



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

**EFFECTOS DE LA HUMEDAD EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
UTILIZANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA**

Darlin Andrea Pereda Galvez

Asesorado por el Ing. José Juan Istupe Ibáñez

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTOS DE LA HUMEDAD EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
UTILIZANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DARLIN ANDREA PEREDA GALVEZ
ASESORADO POR EL ING. JOSE JUAN ISTUPE IBAÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
EXAMINADORA	Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
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:

EFFECTOS DE LA HUMEDAD EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE UTILIZANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 03 de julio de 2020.

Darlin Andrea Pereda Galvez



Guatemala, 10 de octubre de 2022

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles

Universidad de San Carlos de Guatemala

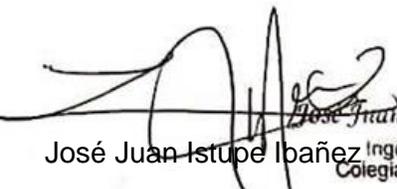
Guatemala

Estimado Ingeniero Montenegro:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado **“EFECTOS DE LA HUMEDAD EN EL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE UTILIZANDO EL ENSAÑO DE TRACCIÓN INDIRECTA”** elaborado por la estudiante Darlin Andrea Pereda Gálvez con registro académico 201202779, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son responsables de lo trabajado y las conclusiones del mismo.

Atentamente,



José Juan Istupe Ibañez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 16089
Ingeniero Civil Colegiado No. 16089



Guatemala, 19 de octubre de 2,022

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación “EFECTOS DE LA HUMEDAD EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE UTILIZANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA”, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil, Darlin Andrea Pereda Gálvez, quién contó con la asesoría del Ing. José Juan Istupe Ibáñez.

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



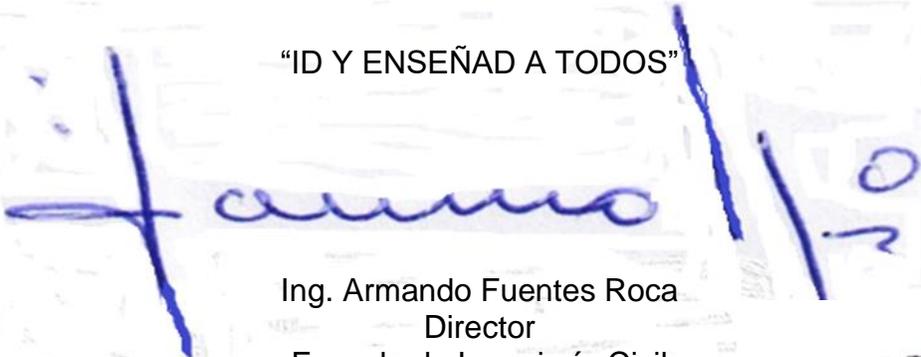
Ing. Civil Hugo Leonel Montenegro Franco
Jefe de área de materiales y construcciones civiles.



LNG.DIRECTOR.223.EIC.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **EFFECTOS DE LA HUMEDAD EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE UTILIZANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA**, presentado por: **Darlin Andrea Pereda Galvez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil



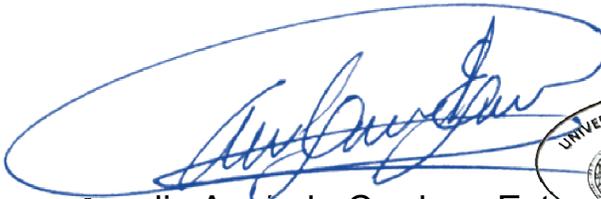
Guatemala, noviembre de 2022



LNG.DECANATO.OI.746.2022

La Decana 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: **EFFECTOS DE LA HUMEDAD EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE UTILIZANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA**, presentado por: **Darlin Andrea Pereda Galvez**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre

Miriam Neulina Gálvez Aguilar, por ser mi pilar, mi fuente de inspiración y mi constante motivación para seguir adelante.

Mi abuela materna

Yolanda Aguilar, por ser mi guía durante toda mi niñez. Dedicado a su memoria.

Mi familia

Por ser fieles animadores de los logros obtenidos a lo largo de mi vida y estar al pendiente de mi bienestar, especialmente a mi tía Dora Marina Aguilar y a mi tío Juan Carlos Pereda.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma máter y brindarme la posibilidad de seguir con mi crecimiento académico.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos que actualmente me permiten desempeñar una carrera profesional.
Colegio La Asunción	Por forjarme como mujer de temple y brindarme los conocimientos básicos que posibilitaron un mejor desempeño en mis actividades diarias.
Mis amigos de la Facultad	Por el apoyo recibido y abrir las puertas de sus hogares cuando me fue necesario, especialmente a Carlos Abad, Marcela Méndez, Otto Calderón, Rodrigo Solís, Noé Ren, Jorge Aldana, Gabriela Recinos y Miguel Durán.
Profesionales en la materia	Por ser fuente de inspiración y alentarme a seguir adelante, especialmente a Ing. José Istupe, Ing. José Quemé e Ing. Nicolás Guzmán.

Mis amigos

Jessica Santos, Marcela Reyes, Estefani Quesada, Luis Téllez, Andy Solares, Elías Domínguez y Andoni Lique, por el apoyo y cariño incondicional a través de todos estos años de amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Mezcla asfáltica	1
1.1.1. Capas o superficies de rodadura	2
1.1.2. Capas interiores o intermedias de un pavimento.....	4
1.2. Mezcla asfáltica en caliente	4
1.2.1. Mezclas asfálticas en caliente cerradas	7
1.2.2. Mezclas asfálticas en caliente semicerradas.....	7
1.3. Agregados en mezclas asfálticas.....	7
1.3.1. Requerimientos establecidos por las normas para el agregado grueso	8
1.3.2. Requerimientos establecidos por las normas para el agregado fino	9
1.3.2.1. Especificaciones para agregado fino en mezclas de pavimentos bituminosos, según AASHTO M 29	9
1.3.3. Granulometría de agregados combinados (finos y gruesos).....	11
1.4. Material bituminoso.....	12

1.4.1.	Requerimientos establecidos por las normas	14
1.5.	Características y comportamiento de la mezcla	18
1.5.1.	Densidad	18
1.5.2.	Vacíos de aire (o simplemente vacíos)	19
1.5.3.	Vacíos en el agregado mineral	20
1.5.4.	Contenido de asfalto.....	21
1.6.	Propiedades consideradas en el diseño de mezclas	23
1.6.1.	Estabilidad.....	23
1.6.2.	Durabilidad	25
1.6.3.	Impermeabilidad	27
1.6.4.	Trabajabilidad.....	28
1.6.5.	Flexibilidad	30
1.6.6.	Resistencia a la fatiga	31
1.6.7.	Resistencia al deslizamiento	32
1.7.	Antecedentes	33
1.7.1.	Experiencias extranjeras: española	34
1.7.2.	Experiencia extranjera: argentina	36
1.7.3.	Experiencia extranjera: chilena.....	38
1.7.4.	Conclusiones de las experiencias extranjeras	39
2.	ENSAYO DE DISEÑO DE TRACCIÓN INDIRECTA	41
2.1.	Ensayo de tracción indirecta	41
2.1.1.	Descripción del ensayo de tracción indirecta	41
2.1.1.1.	Distribución teórica de tensiones	44
2.1.1.2.	Alcances del ensayo.....	46
2.1.1.3.	Especificaciones del ensayo.....	46
2.1.1.4.	Normas regentes	48
2.1.2.	Procedimiento del ensayo de tracción indirecta.....	49
2.2.	Ensayo de diseño Marshall	50

2.2.1.	Metodología del diseño	52
2.2.2.	Preparación para efectuar los procedimientos Marshall	52
2.2.2.1.	Selección de las muestras de material	52
2.2.2.2.	Preparación del agregado	53
2.2.2.2.1.	Secado el agregado	53
2.2.2.2.2.	Análisis granulométrico por vía húmeda	54
2.2.2.2.3.	Determinación del peso específico	55
2.2.2.3.	Preparación de las muestras (probetas) de ensayo	55
2.2.3.	Procedimientos del ensayo Marshall.....	56
2.2.3.1.	Determinación del peso específico total	56
2.2.3.2.	Ensayos de estabilidad y fluencia.....	57
2.2.3.3.	Valor de estabilidad Marshall	57
2.2.3.4.	Valor de fluencia Marshall	58
2.2.3.5.	Análisis de densidad y vacíos	58
2.2.3.5.1.	Análisis de vacíos.....	59
2.2.3.5.2.	Análisis de peso unitario	59
2.2.3.5.3.	Análisis de VMA	59
2.2.3.5.4.	Análisis de VFA.....	60
2.2.4.	Normas regentes	60
2.2.5.	Limitaciones del ensayo Marshall	60

3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	65
3.1.	Ensayos realizados para el diseño Marshall.....	65
3.1.1.	Granulometría	65
3.1.2.	Gravedad específica de Bulk.....	67
3.1.2.1.	Procedimiento para determinar los valores.....	67
3.1.2.2.	Memoria de cálculo.....	67
3.1.2.3.	Resultados obtenidos	69
3.1.3.	Gravedad específica bruta de los agregados.....	70
3.1.3.1.	Procedimiento para determinar los valores.....	70
3.1.3.2.	Muestra de cálculo.....	71
3.1.3.3.	Resultados obtenidos	72
3.1.4.	Gravedad específica teórica máxima Rice.....	72
3.1.4.1.	Procedimiento para determinar los valores.....	72
3.1.4.2.	Muestra de cálculo.....	73
3.1.4.3.	Resultados obtenidos	74
3.1.5.	Gravedad específica efectiva de los agregados	75
3.1.5.1.	Procedimiento para determinar los valores.....	75
3.1.5.2.	Muestra de cálculo.....	75
3.1.5.3.	Resultados obtenidos	77
3.1.6.	Peso unitario de la mezcla asfáltica.....	77
3.1.6.1.	Procedimiento para determinar los valores.....	77
3.1.6.2.	Muestra de cálculo.....	78
3.1.6.3.	Resultados obtenidos	79
3.1.7.	Porcentaje de vacíos-densidad.....	79

3.1.7.1.	Procedimiento para determinar los valores	79
3.1.7.2.	Muestra de cálculo	80
3.1.7.3.	Resultados obtenidos.....	81
3.1.8.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral	82
3.1.8.1.	Procedimiento para determinar los valores	82
3.1.8.2.	Muestra de cálculo	83
3.1.8.3.	Resultados obtenidos.....	84
3.1.9.	Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico.....	85
3.1.9.1.	Procedimiento para determinar los valores	85
3.1.9.2.	Muestra de cálculo	86
3.1.9.3.	Resultados obtenidos.....	87
3.1.10.	Relación de relleno mineral/asfalto	88
3.1.10.1.	Procedimiento para determinar los valores	88
3.1.10.2.	Muestra de cálculo	89
3.1.10.3.	Resultados obtenidos.....	91
3.1.11.	Contenido de humedad.....	93
3.1.11.1.	Procedimiento para determinar los valores	93
3.1.11.2.	Muestra de cálculo	93
3.1.11.3.	Resultados obtenidos.....	94
3.1.12.	Prueba de estabilidad – flujo Marshall.....	95
3.1.12.1.	Equipo por utilizar	95
3.1.12.2.	Procedimientos para determinar los valores	96

	3.1.12.3.	Muestra de cálculo.....	96
	3.1.12.4.	Resultados obtenidos	97
3.2.		Ensayos realizados para evaluar la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas utilizando la prueba de tracción indirecta	99
	3.2.1.	Equipo por utilizar	99
	3.2.2.	Procedimiento por seguir	100
	3.2.2.1.	Gravedad específica Bulk	100
	3.2.2.2.	Volumen de cada espécimen.....	100
		3.2.2.2.1. Resultados obtenidos .	101
	3.2.2.3.	Volumen de vacíos con aire en los especímenes	102
		3.2.2.3.1. Resultados obtenidos .	103
	3.2.2.4.	Volumen de agua absorbida	104
		3.2.2.4.1. Resultados obtenidos .	106
	3.2.2.5.	Grado de saturación	106
		3.2.2.5.1. Resultados obtenidos .	108
	3.2.2.6.	Resistencia a la tensión	108
		3.2.2.6.1. Resultados obtenidos .	110
	3.2.2.7.	Relación de resistencia a la tensión...	112
		3.2.2.7.1. Resultados obtenidos .	114
		CONCLUSIONES	115
		RECOMENDACIONES	117
		BIBLIOGRAFÍA	119
		APÉNDICES	121
		ANEXOS	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica.....	2
2.	Productos y temperaturas típicas de destilación.....	13
3.	Requisitos para cemento asfáltico graduado por viscosidad (AASHTO M 226)	15
4.	Requisitos para cemento asfáltico graduado por la viscosidad del residuo de la prueba de película delgada en horno rotatorio (AASHTO M 226)	16
5.	Diagrama de la prueba de penetración.....	17
6.	Sistema de clasificación por penetración (AASHTO M 20).....	17
7.	Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada	20
8.	Vacios en el agregado mineral (requisitos de VMA)	21
9.	Causa y efectos de inestabilidad en el pavimento	25
10.	Causas y efectos de un poco durabilidad	27
11.	Causas y efectos de la permeabilidad	28
12.	Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad.....	30
13.	Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga	31
14.	Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento	33
15.	Variación de la resistencia a tracción con la temperatura de ensayo....	38
16.	(a) Configuración de la carga y (b) rotura del ensayo de tracción indirecta	42
17.	Distribución de tensiones teórica sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta	45

18.	Ejemplo de gráficas para los resultados de una serie de cinco probetas Marshall	62
19.	Criterios del Instituto del Asfalto (USA) para el diseño Marshall.....	63
20.	Porcentaje mínimo de VMA	64
21.	Curva granulométrica.....	66
22.	Resultados de gravedad específica de Bulk	70
23.	Resultados de porcentaje de vacíos – densidad	82
24.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral	85
25.	Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico ...	88
26.	Resultados de estabilidad Marshall.....	98
27.	Resultados de flujo Marshall	99

TABLAS

I.	Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas.....	4
II.	Requerimientos de graduación para agregados finos.	10
III.	Rango de valores para graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico en caliente	12
IV.	Granulometría ideal	66
V.	Resultados de gravedad específica de Bulk	69
VI.	Resultados de gravedad específica bruta de los agregados	72
VII.	Resultado de gravedad específica teórica máxima Rice	74
VIII.	Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados	77
IX.	Resultados de peso unitario de la mezcla.....	79
X.	Resultados de porcentaje de vacíos – densidad	81
XI.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral	84
XII.	Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico	87
XIII.	Resultados de porcentaje de ligante asfáltico absorbido.....	92

XIV.	Resultados de porcentaje de cemento asfáltico efectivo	92
XV.	Resultados de relación de relleno mineral/asfalto.....	92
XVI.	Resultados de contenido de humedad	95
XVII.	Resultados de estabilidad – flujo Marshall.....	98
XVIII.	Resultado de volumen de cada espécimen	102
XIX.	Resultados de volumen de vacíos de aire	104
XX.	Resultados de volumen de agua absorbida.....	106
XXI.	Resultados de grado de saturación	108
XXII.	Resultados de resistencia a la tensión de los especímenes ensayados en seco	111
XXIII.	Resultados de resistencia a la tensión de los especímenes ensayados bajo efecto del agua	112
XXIV.	Resultados de relación de resistencia a la tensión	114

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Cemento asfáltico.
cm	Centímetro.
Deflt	Deformación igual a 0,0001”.
d	Diámetro.
°C	Grados centígrados.
°F	Grados Farenheit.
g	Gramo.
Gsb	Gravedad específica bruta de los agregados.
Gmb	Gravedad específica Bulk.
Gfino	Gravedad específica del agregado fino.
Ggrueso	Gravedad específica del agregado grueso.
Gac	Gravedad específica del ligante asfáltico.
Gse	Gravedad específica efectiva de los agregados.
Gmm	Gravedad específica teórica máxima Rice.
hr	Hora.
kN	KiloNewton.
Kg	Kilogramo.
Kgf	Kilogramo – fuerza.
Lb	Libra.
Lbf	Libra – fuerza.
Max	Máximo.
m	Metro.
um	Micrómetro.

mm	Milímetro.
min	Minuto.
PU	Peso unitario.
Ft	Pie.
%	Porcentaje.
%H	Porcentaje de humedad.
%Pba	Porcentaje de ligante asfáltico absorbido.
%Pbe	Porcentaje de ligante asfáltico efectivo.
%VA	Porcentaje de vacíos – densidad.
%VAM	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.
%VFA	Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico.
Plg	Pulgada.
IRI	Regularidad superficial.
RRT	Relación de resistencias a la tensión.
F/A	Relación de relleno mineral / asfalto.
RTH	Resistencia a la tensión del subgrupo acondicionado al agua.
RTS	Resistencia a la tensión del subgrupo mantenido en seco.
Vwa	Volumen de agua absorbida.

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes).
Abrasión	Acción mecánica de rozamiento de dos superficies la una contra la otra que ocasiona la erosión y desgaste (ruptura de partículas) de una o de ambas superficies.
Absorción	Es la masa de agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado, sin incluir el agua adherida a la superficie de estas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado después de secado a 110 ± 5 °C.
Agregado	Material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente.
Agregado fino	Agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (No. 4).
Agregado grueso	Agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (No. 4).
Álcalis	Son sustancias químicas producidas a partir de metales alcalinos (elementos corrientes como el potasio, sodio, calcio y magnesio).

ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
Asfalto	Sustancia de color negro que procede de la destilación del petróleo crudo, se encuentra en grandes depósitos naturales y se utiliza frecuentemente para pavimentar carreteras.
Bitumen	Un tipo de sustancia cementante de color negro u oscuro (sólida, semisólida o viscosa), natural o fabricada, compuesta principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, siendo típicos los asfaltos, las breas (o alquitranes), los betunes y las asfálticas.
Briqueta	Mezcla asfáltica compactada en moldes cilíndricos.
Cemento asfáltico	Un asfalto con flujo o sin flujo, especialmente preparado en cuanto a calidad y consistencia para ser usado directamente en la producción de pavimentos asfálticos.
Cohesión	Propiedad que conserva a un cuerpo sólido en su forma, para resistir a las aplicaciones de fuerzas externas.
Compactación	El acto de comprimir un volumen dado de material en un volumen más pequeño.

Concreto asfáltico	Una mezcla en caliente, muy bien controlada, de cemento asfáltico (de alta calidad) y agregado bien gradado (también de alta calidad), compactada muy bien para formar una masa densa y uniforme.
Consistencia	Describe el grado de fluidez o plasticidad de un cemento asfáltico a determinada temperatura.
Densidad	El grado de solidez que puede alcanzarse en una mezcla dada y que solo está limitado por la eliminación total de los vacíos que se encuentran entre las partículas de la masa.
Estabilidad	La habilidad de una mezcla asfáltica de pavimentación de resistir deformación bajo las cargas impuestas.
Fatiga	Es la situación en la que se encuentran distintas piezas sometidas a cargas cíclicas cuya intensidad posee un valor inferior al crítico de rotura del material.
Filler	Son sustancias finamente divididas, las cuales son insolubles en asfalto pero que pueden ser dispersadas en este, como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia.
Fluencia	Deformación que sufre la probeta al ser sometida bajo la carga de estabilidad Marshall.

Granulometría	Propiedad más característica del suelo. Estudia la distribución de las partículas que conforman un suelo según su tamaño.
Hidrocarbonato	Carbonato que contiene agua en combinación.
HMA	<i>Hot mix asphalt.</i>
MAC	Mezcla asfáltica en caliente. Consiste en una mezcla de cemento asfáltico con agregados, que cumple con granulometría fabricada en planta.
NLT	Normas del Laboratorio del Transporte.
Oxidación	Reacción química que se produce cuando una sustancia entra en contacto con el oxígeno o cualquier otra sustancia oxidante.
Penetración	La consistencia de un material bituminoso expresada como la distancia en décimas de milímetro (0,1 mm), que una aguja patrón penetra verticalmente en una muestra de material, bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura.
Picnómetro	Instrumento de medición que se utiliza para determinar el peso específico o densidad de un fluido.
Plasticidad	Es la capacidad que tiene el cerebro para alterar sus propiedades biológicas, químicas y físicas.

Polimerización	Es un proceso químico por el que los reactivos monómeros se agrupan químicamente entre sí, dando lugar a una molécula de gran peso, llamada polímero, o bien una cadena lineal o una macromolécula tridimensional. Pueden formarse por adición o condensación.
Polvo mineral	La porción del agregado fino que pasa por el tamiz No. 200.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para un estudio determinado del material del que está constituido.
Tamiz	Aparato, en un laboratorio, usado para separar tamaños de material, y donde las aberturas son cuadradas.
Viscosidad	Característica del fluido mediante la cual ofrece resistencia al esfuerzo de corte. Es un método usado para medir la consistencia del asfalto.

RESUMEN

El método Marshall es una prueba de laboratorio destinada a diseñar mezclas asfálticas mediante el análisis de la estabilidad, la fluencia, la densidad y los vacíos, dando como resultado una mezcla adecuada a las condiciones a las que está prescrita para el área en que va a ser utilizada. Por su parte, el ensayo de tracción indirecta muestra resultados complementarios estableciendo el potencial del daño por humedad que sufre la mezcla asfáltica, que es el principal objetivo del presente documento.

En el capítulo uno se describen las generalidades de las mezclas asfálticas, considerando los conceptos de agregados pétreos, el material bituminoso, las características y comportamientos principales de las mezclas, así como los antecedentes de las mezclas asfálticas y una breve reseña de las experiencias con los ensayos aplicados a las mezclas asfálticas en distintos países, tales como España, Argentina y Chile.

En el capítulo dos se conceptualiza el ensayo de tracción indirecta y el procedimiento requerido para obtener los resultados deseados. Asimismo, se exponen los antecedentes del método Marshall y las especificaciones de la metodología a implementar para el mismo.

En el capítulo tres se desglosa el desarrollo experimental y el análisis de los resultados de cada ensayo de laboratorio, respectivamente, planteados en cuadros y gráficas, para dar paso a la explicación de las conclusiones junto con las recomendaciones a las cuales se llega en este trabajo.

OBJETIVOS

General

Determinar los efectos de la humedad en el diseño de mezcla asfáltica en caliente, utilizando la metodología del ensayo de tracción indirecta para obtener parámetros mecánicos complementarios a los resultados obtenidos en el diseño Marshall.

Específicos

1. Comparar el efecto de la humedad en mezclas asfálticas interactuando con el porcentaje de bitumen y el porcentaje de vacíos.
2. Establecer y analizar la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica utilizando los porcentajes óptimos obtenidos.
3. Evaluar la importancia y la precisión del ensayo de tracción indirecta para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente en comparación con el diseño Marshall.

INTRODUCCIÓN

El ensayo de tracción indirecta se destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla justo antes de quebrarse. Actualmente es un ensayo ampliamente utilizado para medir la resistencia a tracción de las mezclas bituminosas.

La calidad de las mezclas asfálticas para pavimentos utilizados frecuentemente ha presentado un deterioro acelerado debido al efecto de la humedad por lluvias, provocando así la destrucción de estos. Esto ha ocasionado problemas de la carpeta de rodadura por el hecho de realizar trabajos de rehabilitación tempranos para brindar un mejor servicio a los usuarios de las vías. En Guatemala no se cuenta con una buena planificación de mantenimiento vial, razón por la cual muchas de las vías se encuentran en un muy mal estado, esta falta o carencia de administración obliga a que por lo menos desde el inicio las mezclas asfálticas se encuentren dentro de los parámetros otorgados por las normas regentes.

El propósito de esta investigación es la determinación de la resistencia a tracción indirecta en las mezclas bituminosas, ya que se obtienen parámetros mecánicos que pueden resultar sumamente útiles para evaluar la calidad del proceso constructivo de la capa asfáltica.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua del ligante. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.¹

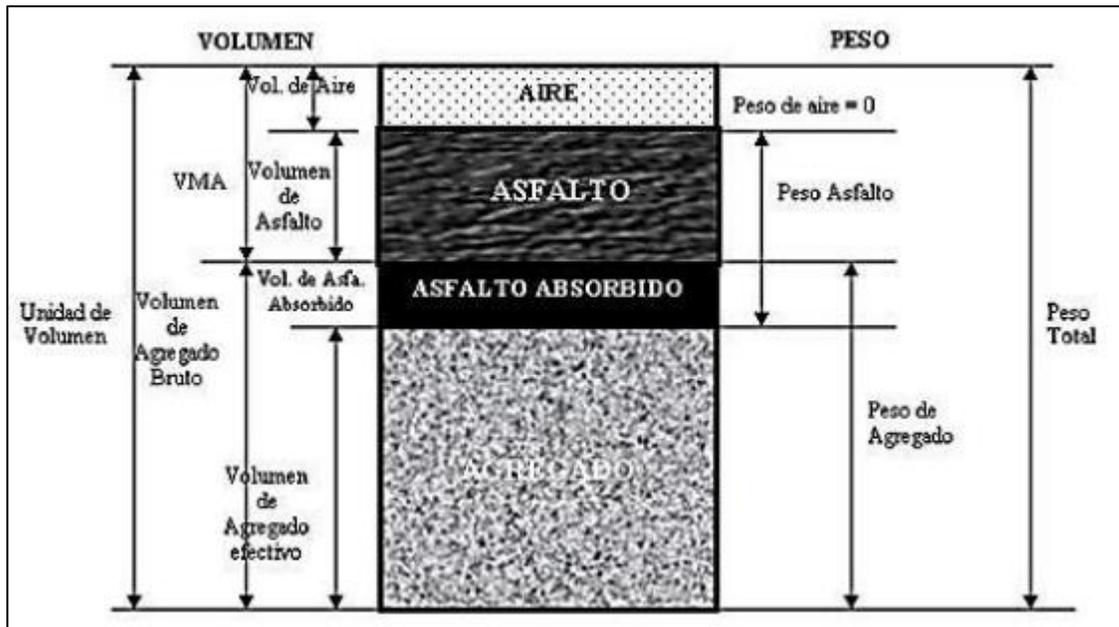
Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5 % de polvo mineral (filler) y otro 5 % de ligante asfáltico.²

Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

¹ KRAEMER, Carlos; PARDILLO, José María; ROCCI, Sandro; ROMANA, Manuel, SÁNCHEZ BLANCO, Víctor; DEL VAL, Miguel Ángel. *Ingeniería de carreteras vol. I*. p. 45.

² PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099,1/3334/34065-14.pdf?sequence=14>. Consulta: 20 de mayo de 2020.

Figura 1. **Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica**



Fuente: VELÁSQUEZ MAYÉN, Josué Ariel. *Rehabilitación de carreteras pavimentadas utilizando mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros*. p. 155.

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

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

1.1.1. Capas o superficies de rodadura

Las cualidades funcionales de un pavimento residen fundamentalmente en su superficie de rodadura, dado que es la que debe proporcionar una superficie segura, confortable y estética, así como reunir características de durabilidad,

rugosidad, permeabilidad, sonoridad y color, entre otras. Debido a que todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse y lograrse simultáneamente, hay que equilibrar las propiedades anteriores para llegar a las soluciones más satisfactorias, de acuerdo con las necesidades que se pretendan atender.

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

- Adherencia del neumático a la superficie de rodadura
- Desgaste de los neumáticos
- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo
- La comodidad y estabilidad en marcha
- La resistencia a la rodadura (consumo de combustible)
- Las propiedades ópticas

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

Tabla I. **Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas**

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

Fuente: RUIZ RUBIO, Aurelio. *Control de mezclas bituminosas en el borrador de la normativa CEN*. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1609>. Consulta: 10 de octubre de 2022.

1.1.2. **Capas interiores o intermedias de un pavimento**

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

1.2. **Mezcla asfáltica en caliente**

El concreto asfáltico (llamado mezcla asfáltica en caliente o simplemente HMA, *hot mix asphalt*), está compuesto de un ligante asfáltico y un agregado mineral. El ligante asfáltico, que puede ser un convencional o un modificado, actúa como un agente que aglutina las partículas en una masa cohesiva e

impermeabiliza la mezcla. El agregado mineral, ligado por el material asfáltico, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema.

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

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

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

El tipo de tránsito, la disponibilidad de materiales, aspectos climáticos y aspectos de seguridad, entre otros, han obligado a que las mezclas asfálticas en caliente sean clasificadas de diferentes formas de acuerdo con las propiedades que se les quiera otorgar.

“Comúnmente las mezclas asfálticas en caliente se clasifican en tres tipos, dependiendo primariamente en la distribución granulométrica de los agregados que la componen”.³

- Mezclas densas de granulometría continua (Dense Graded)
- Mezclas de granulometría abierta (Open Graded)
- Mezclas de granulometría discontinua (Gap Graded)

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento, determinando así características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla.

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

³ WELLMANN VON QUEDNOW, Werner Federico. *Diseño y construcción de mezclas asfálticas tipo SMA*. <http://biblio3.url.edu.gt/Tesis/2005/02/01/Wellmann-Werner.pdf>. Consulta 20 de mayo de 2020.

1.2.1. Mezclas asfálticas en caliente cerradas

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

1.2.2. Mezclas asfálticas en caliente semicerradas

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

1.3. Agregados en mezclas asfálticas

- Agregado grueso

Está formado fundamentalmente por gravas, gravas trituradas, piedra triturada, escoria de hornos de explosión, concreto de cemento hidráulico

triturado o una combinación de lo anterior. Se considera como el material retenido a partir del tamiz no. 4, para su buena utilización no deben ser demasiado porosos, ni de forma muy alargada.

- Agregado fino

Se determina como el material que pasa por el tamiz No. 4 hasta el tamiz No.100 y se clasifica en arena natural, de canto rodado o de río, manufacturada o combinación de ambas.

1.3.1. Requerimientos establecidos por las normas para el agregado grueso

Este material debe consistir en piedra o grava de buena calidad triturada (retenidos en la malla de 4,75 mm) y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos siguientes:

- Abrasión de los Ángeles: AASHTO T 96 40 % máx.
- Sanidad en sulfato de sodio (5 ciclos): AASHTO T 104 12 % máx.
- Caras fracturadas: ASTM D 5821 75 % mín.
- Índice durabilidad (agregado grueso): AASHTO T 210 35 % mín.

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

1.3.2. Requerimientos establecidos por las normas para el agregado fino

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra quebrada cernida o su combinación, y deberá tener una granulometría (material que pasa la malla 4,75 mm) en que, al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según AASHTO M 29, incluyendo la pérdida en sulfato, y que llene además los requisitos siguientes:

- Índice de durabilidad (fino), AASHTO T 210 35 % mín.
- Equivalente de arena, AASHTO T 176 45 % mín.

1.3.2.1. Especificaciones para agregado fino en mezclas de pavimentos bituminosos, según AASHTO M 29

La graduación del agregado fino será conforme a la graduación en la tabla 2 para el número de graduación especificado en la orden, u otra graduación designada por el comprador.

Tabla II. **Requerimientos de graduación para agregados finos**

Tamaño de tamiz		Cantidad más fina que cada tamiz de laboratorio (Aberturas cuadradas), Masa, %				
		Graduación No. 1	Graduación No. 2	Graduación No. 3	Graduación No. 4	Graduación No. 5
3/8"	9.5 mm	100	—	—	100	100
No. 4	4.75 mm	95 a 100	100	100	80 a 100	80 a 100
No. 8	2.36 mm	70 a 100	75 a 100	95 a 100	65 a 100	65 a 100
No. 16	1.18 mm	40 a 80	50 a 74	85 a 100	40 a 80	40 a 80
No. 30	600µm	20 a 65	28 a 52	65 a 90	20 a 65	20 a 65
No. 50	30µm	7 a 40	8 a 30	30 a 60	7 a 40	7 a 46
No. 100	150µm	2 a 20	0 a 12	5 a 25	2 a 20	2 a 30
No. 200	75µm	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 10	—

Fuente: Ministerio de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte. *Especificaciones técnicas de construcción*. p. 192.

- Límites de variabilidad en la graduación. Para continuar envíos de agregado fino de una fuente dada, el módulo de finura no variará más de 0,25 del módulo de finura base. El módulo base de finura será el valor que es típico de la fuente, y estará resuelto de pruebas previas, o si ninguna de las pruebas previas existe, del promedio de los valores del módulo de finura para las primeras 10 muestras (o todas las muestras precedentes si son menos de 10) en la orden. Si es necesario, el módulo de finura base puede ser cambiado cuando sea aprobado por el comprador.
- Índice de plasticidad. El índice de plasticidad de la fracción que pasa el tamiz de 425-µm (No. 40) no excederá de 4,0.

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

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

1.3.3. Granulometría de agregados combinados (finos y gruesos)

Consiste en la combinación de diferentes tamaños de agregado, que debe llenar los requisitos siguientes:

- Granulometría: Tabla 3.
- Grumos de arcilla y partículas friables: AASHTO T 112 1 % máx.
- Libre de materiales vegetales, basura, terrones de arcilla y sustancias deletéreas.

Tabla III. **Rango de valores para graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico en caliente**

Tamiz	Porcentaje de masa pasando, Designación de tamices (AASHTO T 27 y AASHTO T 11)					
	Designación de la Graduación					
	A	B	C	D	E	F
37.5 mm	100 ⁽¹⁾					
25.0 mm	97-100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾			
19.0 mm	—	97-100 ⁽¹⁾	97-100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	
12.5 mm	—	76-88(5)	*(5)	97-100 ⁽¹⁾	97-100 ⁽¹⁾	
9.50 mm	53-70(6)	—	*(6)	—	*(5)	100 ⁽¹⁾
4.75 mm	40-52(6)	49-59(7)	*(7)	57-69(6)	*(6)	33-47(6)
2.36 mm	25-39(4)	36-45(5)	*(5)	41-49(6)	*(6)	7-13(4)
600 µm	12-22(4)	20-28(4)	*(4)	22-30(4)	*(4)	—
300 µm	8-16(3)	13-21(3)	*(3)	13-21(3)	*(3)	—
75 µm	3-8(2)	3-7(2)	3-8(2)	3-8(2)	3-8(2)	2-4(2)

(1) Procedimientos estadísticos no aplican.
 * El contratante especifica el valor del rango y límites.
 () Desviación permisible (±) de el rango de valores.

Fuente: Ministerio de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte. *Especificaciones técnicas de construcción*. p. 192.

