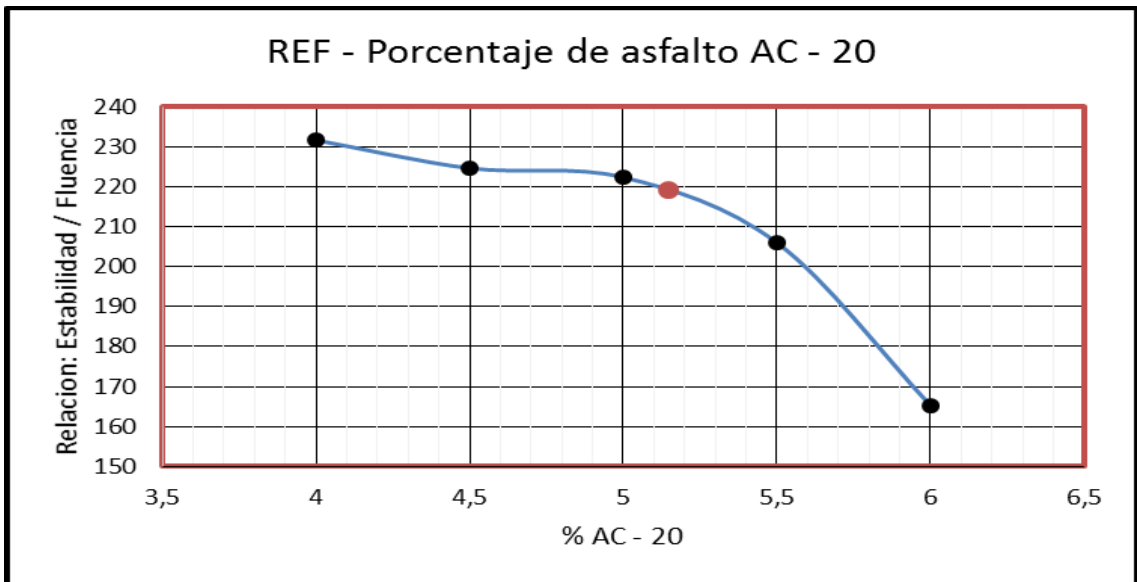
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Fluencia versus porcentaje de AC**



Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Relación estabilidad/fluencia versus porcentaje de AC**



Fuente: elaboración propia.

5.11.1. Análisis de resultados

De las gráficas anteriores se observan los resultados de cada parámetro en función de los puntos de porcentaje de asfalto en cada briqueta ensayada, los puntos negros indican los resultados de cada punto de porcentaje de asfalto propuesto y el punto de color naranja indica el punto óptimo de porcentaje de asfalto para la mezcla. Como se indicó anteriormente el punto de referencia fue el porcentaje de vacíos y en función al resultado de contenido óptimo de asfalto se calcularon los resultados de los demás parámetros.

- Vacíos

Según la tendencia de la gráfica vacíos de aire – porcentaje de AC - 20, se puede observar que a mayor cantidad de asfalto en la mezcla el porcentaje de vacíos es menor y viceversa.

- Gravedad específica de la mezcla compactada Gmb

La gravedad específica de la mezcla compactada aumenta con la cantidad de asfalto presente en la mezcla.

- Vacíos de agregado mineral VAM

A modo que se incrementa la cantidad de asfalto en la mezcla, los vacíos de agregado mineral disminuyen hasta llegar a un 5,5 por ciento de asfalto y a partir de ese punto tiende a aumentar.

- Vacíos de relleno asfáltico VRA

Los vacíos de relleno asfáltico son directamente proporcionales a la cantidad de asfalto en la mezcla, a mayor cantidad de asfalto mayor vacío de relleno asfáltico.

- Estabilidad y fluencia

La resistencia máxima de carga de la mezcla depende del contenido óptimo de asfalto, ya que si la mezcla contiene bajo contenido asfáltico la mezcla presenta una baja estabilidad, como también si la mezcla contiene un alto porcentaje de asfalto mayor al óptimo, esta se vuelve muy flexible.

El valor de la fluencia es un valor que tiende a ser lineal en función al porcentaje de asfalto en la mezcla, y está relacionada directamente con ésta, ya que a mayor cantidad de asfalto, mayor fluencia presenta la mezcla.

- Porcentaje de asfalto óptimo

Según los resultados para que la mezcla tenga el punto óptimo de 4 por ciento de vacíos es necesario dosificarla con 5,15 por ciento de AC – 20 (Cemento asfáltico).

Con estos resultados se cumplen con los aspectos requeridos para una mezcla asfáltica en caliente diseñada con el Método Marshall.