1.4. Material bituminoso

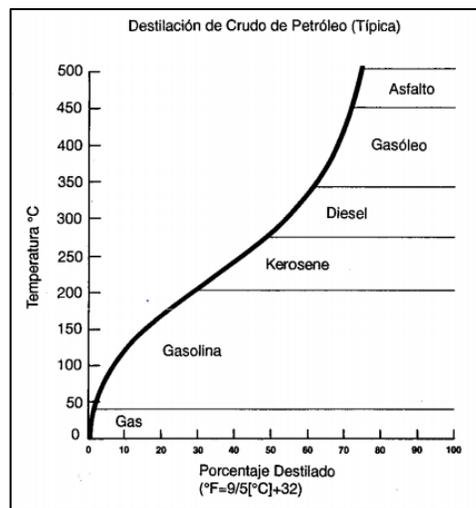
Es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción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

Es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. Es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto, y si se toman medidas, durante la construcción, para garantizar que el pavimento terminado sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento.

El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura.

Figura 2. **Productos y temperaturas típicas de destilación**



Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p.12.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. Como se indica en la figura 2, el

asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480 °C (900 °F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo de petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo.

1.4.1. Requerimientos establecidos por las normas

Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de bitumen para cubrir todas las partículas.

Las mezclas gruesas exigen menos bitumen debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0,075 mm) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de bitumen, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de *filler*, da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

Es así como los incrementos o disminuciones de *filler* causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de bitumen. Técnicamente se habla de dos tipos de bitumen al referirse al bitumen absorbido y el no absorbido: contenido total de bitumen y contenido efectivo de bitumen. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de bitumen de una mezcla.

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes. Ellos son: viscosidad, viscosidad después de envejecimiento y penetración. Cada

sistema abarca diferentes grados, cada uno con diferentes rangos de consistencia.

Figura 3. **Requisitos para cemento asfáltico graduado por viscosidad (AASHTO M 226)**

REQUISITOS PARA CEMENTO ASFALTICO CLASIFICADO POR VISCOSIDAD A 60° C (Clasificación basada en asfalto original)						
PRUEBA	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60° C, poises	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad, 135° C, Cs-minimo	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25° C, 100 g., 5 segundos-minimo	220	140	80	60	50	40
Punto Inflamador, Cleveland, ° C(°F)-minimo	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
Solubilidad en tricloroetileno, por ciento-minimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas sobre el residuo del ensayo TFO:						
Perdida por calentamiento, por ciento-maximo (opcional) ³		1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad, 60° C, poises-maximo	1000	2000	4000	8000	12000	16000
Ductilidad, 25° C, 5 cm por minuto, cm-minimo	100 ¹	100	75	50	40	25
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) ² con:						
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados					
Solvente de nafta-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados					
Solvente de heptano-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados					

¹ Si la ductilidad es menor que 100, el material sera aceptado si la ductilidad a 15.6° C tiene un valor/minimo de 100.
² El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberra especificar el tipo de solvente usado cuando se va a usar la prueba. En el caso de los solventes de xileno, deberra especificar el porcentaje de xileno a ser usado.
³ El uso del requisito de perdida por calentamiento es opcional.

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p.14.

Figura 4. **Requisitos para cemento asfáltico graduado por la viscosidad del residuo de la prueba de película delgada en horno rotatorio (AASHTO M 226)**

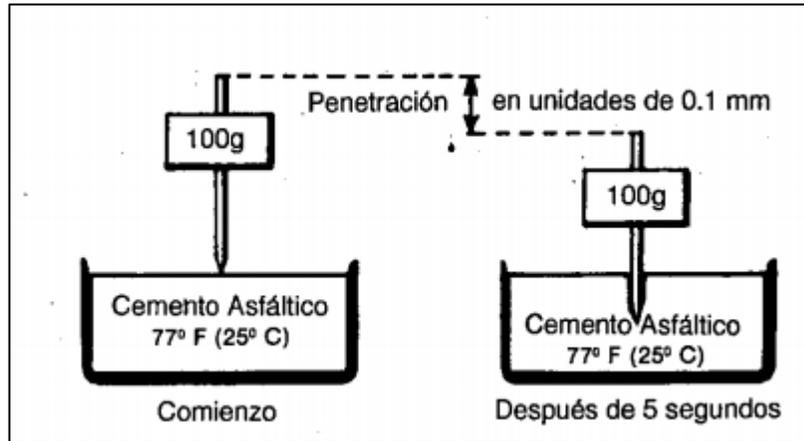
REQUISITOS PARA CEMENTO ASFALTICO CLASIFICADO POR VISCOSIDAD A 60° C (Clasificación basada en el residuo del ensayo de RTFO)					
PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO DEL ENSAYO DE LA NORMA AASHTO T 240 ¹	GRADO DE VISCOSIDAD				
	AR-10	AR-20	AR-40	AR-80	AR-160
Viscosidad, 60° C, poisea	1000 ± 250	2000 ± 500	4000 ± 1000	8000 ± 2000	16000 ± 4000
Viscosidad, 135° C, Cs-mínimo	140	200	275	400	550
Penetración, 25° C, 100 g., 5 segundos-mínimo	65	40	25	20	20
Porcentaje de Pen original, 25° C-mínimo	—	40	45	50	52
Ductilidad, 25° C, 5 cm por minuto, cm-mínimo	100 ²	100 ²	75	50	52
PRUEBAS SOBRE EL ASFALTO ORIGINAL					
Punto inflamador, Cleveland, ° C (°F)-mínimo	205 (400)	219 (425)	227 (440)	232 (450)	238 (460)
Solubilidad en tricloroetileno, por ciento-mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

¹ AASHTO T 179 (TFO) puede ser usado, pero AASHTO T 240 deberá ser el método de referencia.
² Si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15.6° C tiene un valor/mínimo de 100.

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p.15.

El tercer método usado para clasificar asfaltos es el de penetración. La figura 5 muestra cómo se efectúa el ensayo de penetración. Una aguja normal se deja penetrar dentro de la muestra de asfalto bajo una carga dada. La distancia que la aguja penetra en la muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetro (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. Esto es indicación de un asfalto blando. Un grado 40-50, por otro lado, es indicación de un asfalto duro, en el cual la aguja fue capaz de penetrar solamente de 40 a 50 décimas de milímetro.

Figura 5. Diagrama de la prueba de penetración



Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p.16.

Figura 6. Sistema de clasificación por penetración (AASHTO M 20)

REQUISITOS PARA UNA ESPECIFICACION PARA CEMENTO ASFALTICO AASHTO M 20										
	Grado de Penetración									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Penetración a 25° C, 100 g., 5 segundos.....	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto Inflamador, Ensayo Cleveland, ° C	450	.....	450	.....	450	.....	425	.....	350	.....
Ductilidad a 25° C, 5 cm. por min, cm.	100	.....	100	.....	100	.....	100	.....	99	.....
Solubilidad en tricloroetileno, por ciento	99	.....	99	.....	99	.....	99	.....	99	.....
TFO, 3.2 mm, 163° C, 5 horas .....	.....	0.8	.....	0.8	.....	1.0	.....	1.3	.....	1.5
Penetración del residuo, porcentaje del original	58	.....	54	.....	50	.....	45	.....	40	.....
Ductilidad del residuo a 25° C, 5 cm, por min, cm.....	.....	.....	50	.....	75	.....	100	.....	100	.....
Prueba del Mancha (cuando y como se especifique) (ver nota) con: Solvente normal de nafta Solvente de nafta-xileno, % xileno Solvente de heptano-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados Negativo para todos los grados Negativo para todos los grados									

NOTA: El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberá especificar el tipo de solvente cuando se va a usar la prueba, y en el caso de los solventes de xileno, deberá especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p.16.

1.5. Características y comportamiento de la mezcla

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas pueden tener en su comportamiento. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos
- Vacíos en el agregado mineral
- Contenido de asfalto

1.5.1. Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante para el inspector, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis de diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/ft^3). La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1\ 000\ \text{kg/m}^3$). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que

muy rara vez la compactación *in-situ* logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

1.5.2. Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto, una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

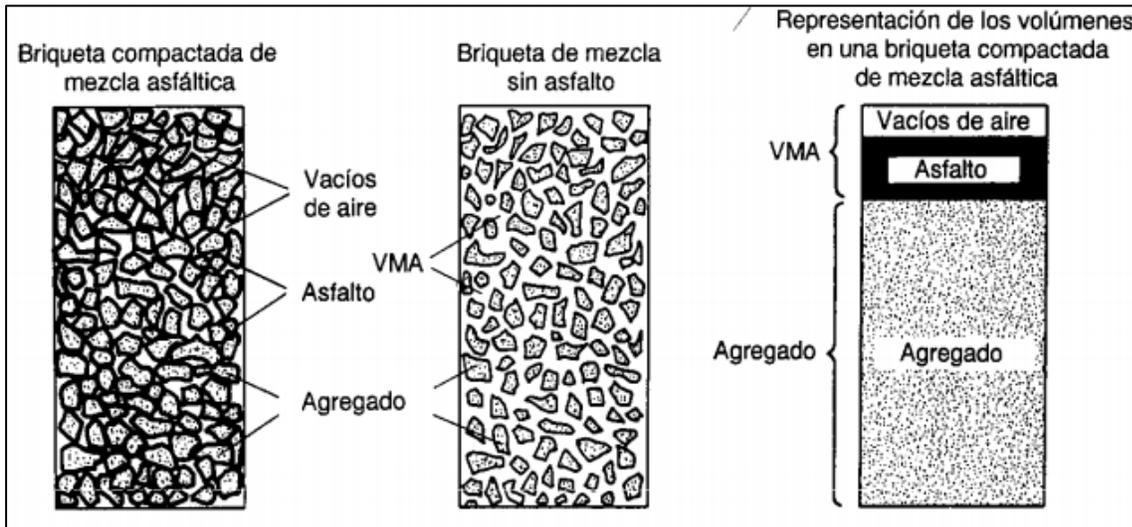
La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos; preferiblemente menos del 8 %.

1.5.3. Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuanto mayor sea el VMA, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA, los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se van en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Figura 7. Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada



Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 59.

Figura 8. Vacíos en el agregado mineral (requisitos de VMA)

Tamaño Máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
Porcentaje		Vacíos de Diseño, por ciento ³		
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

¹ Especificación Normal para Tamaños de Tamices usados en Pruebas, ASTM E 11 (AASHTO M 92)
² El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño mas grande que el primer tamiz que retiene mas de 10 por ciento del material.
³ Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están citados.

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 59.

1.5.4. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de bitumen de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de bitumen de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente

todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0,075 mm (No. 200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultado en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).

Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco, o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de bitumen. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente bitumen a la mezcla para permitir la absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de bitumen.

El contenido total de asfalto es la cantidad de bitumen que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de bitumen no absorbido por el agregado; es la cantidad de bitumen que forma una película ligante efectiva sobre

las superficies de los agregados. El contenido efectivo de bitumen se obtiene al restar la cantidad absorbida de bitumen del contenido total de bitumen.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

1.6. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas es garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades.

1.6.1. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas. Un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad

para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión internas. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tránsito.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla. Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tránsito liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión crece con aumentos en la frecuencia de carga (tránsito). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión crece con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdidas de fricción entre partículas.

Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento.

Figura 9. **Causa y efectos de inestabilidad en el pavimento**

ESTABILIDAD BAJA	
Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamiento, y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 61.

1.6.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento asfáltico es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación) y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Una graduación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos minerales como la cal hidratada.

La intrusión de aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se daña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible.

Figura 10. **Causas y efectos de la poca durabilidad**

POCA DURABILIDAD	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua (hidrofilicos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 62.

1.6.3. Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de este. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relacionan con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es

aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

Figura 11. **Causas y efectos de la permeabilidad**

MEZCLA DEMASIADO PERMEABLE	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y poca estabilidad

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 63.

1.6.4. Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el

laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno mineral también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Figura 12. **Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad**

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula : grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 64.

1.6.5. Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de estos.

1.6.6. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento (el periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

Figura 13. **Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga**

MALA RESISTENCIA A LA FATIGA	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacios altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 65.

1.6.7. Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9,5 mm (3/8 pulgada) a 12,5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Figura 14. **Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento**

POCA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	
Causas	Efecto
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidropneumático
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 65.

1.7. Antecedentes

La historia de las mezclas asfálticas en caliente (HMA) se remonta a un largo camino de progreso. La primera carretera por pavimentar con asfalto fue en Babilonia entre 625 y 604 A.C. Los romanos crearon un impresionante sistema de carreteras en Gran Bretaña, de las cuales muchas de ellas fueron utilizadas como muestra para modernas carreteras inglesas. El caballero Walter Raleigh, en su tercer viaje en 1498, descubrió la todavía famosa laguna de asfalto en la isla de Trinidad, la laguna natural de asfalto más grande del mundo. Fue la primera fuente de asfalto disponible en América. La segunda fuente de asfalto fue la laguna de Bermúdez en Venezuela.

La completa implementación del asfalto en carreteras, sin embargo, comenzó con un hombre llamado John Metcalfe. Hoy, bases de piedras largas en HMA, que fueron comúnmente utilizadas a principios de siglo, de nuevo se vuelven a usar como una manera de detener el ahuellamiento y proveer una resistencia incremental a cargas altas frecuentes. Aditivos asfálticos son utilizados para incrementar la estabilidad de las HMA en temperaturas altas y bajas. El superpave y SMA, que tienen la característica de no presentar

ahuellamiento, proveen excelente drenaje lateral superficial con la superficie abierta que poseen y también la durabilidad del pavimento asfáltico, con lo que la industria líder en asfaltos lo llama una enorme reducción en costos de mantenimiento.

Esta nueva tecnología, que fue importada de Europa en 1990 y perfeccionada en Atlanta para las olimpiadas de 1996, requieren cambios fundamentales en el componente pétreo de las HMA, tales como tamaño, forma, textura y graduación. Canchas de tenis, senderos para bicicletas, senderos para correr, campos de futbol, entre otros, se benefician de la colocación del asfalto por el bajo costo y bajo mantenimiento, rapidez en la construcción, resistencia óptima a la fricción y deslizamiento y rápido drenaje después de la lluvia. Lo que ha cambiado durante los siglos en los países es cómo estos constructores modifican la manera de aplicación de las HMA para lograr, no solo un buen drenaje, sino una infraestructura segura y estable al sonido.

1.7.1. Experiencias extranjeras: española

Para el estudio realizado por la Universidad Politécnica de Catalunya, en 2000, se aplicó el ensayo de tracción indirecta sobre testigos extraídos durante el control de ejecución de diferentes obras y también sobre probetas elaboradas en laboratorio, comparando los resultados y comprobando que el parámetro determinado, la resistencia a tracción indirecta, está correlacionado con la densidad y es capaz de evaluar a la mezcla con mayor sensibilidad que la acusada por la compacidad.

Se obtuvo como resultado que:

- El ensayo de tracción indirecta aplicado en probetas y testigos elaborados con mezclas bituminosas en caliente, de tipos densas, semidensas y gruesas, permite determinar un parámetro relacionado con la cohesión de la mezcla, mediante la determinación de su resistencia. Realizando este ensayo a la temperatura de 59°C, la mezcla se comporta como un material rígido, y su resistencia máxima de rotura depende de la compactación de la mezcla, de la dureza de los áridos y del porcentaje y calidad del mástico empleado, siendo estos factores los que determinan la calidad de la mezcla y la de su ejecución.
- Se comprobó que este ensayo es suficientemente sensible para detectar variaciones en la resistencia de las mezclas cuando se modifican las proporciones de los materiales componentes.
- Con respecto a las condiciones de ejecución de la capa, se pudo evaluar el efecto de una compactación a bajas temperaturas, pudiendo conseguir una alta compactación, pero reduciendo la calidad de la mezcla notablemente, tal como lo indica el importante descenso de resistencia a tracción indirecta observado en los resultados obtenidos al compactar una mezcla tipo S-20 a las temperaturas de 120°C y 150°C.
- Los resultados obtenidos sobre testigos extraídos de numerosas obras han demostrado que la resistencia a tracción indirecta a 5SC correlaciona con la compactación de estos, permitiendo de este modo analizar y acotar la tasa de incremento de resistencia en función del aumento de compactación.
- Los resultados de módulo resiliente obtenidos sobre los testigos han correlacionado con la resistencia a tracción indirecta. A partir de esta correlación, mediante el empleo de una ley de fatiga y bajo determinadas hipótesis de cálculo, ha sido posible evaluar el efecto producido por la disminución de resistencia en la vida del firme, así como calcular el refuerzo necesario para recuperar esa pérdida.

- Es posible mejorar el control de calidad empleado habitualmente, recomendando determinados valores mínimos de resistencia para los diferentes tipos de mezcla y calculando un factor de calidad en función de la diferencia entre la resistencia de la mezcla fabricada y la conseguida tras su extensión y compactación en obra. Cuanto menor sea este factor, mayor es la calidad alcanzada en obra y más semejanza existe entre el producto final y la mezcla proyectada en laboratorio.

1.7.2. Experiencia extranjera: argentina

En el estudio realizado, para cada tipo de mezcla se moldearon 12 probetas divididas en grupos de 3 para ensayar a cada temperatura.

En este caso mayores resistencias a tracción no determinaron necesariamente una mayor calidad de la mezcla asfáltica. Por otra parte, la dependencia del comportamiento de una mezcla asfáltica con la temperatura de ensayo se manifestó además por el tipo de rotura que se presentó en el ensayo. Una rotura tipo dúctil indica un comportamiento tipo sólido viscoelástico, en cuyo caso la resistencia a la tracción se relaciona con la compacidad de la mezcla, con la cohesión del mástico y la adherencia asfalto-agregado. Una rotura tipo frágil indica un comportamiento tipo sólido elástico y su resistencia se relaciona con la compacidad de la mezcla, con la dureza de los agregados y con la cantidad y calidad del mástico.

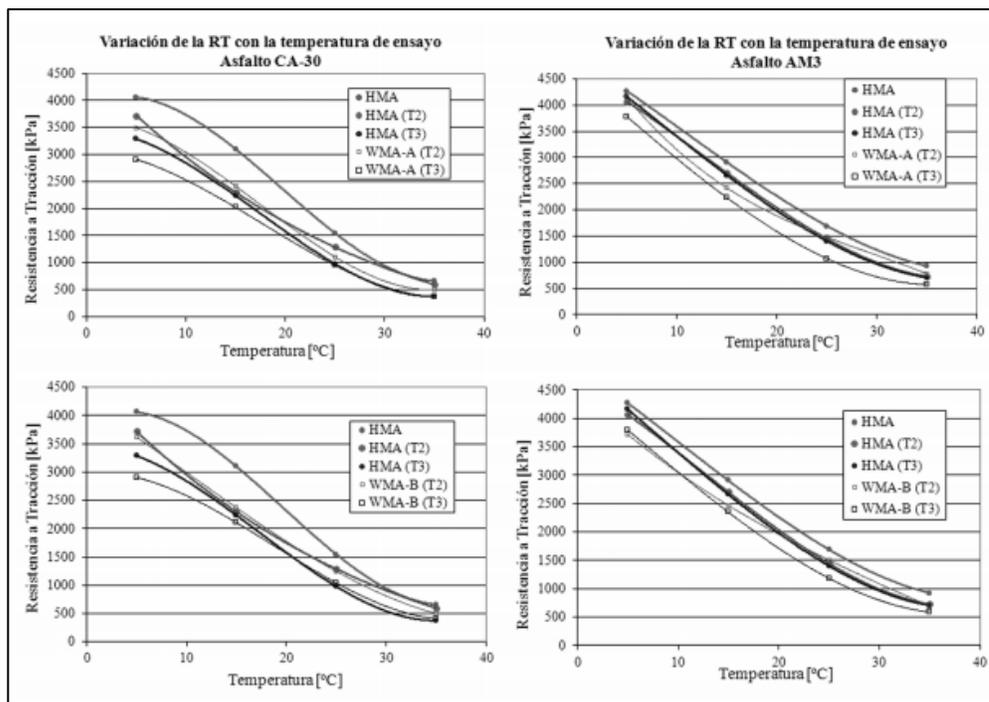
Como la gradación, el porcentaje de asfalto, el tipo de agregado y la energía y método de compactación no varían, el tipo de rotura estará determinado por el ligante utilizado (solo o aditivado) y cómo afecta esto a su comportamiento cuando se reducen las temperaturas de fabricación.

Los resultados obtenidos fueron:

- A 5°C la mayoría de las mezclas asfálticas se comportaron como sólidos elásticos y el tipo de rotura predominante es por mástic y agregados, del tipo frágil, caracterizada por la presencia de agregados partidos en el plano de rotura de la probeta. No se presentaron diferencias significativas en la comparación de los valores medios de las resistencias a compresión diametral para HMA (T1) y las mezclas WMA realizadas a temperaturas T2, con o sin aditivos.
- A 15°C las mezclas asfálticas presentaron roturas predominantemente por mástic y agregados. La presencia de agregados fracturados en el plano de rotura de la probeta fue menor que en el caso de rotura a 5°C. En todos los casos se presentaron diferencias significativas en la comparación de los valores medios de las resistencias a compresión diametral para HMA (T1) y las mezclas WMA realizadas a temperaturas inferiores.
- A 25°C la mayoría de los asfaltos estaban cerca del límite inferior del comportamiento elástico. La rotura de las probetas fue del tipo de rotura por cohesión (mástic) y/o por adherencia (interfase agregada – asfalto).
- A 35°C la cohesión y/o adherencia de las mezclas WMA se vieron significativamente disminuidas en comparación con la obtenida con la mezcla HMA (T1).

Aun cuando en algunos casos no existió diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios, en todos los casos se presentó una disminución de los valores de resistencia a tracción cuando se reducen las temperaturas de fabricación, aún con los asfaltos para mezclas semicalientes.

Figura 15. **Variación de la resistencia a tracción con la temperatura de ensayo**



Fuente: MOREA, Francisco. *Mezclas asfálticas semicalientes elaboradas con aditivos tensoactivos. Estudios comparativos del comportamiento mecánico respecto a las mezclas en caliente convencionales.* <https://core.ac.uk/download/pdf/153561007.pdf>. Consulta: 25 de mayo de 2020.

1.7.3. Experiencia extranjera: chilena

En Chile, el control en obra se realiza a partir de la composición de la mezcla y de los parámetros obtenidos según el procedimiento Marshall. Con esta metodología no se consideran los parámetros estructurales de la capa asfáltica.

Con base en la experiencia de la Universidad Politécnica de Cataluña en la aplicación del ensayo de resistencia a tracción indirecta (equipo Marshall con

prensa Lottman) en testigos de numerosas obras en España, en la Universidad Técnica Federico Santa María se realizó una investigación a fin de observar las características mecánicas de la capa asfáltica.

El ensayo de tracción indirecta fue aplicado a testigos extraídos de obras de la V Región de Chile, comparándolos con probetas que reproducen las características de obra agregados de planta, cemento asfáltico, entre otros.

Se obtuvo como resultado que:

- Se muestra la posibilidad de emplear este ensayo en el control de ejecución de mezclas asfálticas, ya que sus resultados se traducen en características mecánicas del pavimento y esto entrega una idea mejor respecto del comportamiento esperado para cualquier pavimento. Además, permite determinar la variabilidad de la mezcla colocada relacionándola con la variabilidad en laboratorio.
- El coeficiente de correlación entre densidad real y resistencia a tracción indirecta es medianamente aceptable con las muestras ensayadas en planta A y bajo en planta B. Gran parte de los pavimentos analizados tienen un alto grado de compactación con relación a la densidad Marshall, esto solo se explica debido a la especificación existente y a que se trata de capas delgadas.

1.7.4. Conclusiones de las experiencias extranjeras

Los estudios realizados en Argentina y Chile fueron con base en la experiencia obtenida en la Universidad Politécnica de Catalunya, España.

Las tres investigaciones llegan conjuntamente a similares resultados, comprobando así que el empleo del ensayo de tracción indirecta aporta para mejorar el control de la ejecución de mezclas asfálticas, ya que sus resultados se traducen en características mecánicas del pavimento y esto entrega una mejor idea respecto del comportamiento esperado para cualquier pavimento. Asimismo, es suficientemente sensible para detectar variaciones en la resistencia de las mezclas cuando se modifican las proporciones de los materiales componentes.

2. ENSAYO DE DISEÑO DE TRACCIÓN INDIRECTA

2.1. Ensayo de tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta se destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

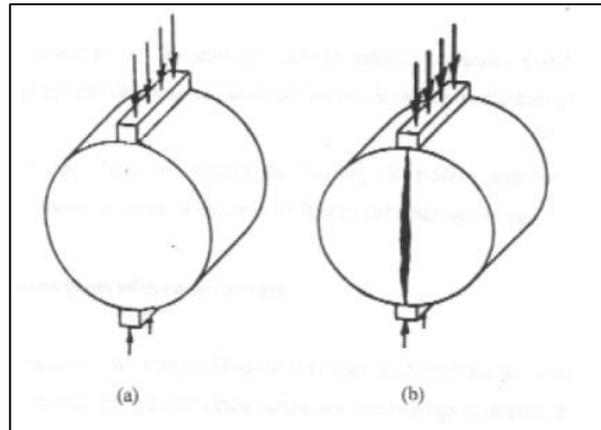
Hasta 1965 solo se utilizaba para determinar la resistencia a tracción indirecta, pero desde entonces se ha ido profundizando en su estudio, llegando a ser un ensayo con grandes perspectivas de futuro. Estados Unidos destaca como pionero en el avance de su estudio en la década de los 90, donde se realizan un gran número de investigaciones.

2.1.1. Descripción del ensayo de tracción indirecta

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura.

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

Figura 16. **(a) Configuración de la carga y (b) rotura del ensayo de tracción indirecta**



Fuente: GARROTE VILLAR, Elisabet. *Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3324>. Consulta: 28 de junio de 2020.

La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma. Para poder cargar la probeta a compresión en un plano diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo. Se utilizan unas placas de apoyo curvo, con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta, de 12,7 o 25,4 mm de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten, manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de un ancho de carga variable durante el ensayo, que ocurriría con una placa de carga plana.

Por la norma, la velocidad de desplazamiento del sistema durante la carga será uniforme e igual a 50,8 mm/min, igual a la empleada por la prensa en el ensayo Marshall.

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, la temperatura será una variable más para el ensayo. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de 25 ± 1 °C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del ligante por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas.

Como se ha comentado anteriormente, la principal ventaja del método es la sencillez de su metodología. Este es un factor muy valorado por todas aquellas instituciones que necesitan caracterizar de una forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan. El Departamento de Carreteras del Estado de Texas impulsó unos estudios dirigidos por Tomas Kennedy de la Universidad de Austin, en los cuales presentó las principales ventajas del ensayo:

- Es un ensayo relativamente sencillo.
- Presenta similitud con otro tipo de ensayos como el Marshall.
- El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otro tipo de ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.

- El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. Tesoriere en sus estudios habla de dispersiones inferiores al 10 %, en comparación con las de Marshall, que pueden ser del 15-20 %.
- El ensayo puede utilizarse bajo carga estática o dinámica, modificando la prensa en función del tipo de estudio que se realice.

El ensayo de tracción indirecta no solo da información de la resistencia a tracción indirecta, sino que también informa sobre propiedades elásticas resilientes (módulo de elasticidad estático o dinámico en función del tipo de carga aplicada), fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en mezclas bituminosas.

2.1.1.1. Distribución teórica de tensiones

La solución teórica de la distribución de tensiones dentro de una probeta cilíndrica está basada en el análisis de un material de comportamiento elástico y lineal.

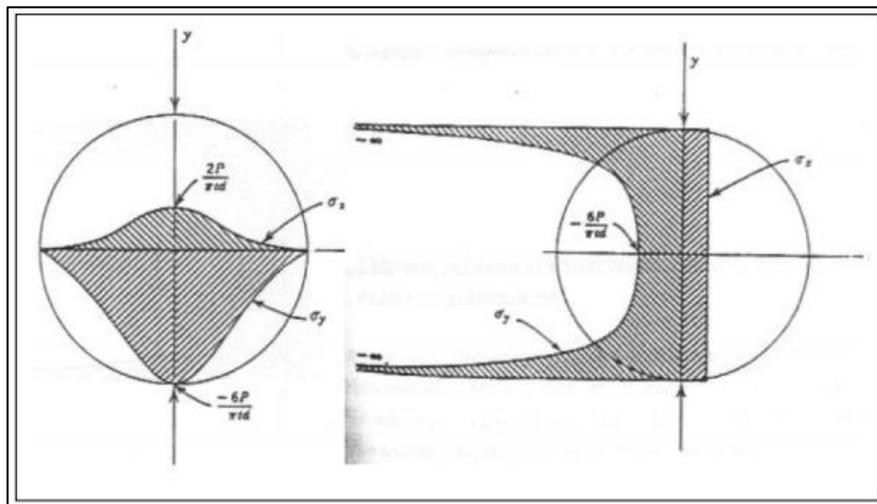
Cuando una probeta cilíndrica es sometida a compresión diametral desarrolla un estado de tensiones bidimensional en su interior. La carga aplicada a lo largo de dos generatrices diametralmente opuestas describe planos principales de tensiones, uno horizontal y otro vertical. Particularmente en el plano vertical se produce una tensión variable de compresión y una tensión teóricamente uniforme de tracción.

El análisis de rotura de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas sometidas a compresión diametral demuestra que la fisura inicial ocurre cuando

la tensión horizontal de tracción desarrollada en el plano vertical de carga alcanza el valor de la resistencia a tracción del material.

Tomas W. Kennedy y W. Ronald Hudson desarrollaron las tensiones teóricas que se dan en una probeta cilíndrica sometida a una carga diametral, tal y como sucede en el ensayo de tracción indirecta. Esta distribución teórica de tensiones a lo largo de los ejes horizontales y verticales para una carga concentrada se muestra en la figura 17.

Figura 17. **Distribución de tensiones teórica sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta**



Fuente: GARROTE VILLAR, Elisabet. *Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3324>. Consulta: 28 de junio de 2020.

2.1.1.2. Alcances del ensayo

El principio del método consiste en imponer una deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de forma que los esfuerzos aplicados a la probeta sean sobre dos generatrices opuestas. El parámetro por medir es la carga de rotura de la probeta. También, optativamente, se pueden determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la realización del ensayo, si se dispone de los sistemas pertinentes para medirlos.

El método de ensayo permite, por una parte, definir un parámetro capaz de caracterizar la mezcla bituminosa y, por otra, optimizar, en función del contenido de ligante, la cohesión de la mezcla y su resistencia al esfuerzo cortante.

El procedimiento se puede utilizar en el control de calidad de mezclas bituminosas durante la fabricación o la puesta en obra de estas.

2.1.1.3. Especificaciones del ensayo

El procedimiento se emplea tanto para probetas del material fabricadas en laboratorio o en obra, como para las probetas-testigo extraídas del pavimento.

Aunque las dimensiones de las probetas no son características privativas del ensayo, se deben utilizar preferentemente las de diámetro 101,6 mm y altura de unos 63 mm (probeta Marshall). El proceso de compactación de la probeta (energía y temperatura) se efectuará de acuerdo con las características de la mezcla y del ligante asfáltico en estudio, y se puede realizar por medio de impacto (Marshall), amasado cizallamiento (máquina giratoria), compresión rápida (prensa) o cualquier otro conforme al fin perseguido en el ensayo.

Los testigos extraídos del pavimento presentarán un diámetro constante sobre toda la longitud de estos y las superficies laterales no presentarán irregularidades. Para obtener una altura uniforme se debe cerrar el testigo de tal suerte que las superficies planas del mismo sean paralelas. Si el testigo procede de la capa de rodadura no es necesario eliminar la zona superficial superior, si esta zona no presenta irregularidades mayores de $\pm 5\%$ de la altura del testigo-probeta y de 5 mm como máximo. La altura mínima de los testigos-probeta para ensayo no será menor de 30 mm.

Los aparatos y materiales necesarios para realizar el ensayo son:

- Prensa

Para ensayar las probetas se empleará cualquier tipo de prensa de compresión mecánica o hidráulica, que pueda proporcionar durante la aplicación de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de $0,85 \pm 0,02$ mm/s (50,8 mm/min), y una carga de 100 kN (10^4 kgf) como mínimo.

- Recinto termostático

Un recinto de capacidad suficiente para guardar las probetas para ensayo y mantenerlas a una temperatura de 25 ± 1 °C.

- Calibrador

Para medir con precisión de $\pm 0,1$ mm el diámetro y la altura de las probetas para ensayo.

- Dispositivo de sujeción de la probeta

Es optativo. El dispositivo permitirá la sujeción mediante contacto de la probeta por sus caras planas, utilizando dos tornillos de ajuste, así como la colocación de la probeta de forma que dos de sus generatrices, diametralmente opuestas, estén contenidas en el plano diametral perpendicular a los platos de la prensa. El contacto de estas dos generatrices con los elementos transmisores de la carga se puede hacer por medio de dos bandas de apoyo de madera contrachapada o cartón sin defectos, de 3 mm de espesor, 25 mm de ancho y de longitud igual o ligeramente superior a la generatriz de la probeta. Las bandas de apoyo no se utilizarán en más de un ensayo. También se puede situar la probeta directamente entre los dos platos de la prensa, siempre que se asegure el paralelismo entre ellos durante la carga.

- Sistema de medida ($\pm 0,01$ mm) de desplazamiento vertical (optativo)
- Sistema de medida ($\pm 0,01$ mm) de desplazamiento horizontal (optativo).

2.1.1.4. Normas regentes

El ensayo a tracción indirecta está normalizado según la norma NLT-346/90. Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas.

En dicha norma se indica el procedimiento para determinar la resistencia a tracción indirecta de mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio o provenientes de testigos extraídos del pavimento. Se obtiene un parámetro que caracteriza a la mezcla bituminosa, a la vez que optimiza el contenido de ligante, la cohesión de la mezcla y su resistencia al esfuerzo cortante.

Este ensayo puede utilizarse para el proyecto y también para el control de calidad de las mezclas bituminosas durante su fabricación o durante la puesta en obra.

2.1.2. Procedimiento del ensayo de tracción indirecta

Los pasos por seguir para la ejecución del ensayo son:

- Medida geométrica de las probetas o testigos

Con el calibrador se determina el diámetro $\pm 0,1$ mm, de la probeta en seis planos, dos a dos perpendiculares; dos en el plano superior de la probeta, dos en el plano medio y dos en el plano inferior. El diámetro medio, d , es la medida aritmética de las seis medidas. La diferencia entre dos medidas individuales no será superior a 1 mm.

La altura de la probeta se mide también con precisión de $\pm 0,1$ mm en cuatro puntos definidos por los extremos de dos planos diametrales perpendiculares, con un radio de 10 mm inferior al radio de la probeta. La altura media, h , es la media aritmética de las cuatro medidas. La diferencia entre dos medidas individuales no será superior al 5 % de la altura media, con un máximo de 5 mm.

- Acondicionamiento térmico de las probetas
 - Se introducen las probetas en el baño termostático regulado a 25 ± 1 °C, durante 6 horas, y se sacan del mismo, una a una, inmediatamente antes de ensayarlas.