CONCLUSIONES

1. Es importante que el estudiante cuente con un manual práctico de ensayos, ya que a través de las pruebas de control de calidad se conocen los tipos, características y parámetros de las mezclas asfálticas en caliente y de este modo poder evaluar la calidad de la mezcla utilizadas en el campo de trabajo.
2. Es importante que el estudiante conozca los parámetros de calidad de las mezclas asfálticas, ya que de esto depende su funcionalidad al momento de su colocación y prolongar su vida útil de servicio.
3. Las condiciones ambientales como la temperatura son factores que influyen directamente en los resultados de los ensayos efectuados en el laboratorio, por lo que el estudiante debe conocer las correcciones necesarias para que los resultados sean los más precisos posibles.
4. Los resultados de cada ensayo debe cumplir con los parámetros establecidos en las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes* de la Dirección General de Caminos de Guatemala, de lo contrario la mezcla debe ser rechazada por el delegado residente.
5. Cualquier cambio de material utilizado en la mezcla puede alterar los resultados de diseño, por lo que se debe realizar un diseño nuevo y así mantener la calidad de la mezcla asfáltica.

6. Este manual puede ser una herramienta para la implementación del laboratorio del curso de Pavimentos y Mantenimiento de Carreteras, o para la implementación de ensayos en concreto asfáltico en caliente en el laboratorio del curso de Materiales de Construcción.

RECOMENDACIONES

1. Al momento de la realización de los ensayos de control de calidad es necesario contar con los equipos adecuados y calibrados para que los resultados obtenidos sean los más precisos posibles.
2. La mezcla asfáltica en caliente es trabajada a altas temperaturas por lo que se debe utilizar equipo de protección personal.
3. Tomar en cuenta cada parámetro de cada ensayo, para así comparar los resultados de cada ensayo efectuado, ya que todos los ensayos deben cumplir con una especificación en particular.
4. Es de mucha importancia fraccionar en cuatro partes iguales la mezcla asfáltica, para que la distribución de partículas de los agregados sean lo más homogéneo posible y de este modo poder evitar la segregación que puedan alterar la graduación granulométrica de la mezcla.
5. Es necesario conocer la temperatura de compactación de la mezcla, ya que de esto depende que la mezcla compactada quede muy abierta o cerrada por la cantidad de vacíos en la mezcla.
6. Realizar el control de calidad de una mezcla asfáltica por cada 500 toneladas cortas de producción en planta tal como lo especifica la Dirección General de Caminos.

BIBLIOGRAFÍA

1. AVELLAN CRUZ, Martha Dina. *Asfaltos modificados con polímeros*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 125 p.
2. CASTANEDA SIETE, César Arturo; ESCOBAR AGUILAR, Guillermo Antonio; LÓPEZ LEMUS, Luis Antonio. *Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2001. 228 p.
3. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda República de Guatemala. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Ingenieros Consultores de Centro América S.A. septiembre 2001. 724 p.
4. ELE. International. *Equipos para el ensayo de materiales de construcción*. Edición 5. 280 p.
5. LEÓN FAJARDO, José Luis. *Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 88 p.

6. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Material para pavimentos. *Materiales asfálticos, aditivos y mezclas*. Normativa para la infraestructura del transporte. México.

7. THE ASPHALT INSTITUTE. *Manual de asfalto*. Velásquez, Manuel (trad.). España: Ediciones URMO, 1973. 477 p. ISBN: 84-314-0087-0

ANEXOS

1. Resultado de análisis de laboratorio de la caracterización del cemento asfáltico convencional AC-20



Perenco Guatemala Limited

5ª Av. 5-55 Zona 14, Torre 4, Nivel 12 Edificio Europlaza
PBX (502) 2384-6100 FAX (502) 2384 - 6192 (502) 2384 - 6196

RESULTADO DE ANALISIS DE LABORATORIO

Certificado No. 15670DE488

PRODUCTO:	ASFALTO
ESPECIFICACIÓN:	AC-20 [ASTM D 3381]
FECHA:	Septiembre 10 de 2,014
HORA:	16:40
TANQUE:	4
LOTE:	081 - 2,014

AC-20

ANALISIS	RESULTADO	ESPECIFICACION ASTM D 3381 TABLA 2	METODO ASTM
GRAVEDAD ESPECIFICA, 60°F,	1.062	N.E.	D 70
PESO (Lbs/Gal)	8.738	N.E.	D 70
GRAVEDAD ESPECIFICA, 77°F,	1.058	N.E.	D 70
PENETRACION, 77°F, 100g, 5 seg.	82	60 min.	D 5
VISCOSIDAD, 140°F, POISES	1,839	2,000 ± 400	D 2171
VISCOSIDAD, 275°F, cSt.	419	300 min.	D 2170
FLASH POINT, COC, °F	510	450 min.	D 92
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, °F	113	N.E.	D 36
SOLUBILIDAD EN TCE, %	99.9	99.0 min.	D 2042
ENSAYOS AL RESIDUO TFOT			D 1754
VISCOSIDAD, 140°F, POISES	5,943	10,000 max.	D 2171
DUCTILIDAD, 77°F, 5 cm/minuto	>100	50 min.	D 113
VTS	3.44	**	

* min. = mínimo
max. = máximo
N.E. = No Especifica
** Dato Calculado sin especificación ASTM, para uso exclusivo del interesado.