Nota: se puede realizar el ensayo a otras temperaturas con el fin de estudiar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio. No obstante, hay que tener presente que temperaturas por encima del punto de reblandecimiento del ligante exaltan el carácter viscoso de las mezclas, y que la fórmula empleada en la determinación de la resistencia a tracción indirecta solo es estrictamente aplicable a materiales con carácter fundamentalmente elástico.

- Se retira la probeta del baño termostático y se sitúa en el dispositivo de sujeción, o directamente entre los platos de la prensa, según sea el caso, con dos de sus generatrices opuestas en contacto con los mismos.
- Si se dispone de elementos de medida de deformación vertical y horizontal se colocan en posición de medida y se ajustan a cero.
- Se aplica la carga a la probeta manteniendo la velocidad de deformación de $0,85 \pm 0,02$ mm constante, hasta que se rompa la probeta.
- El tiempo transcurrido entre el momento en que se retira una probeta del recinto termostático y la rotura de la misma en la prensa no debe exceder de 30 segundos.
- Se registran o anotan los valores de la carga de rotura y los desplazamiento vertical y deformación horizontal, si este es el caso.

2.2. Ensayo de diseño Marshall

El concepto del Método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Bruce Marshall, ex ingeniero de bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi.

El ensayo Marshall, en su forma actual, surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un método simple.

El Cuerpo de Ingenieros decidió adoptar el Método Marshall, y desarrollarlo y adaptarlo para diseño y control de mezclas de pavimentos bituminosos en el campo, debido en parte a que el método utilizaba equipo portátil. A través de una extensa investigación de pruebas de tránsito, y de estudios de correlación, en el laboratorio, el Cuerpo de Ingenieros mejoró y agregó ciertos detalles al procedimiento del ensayo Marshall, y posteriormente desarrolló criterios de diseño de mezclas.

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El Método Marshall solo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que usan un cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración, y que contienen agregados con tamaños máximos de 25,0 mm (1 pulgada) o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, así como para el control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación.

2.2.1. Metodología del diseño

El Método Marshall usa muestras normalizadas de prueba (probetas) de 64 mm (2,5 pulgadas) de espesor por 102 mm (4 pulgadas) de diámetro. Una serie de probetas, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas de agregado.

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

2.2.2. Preparación para efectuar los procedimientos Marshall

El primer paso en el método de diseño es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, entre otros) que debe tener la mezcla de pavimentación, y seleccionar un tipo de agregado y tipo compatible de asfalto que pueden combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

2.2.2.1. Selección de las muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que van a ser usadas en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinan la fórmula o receta para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes

ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad.

2.2.2.2. Preparación del agregado

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para poder establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

2.2.2.2.1. Secando el agregado

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos.

Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110°C (230°F). Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa y se registra su valor.

La muestra se calienta completamente una segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

2.2.2.2.2. Análisis granulométrico por vía húmeda

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento usado para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

- Cada muestra de agregado es secada y pesada.
- Luego cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0,075 mm (No. 200), para remover cualquier polvo mineral que esté cubriendo al agregado.
- Las muestras lavadas son secadas siguiendo el procedimiento de calentado y pesado descrito anteriormente.
- El peso seco de cada muestra es registrado. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados para las muestras antes y después del lavado.

2.2.2.2.3. Determinación del peso específico

El peso específico de una sustancia es la proporción peso-volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso-volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1).

El cálculo del peso específico de la muestra seca del agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones de agregado, asfalto y vacío que van a usarse en los métodos de diseño.

2.2.2.3. Preparación de las muestras (probetas) de ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre- calentados Marshall, como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente, un total de 70 golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.2.3. Procedimientos del ensayo Marshall

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

2.2.3.1. Determinación del peso específico total

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166.

2.2.3.2. Ensayos de estabilidad y fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60°C (140°F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- La probeta es removida del baño, secada y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

2.2.3.3. Valor de estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador de cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que, si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

2.2.3.4. Valor de fluencia Marshall

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

2.2.3.5. Análisis de densidad y vacíos

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

2.2.3.5.1. Análisis de vacíos

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado; o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 209) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

2.2.3.5.2. Análisis de peso unitario

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ ($62,4\ \text{lb/ft}^3$).

2.2.3.5.3. Análisis de VMA

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

2.2.3.5.4. Análisis de VFA

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

2.2.4. Normas regentes

El diseño por el Método Marshall está normalizado según la norma AASHTO T 245: método estándar de prueba de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall.

Este método cubre la medición de la resistencia al flujo plástico de muestras cilíndricas de mezcla de asfalto cargadas en la superficie lateral por medio del aparato Marshall. Este método es para usar con mezclas que contienen aglutinante de asfalto o reducción de asfalto y agregados de hasta 25,4 mm (1 pulgada) de tamaño máximo.

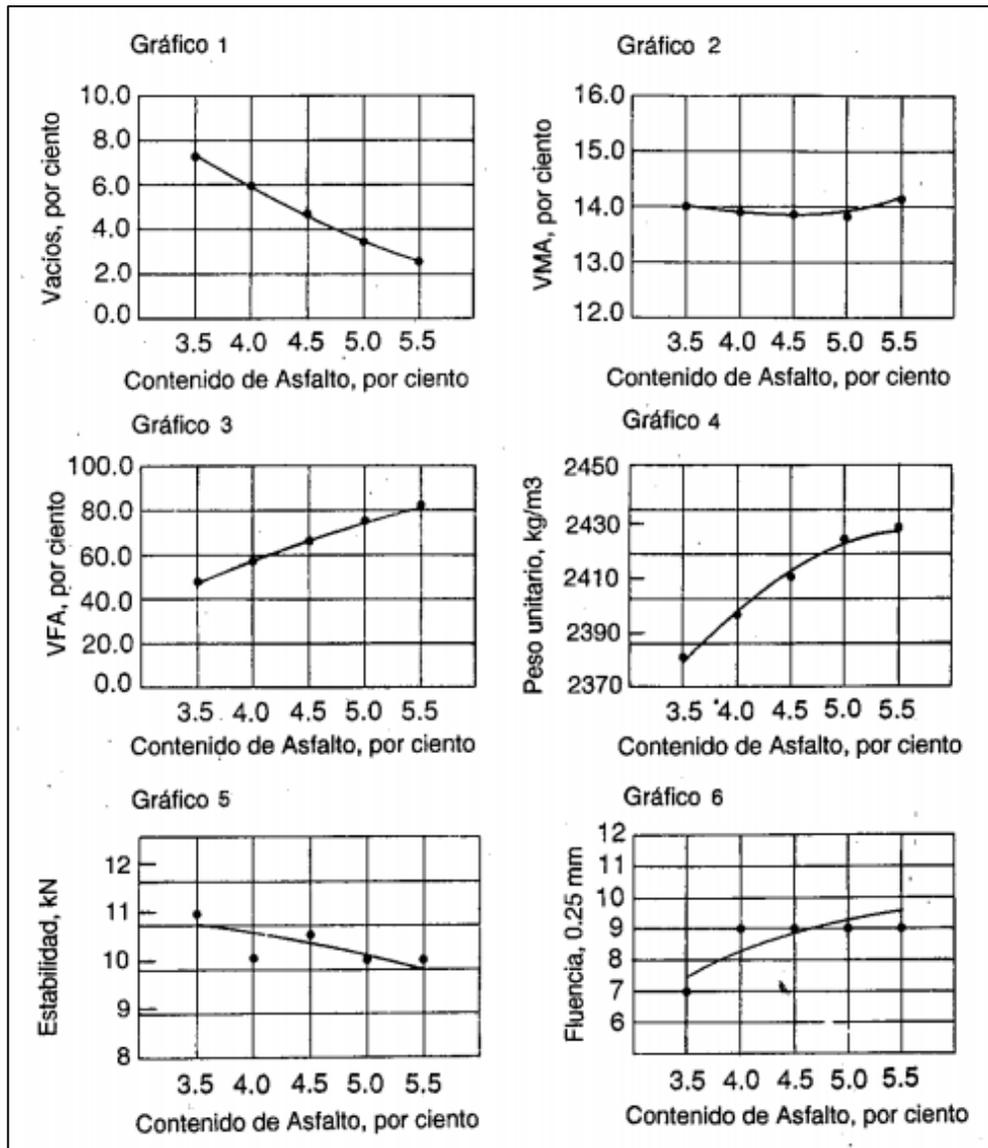
2.2.5. Limitaciones del ensayo Marshall

Cuando los resultados de los ensayos se trazan en gráficas, usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. A continuación, se enuncian ciertas tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas de la figura 18:

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto (gráfica 1).

- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con aumentos en el contenido de asfalto (gráfica 2).
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) aumenta con aumentos en el contenido de asfalto (gráfica 3).
- La curva para el peso unitario (densidad) de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que el peso unitario máximo se presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad (gráfica 4).
- Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta. Más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto (gráfica 5).
- Los valores de fluencia aumentan con aumentos en el contenido de asfalto (gráfica 6).

Figura 18. Ejemplo de gráficas para los resultados de una serie de cinco probetas Marshall



Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 80.

El contenido de diseño de asfalto en la mezcla final de pavimentación se determina a partir de los resultados descritos anteriormente. Primero, se determina el contenido de asfalto para el cual el contenido de vacíos es de 4 por ciento. Luego, se evalúa todas las propiedades calculadas y medidas para este contenido de asfalto, y se comparan con los criterios de diseño de la figura 9. Si se cumplen todos los criterios, este es el contenido de diseño de asfalto. Si no se cumplen todos los criterios, será necesario hacer algunos ajustes o volver a diseñar la mezcla. El porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral también puede ser revisado usando la figura 19, donde debe ser comparado con el VMA de la graduación del agregado en cuestión.

Figura 19. **Criterios del Instituto del Asfalto (USA) para el diseño Marshall**

Criterios para Mezcla del Metodo Marshall	Transito Liviano Carpeta y Base		Transito Mediano Carpeta y Base		Transito Pesado Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactacion, numero de golpes en cada cara de la probeta		35		50		75
Estabilidad, N (lb.)	3336 (750)	—	5338 (1200)	—	8006 (1800)	—
Flujo, 0.25 mm (0.01 pulgadas)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de Vacios	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacios en el Agregado Mineral (VMA)	Ver Figura 3.20					
Porcentaje de Vacios llenos de Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

NOTAS

¹ Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60°C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38°C, y si se colocan a 100 mm o mas por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas mas bajas de ensayo.

² Clasificaciones del Transito
 Liviano Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño < 104
 Mediano Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño entre 104 y 106
 Pesado Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño > 106

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

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

⁵ Cuando se este calculando el porcentaje de vacios, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado

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

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 82.

Figura 20. **Porcentaje mínimo de VMA**

Tamaño Máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
Porcentaje		Vacíos de Diseño, por ciento ³		
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

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

² El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño mas grande que el primer tamiz que retiene mas de 10 por ciento del material.

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

Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. p. 82.

El diseño de mezcla seleccionado para ser usado en un pavimento es, generalmente, aquel que cumple, de la manera más económica, con todos los criterios establecidos. Sin embargo, no se deberá diseñar una mezcla para optimizar una propiedad en particular.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Ensayos realizados para el diseño Marshall

El procedimiento a emplear para determinar la resistencia a la deformación plástica del espécimen cilíndrico de la mezcla asfáltica en caliente está detallado en la Norma ASTM D 1559.

3.1.1. Granulometría

En la Norma ASTM D 3515 se presentan los valores máximos y mínimos para la gráfica de la curva granulométrica de los agregados de la mezcla.

Inicialmente se define el tamaño máximo del agregado a utilizar. Seguido, se utiliza la tabla III para conocer los rangos de los porcentajes en masa que pasa la serie de tamices. Para el caso en estudio, se ha elegido una mezcla asfáltica tipo E (el tamaño máximo del agregado es de $\frac{1}{2}$ ").

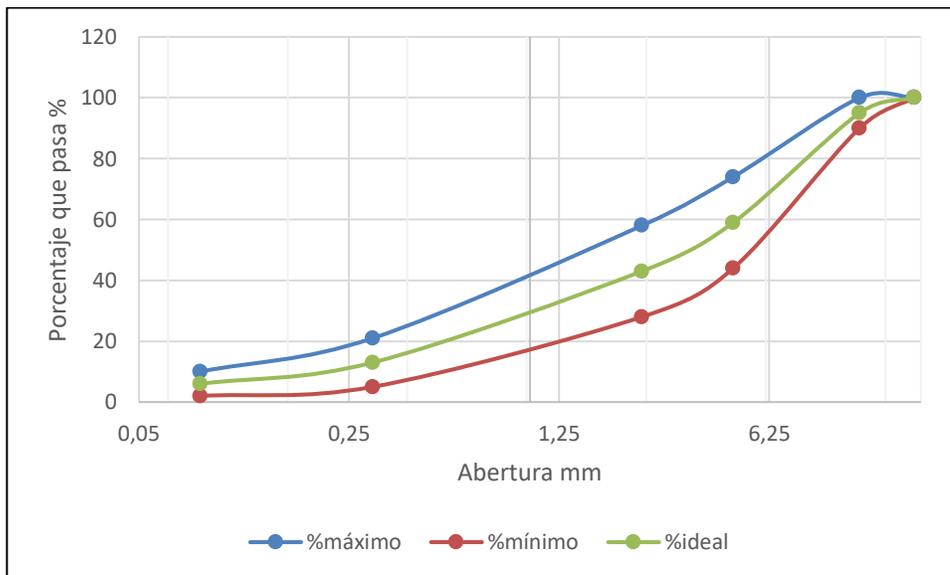
La tabla IV presenta los valores propuestos en porcentaje en masa que pasa cada tamiz.

Tabla IV. **Granulometría ideal**

Tamiz	Abertura (mm)	% pasa (diseño)	% que retiene	Masa (g)
3/4"	19,00	100,00	0,00	0,00
1/2"	12,50	95,00	5,00	60,00
No. 4	4,75	59,00	36,00	432,00
No. 8	2,36	43,00	16,00	192,00
No. 50	0,30	13,00	30,00	360,00
No. 200	0,075	6,00	7,00	84,00
Fondo		0,00	6,00	72,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Curva granulométrica**



Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Gravedad específica de Bulk

Ensayo regido por las normas ASTM D 2726 y AASHTO T 166.

3.1.2.1. Procedimiento para determinar los valores

Los pasos por seguir fueron:

- Se determinó el peso del espécimen seco. Se procedió a pesarlo pasadas 24 horas desde su elaboración, esperando estuviera a temperatura ambiente.
- Se sumergió la muestra en un recipiente lleno de agua a temperatura ambiente durante cinco minutos.
- Se secó la muestra superficialmente y se volvió a pesar, obteniendo de dicha manera el peso seco saturado.
- Se sumergió la muestra nuevamente y se dejó suspendida por 24 horas, esperando que el agua penetrara la muestra. El agua debe estar a temperatura ambiente.
- Pasado el tiempo, se volvió a pesar, obteniendo así el peso saturado.

3.1.2.2. Memoria de cálculo

La fórmula para calcular la gravedad específica de Bulk es la siguiente:

$$Gmb = \frac{w_s}{w_{ss} - w_h}$$

En donde:

w_s es peso seco

w_{ss} es peso seco saturado

w_h es peso saturado

- Primera iteración

Datos:

$$w_s = 1\,254,37\text{ g}$$

$$w_{ss} = 1\,257,99\text{ g}$$

$$w_h = 693,08\text{ g}$$

$$Gmb = \frac{1\,254,37}{1\,257,99 - 693,08} = 2,22$$

- Segunda iteración

Datos:

$$w_s = 1\,268,84\text{ g}$$

$$w_{ss} = 1\,272,27\text{ g}$$

$$w_h = 715,41\text{ g}$$

$$Gmb = \frac{1\,268,84}{1\,272,27 - 715,41} = 2,28$$

- Tercera iteración

Datos:

$$w_s = 1\,272,64\text{ g}$$

$$w_{ss} = 1\,277,35\text{ g}$$

$$w_h = 721,24\text{ g}$$

$$Gmb = \frac{1272,64}{1277,35 - 721,24} = 2,29$$

3.1.2.3. Resultados obtenidos

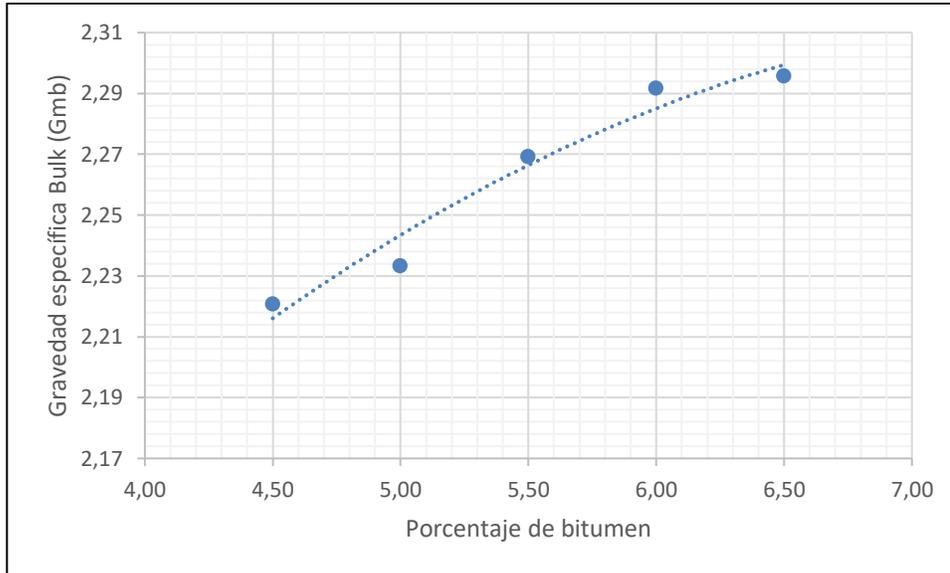
Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de gravedad específica de Bulk son los siguientes:

Tabla V. **Resultados de gravedad específica de Bulk**

Probeta	% bitumen	Peso seco (g)	Peso seco saturado (g)	Peso saturado (g)	Gmb	Promedio
1	4,50	1 254,37	1 257,99	693,08	2,22	2,22
2		1 241,87	1 245,13	685,15	2,22	
3		1 256,80	1 258,90	693,78	2,22	
4	5,00	1 252,04	1 254,67	692,68	2,23	2,23
5		1 257,82	1 260,29	693,67	2,22	
6		1 264,56	1 268,77	707,22	2,25	
7	5,50	1 263,04	1 266,95	712,23	2,28	2,27
8		1 268,84	1 272,27	715,41	2,28	
9		1 254,72	1 263,19	706,01	2,25	
10	6,00	1 258,68	1 263,77	713,54	2,29	2,29
11		1 214,80	1 218,77	688,84	2,29	
12		1 211,52	1 215,61	687,75	2,30	
13	6,50	1 270,99	1 274,94	722,70	2,30	2,30
14		1 265,64	1 271,95	720,95	2,30	
15		1 272,64	1 277,35	721,24	2,29	

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Resultados de gravedad específica de Bulk**



Fuente: elaboración propia.

3.1.3. **Gravedad específica bruta de los agregados**

Ensayo regido por la norma ASTM D 1559.

3.1.3.1. **Procedimiento para determinar los valores**

Los pasos por seguir fueron:

- Se determinó el porcentaje en masa de cada agregado de la mezcla.
- Se obtuvo la gravedad específica bruta de cada agregado de la mezcla a través de la ficha técnica de estos.

3.1.3.2. Muestra de cálculo

La fórmula para calcular la gravedad específica bruta de los agregados es la siguiente:

$$Gsb = \frac{Pgrueso + Pfino}{\frac{Pgrueso}{Ggrueso} + \frac{Pfino}{Gfino}}$$

En donde:

Pgrueso, *Pfino* son los porcentajes en peso del agregado grueso y del agregado fino, respectivamente, en la mezcla.

Ggrueso, *Gfino* son las gravedades específicas brutas del agregado grueso y del agregado fino, respectivamente.

- Primera iteración

Datos:

$$Pgrueso = 41 \%$$

$$Pfino = 59 \%$$

$$Ggrueso = 2,50$$

$$Gfino = 2,46$$

$$Gsb = \frac{41 + 59}{\frac{41}{2,50} + \frac{59}{2,46}} = 2,48$$

3.1.3.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de gravedad específica bruta de los agregados son los siguientes:

Tabla VI. **Resultados de gravedad específica bruta de los agregados**

Tipo de mezcla	% grueso	% fino	G grueso	G fino	Gsb
Tradicional	41,00	59,00	2,50	2,46	2,48

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Gravedad específica teórica máxima Rice

Ensayo regido por las normas ASTM D 2041 y AASHTO T 209.

3.1.4.1. Procedimiento para determinar los valores

Los pasos por seguir fueron:

- Se secó la muestra y se dejó entibiar.
- Se desintegró el espécimen con la mano y se vertió lo obtenido en el picnómetro.
- Se agregó agua a temperatura ambiente, de tal manera que el espejo de agua estuviera 1 pulgada por encima de la mezcla.
- Se colocó el picnómetro con la muestra y el agua sobre el agitador, y se activó la bomba de vacíos.
- Se liberó la presión de vacíos gradualmente, luego de transcurridos 15 minutos.
- Se llenó el picnómetro de agua (evitando vacíos).

- Se secó totalmente y se pesó la masa del picnómetro + muestra + agua.

3.1.4.2. Muestra de cálculo

La fórmula para calcular la gravedad específica teórica máxima Rice es la siguiente:

$$Gmm = \frac{w_s}{w_s + w_{ph} - w_{pmw}}$$

En donde:

w_s es el peso seco de la muestra

w_{ph} es el peso del picnómetro lleno de agua

w_{pmh} es el peso de picnómetro + muestra + agua

- Primera iteración

Datos:

$$w_s = 1\,233,20\text{ g}$$

$$w_{ph} = 7\,380,00\text{ g}$$

$$w_{pmh} = 8\,109,50\text{ g}$$

$$Gmm = \frac{1\,233,20}{1\,233,20 + 7\,380,00 - 8\,109,50} = 2,45$$

- Segunda iteración

Datos:

$$w_s = 1\,253,80\text{ g}$$

$$w_{ph} = 7\,380,00\text{ g}$$

$$w_{pmh} = 8\,114,60\text{ g}$$

$$Gmm = \frac{1\,253,80}{1\,253,80 + 7\,380,00 - 8\,114,60} = 2,41$$

- Tercera iteración

Datos:

$$w_s = 1\,259,90\text{ g}$$

$$w_{ph} = 7\,378,30\text{ g}$$

$$w_{pmh} = 8\,103,14\text{ g}$$

$$Gmm = \frac{1\,259,90}{1\,259,90 + 7\,378,30 - 8\,103,14} = 2,35$$

3.1.4.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de gravedad específica teórica máxima Rice son los siguientes:

Tabla VII. **Resultado de gravedad específica teórica máxima Rice**

Probeta	% bitumen	Peso muestra (g)	Peso matraz + H2O (g)	Peso matraz + H2O + muestra (g)	Gmm
1	4,50	1 233,20	7 380,00	8 109,50	2,45
2	5,00	1 253,80	7 380,00	8 114,60	2,41
3	5,50	1 264,70	7 380,00	8 114,80	2,39
4	6,00	1 207,40	7 378,30	8 076,79	2,37
5	6,50	1 259,90	7 378,30	8 103,14	2,35

Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Gravedad específica efectiva de los agregados

Ensayo regido por la norma ASTM D 1559.

3.1.5.1. Procedimiento para determinar los valores

Los pasos por seguir fueron:

- Se calculó la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.
- Se determinó el porcentaje del bitumen considerando el peso total de la mezcla.
- Se determinó la gravedad específica del cemento asfáltico con base en la ficha técnica.
- Se determinó la gravedad específica efectiva de los agregados.

3.1.5.2. Muestra de cálculo

La fórmula para calcular la gravedad específica efectiva de los agregados es la siguiente:

$$Gse = \frac{100 - Pac}{\frac{100}{Gmm} - \frac{Pac}{Gac}}$$

En donde:

Pac es el porcentaje de cemento asfáltico

Gmm es la gravedad específica teórica máxima de la mezcla

Gac es la gravedad específica del cemento asfáltico

- Primera iteración

Datos:

$$Pac = 4,50 \%$$

$$Gac = 1,06$$

$$Gmm = 2,45$$

$$Gse = \frac{100 - 4,50}{\frac{100}{2,45} - \frac{4,50}{1,06}} = 2,61$$

- Segunda iteración

Datos:

$$Pac = 5,00 \%$$

$$Gac = 1,06$$

$$Gmm = 2,41$$

$$Gse = \frac{100 - 5,00}{\frac{100}{2,41} - \frac{5,00}{1,06}} = 2,59$$

- Tercera iteración

Datos:

$$Pac = 5,50 \%$$

$$Gac = 1,06$$

$$Gmm = 2,39$$

$$Gse = \frac{100 - 5,50}{\frac{100}{2,39} - \frac{5,50}{1,06}} = 2,58$$

3.1.5.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de gravedad específica efectiva de los agregados son los siguientes:

Tabla VIII. **Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados**

Probeta	% bitumen	Gmm	Gac	Gse
1	4,50	2,45	1,06	2,61
2	5,00	2,41	1,06	2,59
3	5,50	2,39	1,06	2,58
4	6,00	2,37	1,06	2,58
5	6,50	2,35	1,06	2,57

Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Peso unitario de la mezcla asfáltica

Ensayo regido por la norma ASTM D 1559.

3.1.6.1. Procedimiento para determinar los valores

Los pasos por seguir fueron:

- Se determina la gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica
- Se determina la densidad del agua (1 g/cm³)
- Se calcula el peso unitario

3.1.6.2. Muestra de cálculo

La fórmula para calcular el peso unitario de la mezcla es la siguiente:

$$PU = \rho * Gmb$$

En donde:

ρ es la densidad del agua

Gmb es la gravedad específica de Bulk

- Primera iteración

Datos:

$$Gmb = 2,22$$

$$PU = 2,22 * 1 = 2,22$$

- Segunda iteración

Datos:

$$Gmb = 2,27$$

$$PU = 2,27 * 1 = 2,27$$

- Tercera iteración

Datos:

$$Gmb = 2,30$$

$$PU = 2,30 * 1 = 2,30$$

3.1.6.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de peso unitario de la mezcla son los siguientes:

Tabla IX. Resultados de peso unitario de la mezcla

% bitumen	Gmb	p (g/cm3)	PU
4,50	2,22	1,00	2,22
5,00	2,23	1,00	2,23
5,50	2,27	1,00	2,27
6,00	2,29	1,00	2,29
6,50	2,30	1,00	2,30

Fuente: elaboración propia.

3.1.7. Porcentaje de vacíos-densidad

Ensayo regido por la norma ASTM D 3203 y AASHTO T 269.

3.1.7.1. Procedimiento para determinar los valores

Los pasos por seguir fueron:

- Se determinó el valor de la gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica.
- Se determinó el valor de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.
- Se calculó el valor del porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

3.1.7.2. Muestra de cálculo

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

$$\%VA = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

En donde:

Gmm es la gravedad teórica máxima

Gmb es la gravedad específica Bulk

- Primera iteración

Datos:

$$Gmm = 2,45$$

$$Gmb = 2,22$$

$$\%VA = \frac{2,45 - 2,22}{2,45} * 100 = 9,30 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$Gmm = 2,39$$

$$Gmb = 2,27$$

$$\%VA = \frac{2,39 - 2,27}{2,39} * 100 = 4,93 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

$$G_{mm} = 2,35$$

$$G_{mb} = 2,30$$

$$\%VA = \frac{2,35 - 2,30}{2,35} * 100 = 2,51 \%$$

3.1.7.3. Resultados obtenidos

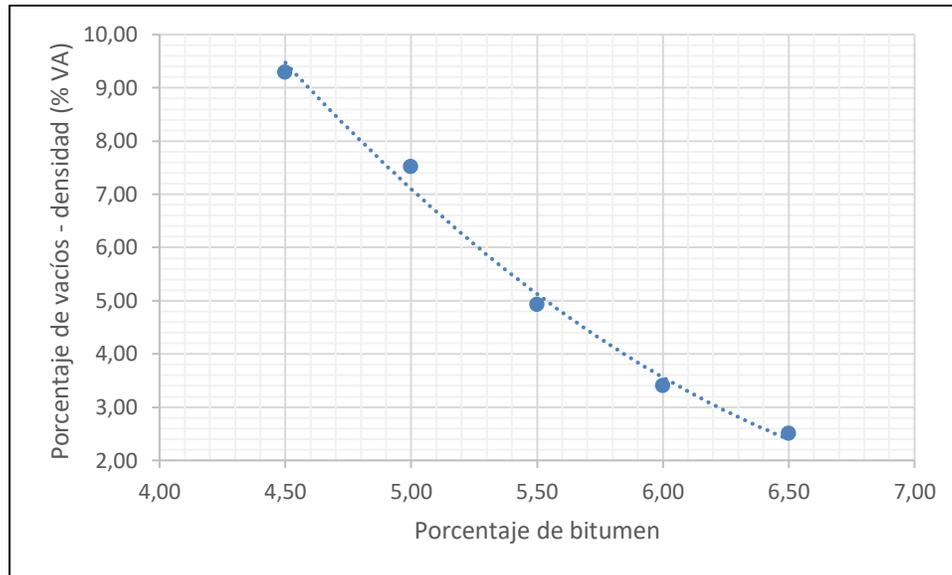
Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de vacíos – densidad son los siguientes:

Tabla X. **Resultados de porcentaje de vacíos – densidad**

Probeta	%bitumen	G_{mb}	G_{mm}	%VA
1,00	4,50	2,22	2,45	9,30
2,00	5,00	2,23	2,41	7,52
3,00	5,50	2,27	2,39	4,93
4,00	6,00	2,29	2,37	3,41
5,00	6,50	2,30	2,35	2,51

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Resultados de porcentaje de vacíos – densidad**



Fuente: elaboración propia.

3.1.8. **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral**

Ensayo regido por la norma ASTM D 1559.

3.1.8.1. **Procedimiento para determinar los valores**

Los pasos por seguir fueron:

- Se calculó la gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica
- Se determinó el porcentaje de agregado en la mezcla
- Se calculó la gravedad específica bruta de los agregados
- Se calcula el porcentaje de vacíos en el agregado mineral

3.1.8.2. Muestra de cálculo

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

$$\%VAM = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

En donde:

Gmb es la gravedad específica Bulk

Gsb es la gravedad específica bruta de los agregados

Ps es el porcentaje de agregados en la mezcla

- Primera iteración

Datos:

$$Gmb = 2,22$$

$$Gsb = 2,48$$

$$Ps = 95,50 \%$$

$$\%VAM = 100 - \frac{2,22 * 95,50}{2,48} = 14,35 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$Gmb = 2,27$$

$$Gsb = 2,48$$

$$Ps = 94,50 \%$$

$$\%VAM = 100 - \frac{2,27 * 94,50}{2,48} = 13,40 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

$$Gmb = 2,30$$

$$Gsb = 2,48$$

$$Ps = 93,50\%$$

$$\%VAM = 100 - \frac{2,30 * 93,50}{2,48} = 13,32 \%$$

3.1.8.3. Resultados obtenidos

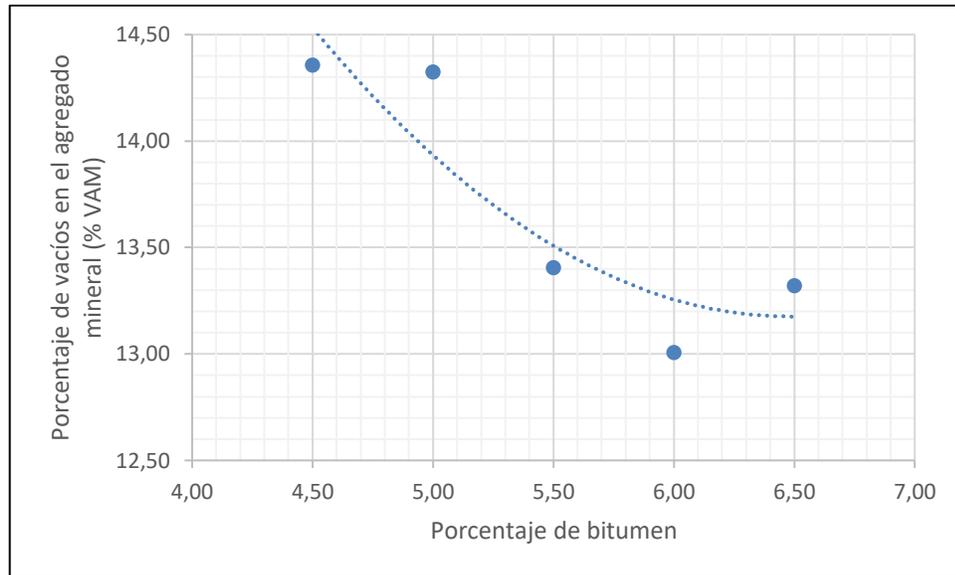
Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de vacíos en el agregado mineral son los siguientes:

Tabla XI. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral**

Probeta	% bitumen	Gmb	%Ps	Gsb	%VAM
1,00	4,50	2,22	95,50	2,48	14,35
2,00	5,00	2,23	95,00	2,48	14,32
3,00	5,50	2,27	94,50	2,48	13,40
4,00	6,00	2,29	94,00	2,48	13,01
5,00	6,50	2,30	93,50	2,48	13,32

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral**



Fuente: elaboración propia.

3.1.9. **Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico**

Ensayo regido por la norma ASTM D 1559.