Firma del representante de Perenco: 
Nombre: **Fredy D. Barrios O.**

LABORATORIO REFINERIA LA LIBERTAD
2384-6100 Ext. 111 La Libertad, Petén
e-mail: laboratoriolibertad@gt.perenco.com

Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

2. Gráfico de análisis de viscosidad *versus* temperatura



Perenco Guatemala Limited

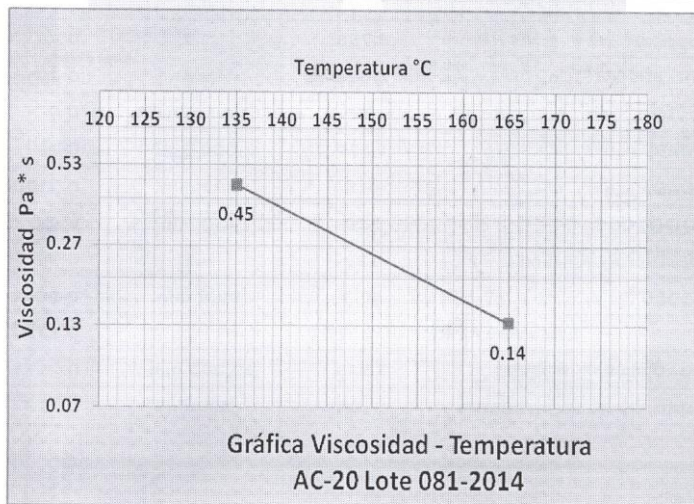
5ª Av. 5-55 Zona 14, Torre 4, Nivel 12 Edificio Europlaza
PBX (502) 2384-6100 FAX (502) 2384 - 6192 (502) 2384 - 6196

RESULTADO DE ANALISIS DE LABORATORIO

Certificado No. 15670DE488

PRODUCTO:	ASFALTO
ESPECIFICACION:	AC-20 [ASTM D 3381]
METODO DE ENSAYO:	AASHTO T-316
VISCOSIMETRO:	DV-II +
VASTAGO	21
RPM	20
FECHA:	Septiembre 10 de 2,014
HORA:	16:40
TANQUE:	4
LOTE:	081 - 2,014

AC-20



Firma del representante de Perenco: 
Nombre: **Fredy D. Barrios O.**

LABORATORIO REFINERIA LA LIBERTAD
2384-6100 Ext. 111 La Libertad, Petén
e-mail: laboratoriolibertad@gt.perenco.com

Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

3. Resultado de desgaste de agregados utilizados para el diseño de mezcla asfáltica

MALLA		PESO DE LOS TAMAÑOS INDICADOS (gr)						
Pasa	Retenido	GRADO "A" (12)	GRADO "B" (11)	GRADO "C" (8)	GRADO "D" (6)	GRADO "E" (12)	GRADO "F" (12)	GRADO "G" (12)
3"	2 1/2"					2500 +/- 50		
2 1/2"	2"					2500 +/- 50		
2"	1 1/2"					5000 +/- 50	5000 +/- 50	
1 1/2"	1"	1250 +/- 25					5000 +/- 25	5000 +/- 25
1"	3/4"	1250 +/- 25						5000 +/- 25
3/4"	1/2"	1250 +/- 25	2501					
1/2"	3/8"	1250 +/- 25	2499					
3/8"	1/4"			2500				
1/4"	Nº 4			2500				
Nº 4	Nº 8				5000			
TOTALES		5000 +/- 10	5000	5000	5000	10000 +/- 100	10000 +/- 75	10000 +/- 50
Peso del Material Retenido en el Tamiz Nº 12			4157	3973	3940			
Peso del Material Pasante el Tamiz Nº 12			843	1027	1060			
DESGASTE (%)			16.9	20.5	21.2			
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO:								
OBSERVACIONES: PROMEDIO 19.53								

Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.

4. Resultados de las gravedades específicas integradas de los agregados utilizados para el diseño de mezcla asfáltica



PROEQUIPOS S.A.

53 calle 22-08 zona 12

PBX 24793021

GRAVEDAD ESPECIFICA INTEGRADA

DISEÑO TIPO D (19 mm) 3/4"	
50%Agreg.1/2" a 0" AGRECA PPO	
15%Agreg.3/8"# 8 AGRECA PPO	
20%Agreg. 3/4" Especial AGRECA PPO	
15%Agreg. 1" No. 56 AGRECA PPO	
Fecha: 07 de agosto 2,014	
Gravedad específica Bruta de los agregados Gsb.	
<input type="text" value="2.6637"/>	
Gravedad específica Bruta superficie seco saturado Gsb (sss)	
<input type="text" value="2.6793"/>	
Gravedad específica Efectiva de los agregados Gse	
0.6 Factor K.	<input type="text" value="2.6890"/>
Gravedad específica Aparente de los agregados Gsa	
<input type="text" value="2.7059"/>	
% de Absorción de agua de los agregados Pwa.	
<input type="text" value="0.59"/>	

Fuente: Laboratorio Proequipos S. A.