3.1.9.1. **Procedimiento para determinar los valores**

Los pasos por seguir fueron:

- Se calculó el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica
- Se calculó el porcentaje de vacíos en el agregado mineral
- Se calculó el porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico

3.1.9.2. Muestra de cálculo

La fórmula para calcular el porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico es la siguiente:

$$\%VFA = 100 * \frac{VAM - VA}{VAM}$$

En donde:

VAM es el porcentaje de vacíos en el agregado mineral

VA es el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica

- Primera iteración

Datos:

$$VAM = 14,35 \%$$

$$VA = 9,30 \%$$

$$\%VFA = 100 * \frac{14,35 - 9,30}{14,35} = 35,25 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$VAM = 13,40 \%$$

$$VA = 4,93 \%$$

$$\%VFA = 100 * \frac{13,40 - 4,93}{13,40} = 63,25 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

$$VAM = 13,32 \%$$

$$VA = 2,51 \%$$

$$\%VFA = 100 * \frac{13,32 - 2,51}{13,32} = 81,18 \%$$

3.1.9.3. Resultados obtenidos

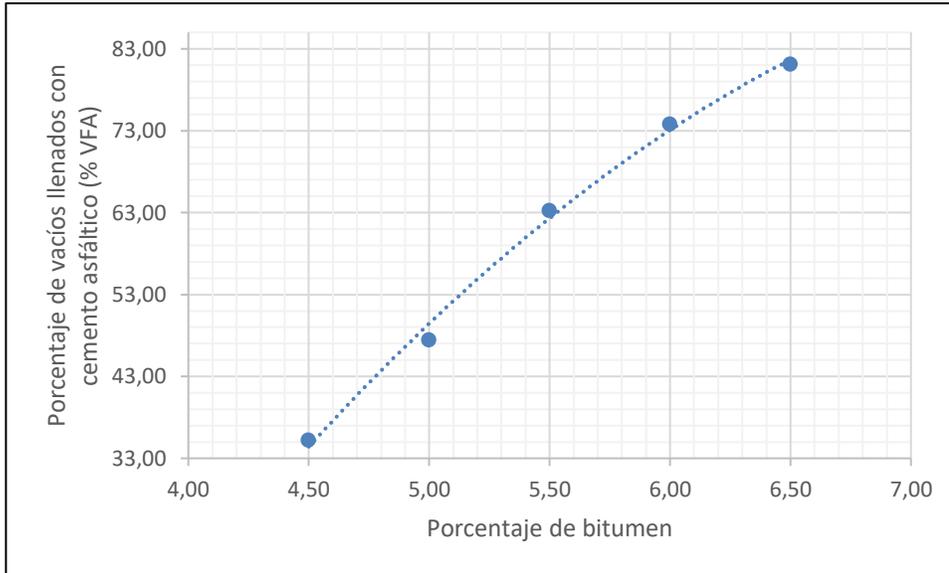
Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico son los siguientes:

Tabla XII. **Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico**

Probeta	% bitumen	%VAM	%VA	%VFA
1,00	4,50	14,35	9,30	35,25
2,00	5,00	14,32	7,52	47,48
3,00	5,50	13,40	4,93	63,25
4,00	6,00	13,01	3,41	73,81
5,00	6,50	13,32	2,51	81,18

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico**



Fuente: elaboración propia.

3.1.10. Relación de relleno mineral/asfalto

Ensayo regido por la norma ASTM D 1559.

3.1.10.1. Procedimiento para determinar los valores

Los pasos por seguir fueron:

- Se determinó la gravedad específica efectiva de los agregados
- Se determinó la gravedad específica bruta de los agregados
- Se calculó el porcentaje del ligante asfáltico absorbido
- Se calculó el porcentaje de agregado en la mezcla asfáltica

- Se calculó el porcentaje de cemento asfáltico efectivo
- Se calculó la relación de relleno mineral/asfalto

3.1.10.2. Muestra de cálculo

La fórmula para calcular la relación de relleno mineral/asfalto es la siguiente:

$$\frac{F}{A} = \frac{\% \text{ que pasa tamiz 200}}{Pbe}$$

En donde:

Pbe es el porcentaje de cemento asfáltico efectivo que se calcula de la siguiente manera:

$$Pbe = Pac - \frac{Pba - Ps}{100}$$

Pac es el porcentaje de bitumen

Ps es el porcentaje de agregado en la mezcla asfáltica

Pba es el porcentaje de bitumen absorbido, que se calcula de la siguiente manera:

$$Pba = \frac{100 * Gac * (Gse - Gsb)}{Gsb * Gse}$$

Gac es la gravedad específica del cemento asfáltico

Gse es la gravedad específica efectiva de los agregados

Gsb es la gravedad específica bruta de los agregados

- Primera iteración

Datos:

$$Gac = 1,06$$

$$Gse = 2,61$$

$$Gsb = 2,48$$

$$Ps = 95,50 \%$$

$$\% \text{ que pasa por tamiz } 200 = 6 \%$$

$$Pba = \frac{100 * 1,06 * (2,61 - 2,48)}{2,61 * 2,48} = 2,19 \%$$

$$Pbe = 4,50 - \frac{2,19 * 95,50}{100} = 2,41 \%$$

$$\frac{F}{A} = \frac{6,00}{2,41} = 2,49$$

- Segunda iteración

Datos:

$$Gac = 1,06$$

$$Gse = 2,58$$

$$Gsb = 2,48$$

$$Ps = 94,50 \%$$

$$\% \text{ que pasa por tamiz } 200 = 6 \%$$

$$Pba = \frac{100 * 1,06 * (2,58 - 2,48)}{2,58 * 2,48} = 1,64 \%$$

$$Pbe = 5,50 - \frac{1,64 * 94,50}{100} = 3,95 \%$$

$$\frac{F}{A} = \frac{6,00}{3,95} = 1,52$$

- Tercera iteración

Datos:

$$Gac = 1,06$$

$$Gse = 2,57$$

$$Gsb = 2,48$$

$$Ps = 93,50 \%$$

$$\% \text{ que pasa por tamiz 200} = 6 \%$$

$$Pba = \frac{100 * 1,06 * (2,57 - 2,48)}{2,57 * 2,48} = 1,63 \%$$

$$Pbe = 6,50 - \frac{1,63 * 93,50}{100} = 4,98 \%$$

$$\frac{F}{A} = \frac{6,00}{4,98} = 1,21$$

3.1.10.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de la relación de relleno mineral/asfalto son los siguientes:

Tabla XIII. **Resultados de porcentaje de ligante asfáltico absorbido**

Probeta	% bitumen	Gac	Gse	Gsb	% Pba
1	4,50	1,06	2,61	2,48	2,19
2	5,00	1,06	2,59	2,48	1,87
3	5,50	1,06	2,58	2,48	1,64
4	6,00	1,06	2,58	2,48	1,67
5	6,50	1,06	2,57	2,48	1,63

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados de porcentaje de cemento asfáltico efectivo**

Probeta	% bitumen	%Pba	%Ps	%Pbe
1	4,50	2,19	95,50	2,41
2	5,00	1,87	95,00	3,22
3	5,50	1,64	94,50	3,95
4	6,00	1,67	94,00	4,43
5	6,50	1,63	93,50	4,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados de relación de relleno mineral/asfalto**

Probeta	% bitumen	% pasa tamiz 200	%Pbe	F/A
1	4,50	6,00	2,41	2,49
2	5,00	6,00	3,22	1,86
3	5,50	6,00	3,95	1,52
4	6,00	6,00	4,43	1,36
5	6,50	6,00	4,98	1,21

Fuente: elaboración propia.

3.1.11. Contenido de humedad

Ensayo regido por la norma ASTM C 566 – 97.

3.1.11.1. Procedimiento para determinar los valores

Los pasos por seguir fueron:

- Se determinaron los pesos a utilizar, mismos que los utilizados para el cálculo de gravedad específica de Bulk.
- Se calculó el valor de contenido de humedad.

3.1.11.2. Muestra de cálculo

La fórmula para calcular el contenido de humedad es la siguiente:

$$\%H = \frac{w_{ss} - w_s}{w_{ss} - w_h} * 100$$

En donde:

w_s es el peso seco de la muestra

w_{ss} es el peso seco saturado de la muestra

w_h es el peso saturado de la muestra

- Primera iteración

Datos:

$$w_s = 1\,256,80\text{ g}$$

$$w_{ss} = 1\,258,90\text{ g}$$

$$w_h = 678,78 \text{ g}$$

$$\%H = \frac{1\,258,90 - 1\,256,80}{1\,258,90 - 678,78} * 100 = 0,36 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$w_s = 1\,254,72 \text{ g}$$

$$w_{ss} = 1\,263,19 \text{ g}$$

$$w_h = 685,01 \text{ g}$$

$$\%H = \frac{1\,263,19 - 1\,254,72}{1\,263,19 - 685,01} * 100 = 1,46 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

$$w_s = 1\,270,99 \text{ g}$$

$$w_{ss} = 1\,274,94 \text{ g}$$

$$w_h = 708,70 \text{ g}$$

$$\%H = \frac{1\,274,94 - 1\,270,99}{1\,274,94 - 708,70} * 100 = 0,82 \%$$

3.1.11.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo del contenido de humedad son los siguientes:

Tabla XVI. **Resultados de contenido de humedad**

Probeta	% bitumen	Peso seco (g)	Peso seco saturado (g)	Peso saturado (g)	%H	Promedio
1,00	4,50	1 254,37	1 257,99	683,08	0,63	0,52
2,00		1 241,87	1 245,13	671,15	0,57	
3,00		1 256,80	1 258,90	678,78	0,36	
4,00	5,00	1 252,04	1 262,67	668,68	1,79	1,21
5,00		1 257,82	1 264,29	674,67	1,10	
6,00		1 264,56	1 268,77	691,22	0,73	
7,00	5,50	1 263,04	1 266,95	696,50	0,69	1,14
8,00		1 268,84	1 276,27	693,56	1,28	
9,00		1 254,72	1 263,19	685,01	1,46	
10,00	6,00	1 258,68	1 268,77	689,74	1,74	1,07
11,00		1 214,80	1 218,77	668,84	0,72	
12,00		1 211,52	1 215,61	671,75	0,75	
13,00	6,50	1 270,99	1 274,94	708,70	0,70	0,86
14,00		1 265,64	1 271,95	685,37	1,08	
15,00		1 272,64	1 277,35	701,24	0,82	

Fuente: elaboración propia.

3.1.12. Prueba de estabilidad – flujo Marshall

Ensayo regido por las normas ASTM D 1559 y AASHTO T 245.

3.1.12.1. Equipo por utilizar

- Mordazas de hierro fundido.
- Máquina de compresión para la rotura de las probetas.
- Anillo dinamométrico.
- Deformímetro de lectura final fija.

- Recipiente metálico capaz de retener las probetas sobre una película delgada de agua.

3.1.12.2. Procedimientos para determinar los valores

Los pasos por seguir fueron:

- Se colocaron las probetas en un «baño maría» por 45 minutos con agua a una temperatura de 60 °C.
- Se secó superficialmente la probeta y se colocó en la máquina para ser ensayada, se aplicó la carga y se obtuvieron las lecturas del dinamómetro y deformímetro.
- De las lecturas obtenidas, se calculó la resistencia en libra fuerza (lbf) y se procedió a corregirla.

3.1.12.3. Muestra de cálculo

Para calcular la estabilidad corregida:

- Con base en la tabla del anexo 1, se convierte la lectura dinamométrica obtenida en la prueba al valor de estabilidad – flujo Marshall en libras-fuerza (lbf).
- Con base en los datos de volumen del espécimen especificados en la tabla del anexo 2, y haciendo uso de la tabla del anexo 3, se obtiene el factor de corrección.
- La estabilidad corregida será el producto entre el valor de estabilidad en lbf por el factor de corrección.

- Primera iteración

Datos:

$$\text{Estabilidad} = 225,00 = 2\,134,91 \text{ lbf}$$

$$\text{Factor de corrección} = 1,14$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 2\,134,911 * 1,14 = 2\,433,79 \text{ lbf}$$

- Segunda iteración

Datos:

$$\text{Estabilidad} = 415,00 = 3\,921,70 \text{ lbf}$$

$$\text{Factor de corrección} = 1,39$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 3\,921,70 * 1,39 = 5\,451,16 \text{ lbf}$$

- Tercera iteración

Datos:

$$\text{Estabilidad} = 321,00 = 3\,039,62 \text{ lbf}$$

$$\text{Factor de corrección} = 1,19$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 3\,039,62 * 1,19 = 3\,617,15 \text{ lbf}$$

3.1.12.4. Resultados obtenidos

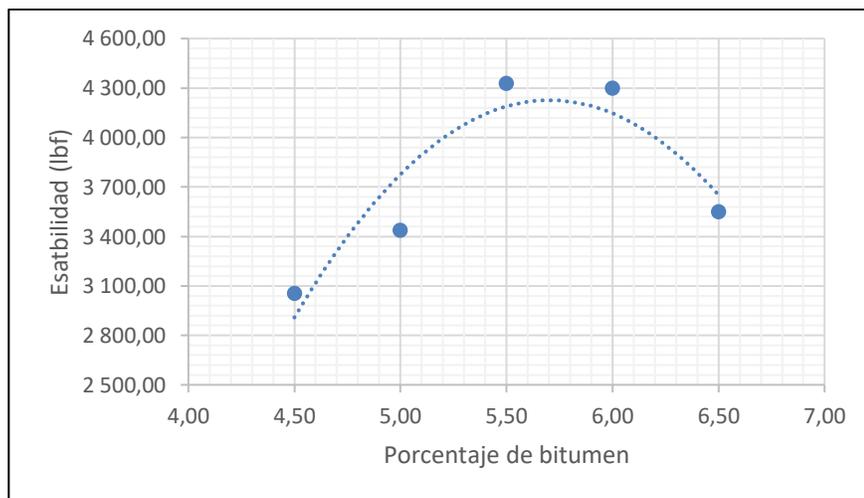
Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de estabilidad – flujo Marshall son los siguientes:

Tabla XVII. **Resultados de estabilidad – flujo Marshall**

Probeta	% bitumen	Lectura dinanométrico	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbf)	Flujo (0,01")
1	4,50	225,00	2 134,91	1,14	2 433,79	8,00
2		260,00	2 465,09	1,14	2 810,21	9,00
3		348,00	3 293,40	1,19	3 919,14	8,00
4	5,00	266,00	2 521,70	1,19	3 000,82	9,00
5		268,00	2 540,57	1,32	3 353,55	10,00
6		316,00	2 999,75	1,32	3 959,67	11,00
7	5,50	342,00	3 236,79	1,32	4 272,57	10,00
8		415,00	3 921,70	1,39	5 451,16	11,00
9		289,00	2 738,68	1,19	3 259,03	11,00
10	6,00	371,00	3 509,43	1,25	4 386,79	15,00
11		366,00	3 462,26	1,19	4 120,09	14,00
12		390,00	3 687,74	1,19	4 388,41	13,00
13	6,50	338,00	3 199,07	1,25	3 998,84	15,00
14		281,00	2 663,21	1,14	3 036,06	15,00
15		321,00	3 039,62	1,19	3 617,15	16,00

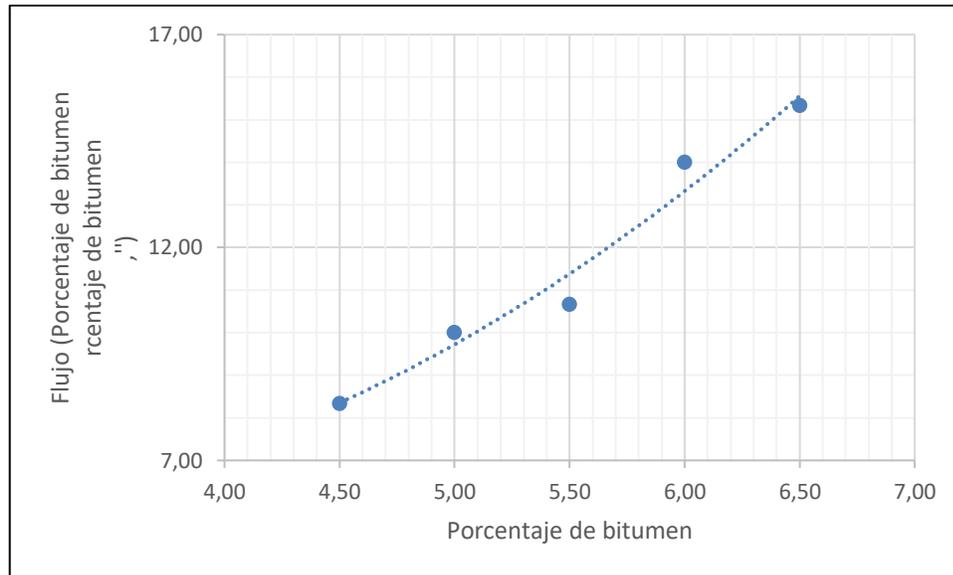
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Resultados de estabilidad Marshall**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Resultados de flujo Marshall**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Ensayos realizados para evaluar la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas utilizando la prueba de tracción indirecta

El procedimiento por emplear para preparar y evaluar la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas, utilizando la prueba de tracción indirecta, está detallado en la Norma INV-725-13. Es aplicable a las mezclas densas.

3.2.1. Equipo por utilizar

- Elementos para preparación y compactación
- Bomba de vacío
- Manómetro
- Balanza

- Tres baños de agua
- Prensa Marshall
- Franjas de carga

3.2.2. Procedimiento por seguir

El procedimiento descrito a continuación se puede emplear para probar mezclas asfálticas, junto con los ensayos requerido para el diseño de la mezcla, para establecer el potencial de daño por humedad.

3.2.2.1. Gravedad específica Bulk

Se determina la gravedad específica máxima medida de la mezcla, de acuerdo con la norma INV E-733 (tabla V).

3.2.2.2. Volumen de cada espécimen

Se determina el volumen de cada espécimen, como se indica en la norma INV E-733.

$$Volumen = B - C$$

En donde:

B es el peso seco saturado

C es el peso saturado

- Primera iteración

Datos:

$$B = 1\,286,50\text{ g} = 1\,286,50\text{ cm}^3$$

$$C = 693,08\text{ g} = 693,08\text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen} = 1\,286,50 - 693,08 = 593,42\text{ cm}^3$$

- Segunda iteración

Datos:

$$B = 1\,289,30\text{ g} = 1\,289,30\text{ cm}^3$$

$$C = 715,41\text{ g} = 715,41\text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen} = 1\,289,30 - 715,41 = 573,89\text{ cm}^3$$

- Tercera iteración

Datos:

$$B = 1\,280,35\text{ g} = 1\,280,35\text{ cm}^3$$

$$C = 721,24\text{ g} = 721,24\text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen} = 1\,280,35 - 721,24 = 559,11\text{ cm}^3$$

3.2.2.2.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del cálculo del volumen de los especímenes son los siguientes:

Tabla XVIII. **Resultado de volumen de cada espécimen**

Probeta	% bitumen	Peso seco saturado	Peso saturado	Volumen (cm3)
1	4,50	1 286,50	693,08	593,42
2		1 271,99	685,15	586,84
3		1 288,90	693,78	595,12
4	5,00	1 279,67	692,68	586,99
5		1 290,29	693,67	596,62
6		1 298,77	707,22	591,55
7	5,50	1 283,95	712,23	571,72
8		1 289,30	715,41	573,89
9		1 272,19	706,01	566,18
10	6,00	1 269,77	713,54	556,23
11		1 226,26	688,84	537,42
12		1 223,61	687,75	535,86
13	6,50	1 280,01	722,70	557,31
14		1 273,95	720,95	553,00
15		1 280,35	721,24	559,11

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.3. Volumen de vacíos con aire en los especímenes

El volumen de vacíos con aire se calcula multiplicando el volumen total encontrado por el porcentaje de vacíos con aire (tabla X).

$$\text{Volumen de vacíos de aire} = \%VA * \frac{\text{volumen}}{100}$$

- Primera iteración

Datos:

$$\%VA = 9,30 \%$$

$$\text{Volumen} = 593,42 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de vacíos de aire} = 9,30 * \frac{593,42}{100} = 55,16 \text{ cm}^3$$

- Segunda iteración

Datos:

$$\%VA = 4,93 \%$$

$$\text{Volumen} = 573,89 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de vacíos de aire} = 4,93 * \frac{573,89}{100} = 28,27 \text{ cm}^3$$

- Tercera iteración

Datos:

$$\%VA = 2,51 \%$$

$$\text{Volumen} = 559,11 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de vacíos de aire} = 2,51 * \frac{559,11}{100} = 7,71 \text{ cm}^3$$

3.2.2.3.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del cálculo del volumen de los vacíos de aire son los siguientes:

Tabla XIX. **Resultados de volumen de vacíos de aire**

Probeta	% bitumen	Volumen (cm3)	%VA	Volumen de aire (cm3)
1	4,50	593,42	9,30	55,16
2		586,84	9,30	54,55
3		595,12	9,30	55,32
4	5,00	586,99	7,52	44,16
5		596,62	7,52	44,88
6		591,55	7,52	44,50
7	5,50	571,72	4,93	28,16
8		573,89	4,93	28,27
9		566,18	4,93	27,89
10	6,00	556,23	3,41	18,95
11		537,42	3,41	18,31
12		535,86	3,41	18,26
13	6,50	557,31	2,51	13,97
14		553,00	2,51	13,86
15		559,11	2,51	14,02

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.4. **Volumen de agua absorbida**

Utilizando una cámara de vacío, se satura parcialmente con agua destilada a temperatura ambiente, aplicando un vacío parcial de 525 mm Hg durante 5 minutos.

Se determina el volumen de agua absorbida, restando el peso seco, el peso seco saturado y el peso saturado.

$$\text{Volumen de agua absorbida} = B - A$$

En donde:

A es el peso seco

B es el peso seco saturado

- Primera iteración

Datos:

$$A = 1\,254,37\text{ g} = 1\,254,37\text{ cm}^3$$

$$B = 1\,286,50\text{ g} = 1\,286,50\text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de agua absorbida} = 1\,286,50 - 1\,254,37 = 32,13\text{ cm}^3$$

- Segunda iteración

Datos:

$$A = 1\,268,84\text{ g} = 1\,268,84\text{ cm}^3$$

$$B = 1\,289,30\text{ g} = 1\,289,30\text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de agua absorbida} = 1\,289,30 - 1\,268,84 = 20,46\text{ cm}^3$$

- Tercera iteración

Datos:

$$A = 1\,272,64\text{ g} = 1\,272,64\text{ cm}^3$$

$$B = 1\,280,35\text{ g} = 1\,280,35\text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de agua absorbida} = 1\,280,35 - 1\,272,64 = 7,71\text{ cm}^3$$

3.2.2.4.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del cálculo del volumen del agua absorbida son los siguientes:

Tabla XX. Resultados de volumen de agua absorbida

Probeta	% bitumen	Peso seco	Peso seco saturado	V _{wa}
1	4,50	1 254,37	1 286,50	32,13
2		1 241,87	1 271,99	30,12
3		1 256,80	1 288,90	32,10
4	5,00	1 252,04	1 279,67	27,63
5		1 257,82	1 290,29	32,47
6		1 264,56	1 298,77	34,21
7	5,50	1 263,04	1 283,95	20,91
8		1 268,84	1 289,30	20,46
9		1 254,72	1 272,19	17,47
10	6,00	1 258,68	1 269,77	11,09
11		1 214,80	1 226,26	11,46
12		1 211,52	1 223,61	12,09
13	6,50	1 270,99	1 280,01	9,02
14		1 265,64	1 273,95	8,31
15		1 272,64	1 280,35	7,71

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.5. Grado de saturación

Se calcula el grado de saturación dividiendo el volumen de agua absorbida por el volumen de vacíos con aire. El resultado se expresa en porcentaje. Si el volumen de agua está entre 55 y 80 % del volumen de aire, se continúa con la prueba. Si es menor de 55 %, se repite el procedimiento, pero usando un vacío parcial ligeramente superior. Si es mayor de 80 %, el espécimen se ha dañado y se debe descartar.

$$GS = \frac{\text{Volumen de agua absorbida}}{\text{Volumen de vacíos con aire}} * 100$$

- Primera iteración

Datos:

$$\text{Volumen de agua absorbida} = 32,13 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de vacíos con aire} = 55,16 \text{ cm}^3$$

$$GS = \frac{32,13}{55,16} * 100 = 58,25 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$\text{Volumen de agua absorbida} = 20,46 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de vacíos con aire} = 28,27 \text{ cm}^3$$

$$GS = \frac{20,46}{28,27} * 100 = 72,38 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

$$\text{Volumen de agua absorbida} = 7,71 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de vacíos con aire} = 14,02 \text{ cm}^3$$

$$GS = \frac{7,71}{14,02} * 100 = 55,01 \%$$

3.2.2.5.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del cálculo del grado de saturación de las muestras son los siguientes:

Tabla XXI. Resultados grado de saturación

Probeta	% bitumen	Volumen de aire (cm3)	Vwa	% saturación
1	4,50	55,16	32,13	58,25
2		54,55	30,12	55,22
3		55,32	32,10	58,03
4	5,00	44,16	27,63	62,57
5		44,88	32,47	72,35
6		44,50	34,21	76,88
7	5,50	28,16	20,91	74,26
8		28,27	20,46	72,38
9		27,89	17,47	62,65
10	6,00	18,95	11,09	58,52
11		18,31	11,46	62,59
12		18,26	12,09	66,23
13	6,50	13,97	9,02	64,56
14		13,86	8,31	59,94
15		14,02	7,71	55,01

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.6. Resistencia a la tensión

Se determina la resistencia a la tensión de ambos subgrupos (secos y expuestos al agua). Se coloca el espécimen en el aparato de carga, con las franjas de carga centradas y paralelas sobre el plano diametral vertical. Se aplica una carga diametral a una carga de deformación hasta que alcance la carga máxima y se registra dicha carga.

Para el cálculo de la resistencia a la tensión, se sigue la siguiente fórmula:

$$R_T = \frac{2P}{\pi * t * D}$$

En donde:

P es la carga máxima

t es la altura del espécimen

D es el diámetro del espécimen

Tanto t como D son encontrados midiendo el espécimen, utilizando un vernier como apoyo.

- Primera iteración

Datos:

$$P = 81,30 \text{ lbf}$$

$$t = 2,82 \text{ plg}$$

$$D = 4,00 \text{ plg}$$

$$R_T = \frac{2 * 81,30}{\pi * 2,82 * 4,00} = 4,59 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

- Segunda iteración

Datos:

$$P = 114,56 \text{ lbf}$$

$$t = 2,63 \text{ plg}$$

$$D = 4,02 \text{ plg}$$

$$R_T = \frac{2 * 114,56}{\pi * 2,63 * 4,02} = 6,89 \frac{lbf}{plg^2}$$

- Tercera iteración

Datos:

$$P = 131,96 \text{ lbf}$$

$$t = 2,87 \text{ plg}$$

$$D = 4,01 \text{ plg}$$

$$R_T = \frac{2 * 131,96}{\pi * 2,87 * 4,01} = 7,29 \frac{lbf}{plg^2}$$

3.2.2.6.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del cálculo de la resistencia a la tensión son los siguientes:

Tabla XXII. **Resultados de resistencia a la tensión de los especímenes ensayados en seco**

Probeta	% bitumen	Diámetro (plg)	Altura (plg)	Carga máxima (lbf)	RTS (lb/plg²)
1	4,50	4,00	2,82	81,30	4,59
2		4,01	2,84	84,75	4,74
3		4,00	2,88	83,23	4,60
4	5,00	4,02	2,90	94,30	5,15
5		4,03	2,90	94,05	5,13
6		3,99	2,87	97,61	5,42
7	5,50	4,03	2,67	110,82	6,57
8		4,02	2,63	114,56	6,89
9		4,06	2,80	117,89	6,60
10	6,00	4,01	2,88	123,46	6,81
11		3,99	2,70	129,60	7,64
12		4,00	2,69	127,49	7,55
13	6,50	4,00	2,80	130,01	7,41
14		4,00	2,95	131,05	7,07
15		4,01	2,87	131,96	7,29

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados de resistencia a la tensión de los especímenes ensayados bajo efecto del agua**

Probeta	% bitumen	Diámetro (plg)	Altura (plg)	Carga máxima (lbf)	RTS (lb/plg ²)
1	4,50	4,04	2,86	73,61	4,06
2		4,05	2,86	79,82	4,38
3		4,04	2,90	75,40	4,10
4	5,00	4,06	2,82	89,70	4,99
5		4,07	2,93	86,47	4,61
6		4,03	2,90	91,78	5,00
7	5,50	4,07	2,70	105,64	6,12
8		4,06	2,65	103,02	6,10
9		4,10	2,84	107,59	5,89
10	6,00	4,05	2,90	116,53	6,31
11		4,03	2,74	121,81	7,02
12		4,04	2,70	119,56	6,97
13	6,50	4,04	2,72	119,91	6,95
14		4,04	2,96	122,88	6,54
15		4,05	2,99	122,79	6,46

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.7. Relación de resistencia a la tensión

Teniendo los datos encontrados de la resistencia a la tensión de los especímenes ensayados en seco, y los valores de la resistencia a la tensión de los especímenes ensayados bajo efecto del agua, se determina la relación de resistencias de la siguiente manera:

$$RRT = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} * 100$$

- Primera iteración

Datos:

$$R_{TH} = 4,06 \frac{lb}{plg^2}$$

$$R_{TS} = 4,59 \frac{lb}{plg^2}$$

$$RRT = \frac{4,06}{4,59} * 100 = 88,48 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$R_{TH} = 6,10 \frac{lb}{plg^2}$$

$$R_{TS} = 6,89 \frac{lb}{plg^2}$$

$$RRT = \frac{6,10}{6,89} * 100 = 88,49 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

$$R_{TH} = 6,46 \frac{lb}{plg^2}$$

$$R_{TS} = 7,29 \frac{lb}{plg^2}$$

$$RRT = \frac{6,46}{7,29} * 100 = 88,56 \%$$

3.2.2.7.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la realización del cálculo de la relación de resistencia a la tensión son los siguientes:

Tabla XXIV. **Resultados de relación de resistencia a la tensión**

RTS (lb/plg2)	RTH (lb/plg2)	%RRT
4,59	4,06	88,48
4,74	4,38	92,55
4,60	4,10	89,14
5,15	4,99	96,77
5,13	4,61	90,02
5,42	5,00	92,26
6,57	6,12	93,17
6,89	6,10	88,49
6,60	5,89	89,19
6,81	6,31	92,74
7,64	7,02	91,86
7,55	6,97	92,34
7,41	6,95	93,85
7,07	6,54	92,49
7,29	6,46	88,56

Fuente: elaboración propia.

Nota: los informes de los ensayos realizados en el Laboratorio de Asfaltos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos no fueron presentados debido a causas de fuerza mayor.

CONCLUSIONES

1. Las mezclas asfálticas ensayadas con el método Lottman se ven afectadas por la humedad incluida dentro de la mezcla asfáltica, con lo que se puede decir que la humedad acelera el proceso de envejecimiento y daña la cohesión en las mezclas para facilitar su deterioro. Este dato obtenido no se puede determinar con el método de diseño Marshall convencional.
2. A mayor cantidad de bitumen, los vacíos empiezan a disminuir debido a que el contenido de asfalto efectivo aumenta, entonces la humedad tendrá menos efecto dentro de las mezclas asfálticas. Si el porcentaje de vacíos disminuye, la humedad tendrá consecuencias rápidas en la separación de partículas dentro de la mezcla asfáltica.
3. La resistencia a la carga disminuye considerablemente en las probetas secas y las saturadas, teniendo en cuenta que la exposición a la humedad es por un periodo corto siguiendo los parámetros y condiciones de la norma utilizada, pero afectando directamente a la carga a soportar por la probeta de mezcla asfáltica.
4. La evaluación directa con el método de diseño Marshall y con el ensayo de tracción indirecta Lottman son recíprocamente complementarios. Los datos obtenidos con el ensayo Lottman se pueden considerar sobre el efecto de la carga y humedad en el funcionamiento directo de la mezcla asfáltica en el pavimento colocado en campo. Con esto se obtiene un

mejor parámetro de esfuerzo que sufre la carpeta de rodadura en la estructura del pavimento.

5. La humedad es un efecto que se debe tomar en cuenta en el diseño de las mezclas asfálticas a nivel nacional, debido a que las precipitaciones pluviales causan una saturación de las vías pavimentadas y el efecto de las cargas vehiculares causa un efecto de tracción indirecta en el área donde se aplica la carga de los ejes.
6. La cantidad de bitumen no debe ser excesiva para evitar que la humedad entre en contacto con el agregado y, de esta manera, se oxide y envejezca rápidamente la mezcla asfáltica, debido a que el exceso puede ocasionar deformaciones prematuras y permanentes.
7. El cambio de volumen ocasionado por la humedad dentro de la mezcla asfáltica es muy pequeño, pero al tener una mezcla asfáltica con cierto contenido de humedad y ser sometido a una carga, el vapor ocasionado por la presión y el contenido de agua es altamente perjudicial en la mezcla.

RECOMENDACIONES

1. El efecto de la humedad dentro de las mezclas asfálticas es un parámetro que se debe considerar en el diseño de las mismas, ya que el territorio nacional se ve afectado durante la época lluviosa por cantidades de humedad muy grandes y en algunas áreas, en que se tiene precipitaciones en la época seca, las lluvias pueden ocasionar daños considerables en la carpeta asfáltica, provocando envejecimiento prematuro, desprendimiento de partículas y fallas por fatiga.
2. Cada diseño de mezcla debe analizarse debido a que las características de bitumen y agregado cambian de un punto a otro, y el efecto de la humedad será diferente.
3. Si el área donde se construirá o se hará un recapeo de la carretera está sujeta a condiciones climáticas críticas, el ensayo debe acoplarse a estas condiciones.
4. Debe considerarse el cambio volumétrico cuando la mezcla asfáltica absorbe el agua, debido a que este cambio también acelera el daño en la capa de rodadura por el cambio brusco al que se somete cuando se le aplican grandes cargas, como las generadas por el tránsito vehicular.
5. Se debe considerar tener estas especificaciones de ensayo dentro de las *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes* de la Dirección General de Caminos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Ciudad de Guatemala: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2001. 724 p.
2. GARROTE VILLAR, Elisabet. *Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas*. [en línea]. <<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3324>>. [Consulta: 28 de junio de 2020].
3. GÓMEZ JERÓNIMO, Carlos Francisco. *Propiedades mecánicas de un concreto asfáltico, modificado con residuos de vidrio templado y cal, comparado con una mezcla de diseño tradicional*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019. 41 p.
4. Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. Venezuela: Instituto del Asfalto, 1922. 292 p.
5. MARTÍNEZ, Adriana Haydée. *Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución*. Trabajo de graduación S. D. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, 2000. 149 p.

6. MOREA, Francisco. *Mezclas asfálticas semicalientes elaboradas con aditivos tensoactivos. Estudios comparativos del comportamiento mecánico respecto a las mezclas en caliente convencionales*. [en línea]. <<https://core.ac.uk/download/pdf/153561007.pdf>>. [Consulta: 28 de mayo de 2020].
7. Normas Españolas NTL 346/90. *Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas*. [en línea]. <<http://normativa.itafec.com/ensayos/ES.12.02.155.LT.pdf>>. [Consulta: 28 de junio de 2020].
8. WAHR DANIEL, Carlos; MARIPANGUI PAZ, Erika; DÍAZ ORTÍZ, Mario. *Control de calidad de mezclas bituminosas mediante el ensayo de resistencia a tracción indirecta de Barcelona*. Barcelona, España: Universidad Técnica Federico Santa María, 2022. 9 p.
9. WELLMANN VON QUEDNOW, Werner Federico. *Diseño y construcción de mezclas asfálticas tipo SMA*. [en línea]. <<http://biblio3.url.edu.gt/Tesis/2005/02/01/Wellmann-Werner.pdf>>. [Consulta 20 de mayo de 2020].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Equipo utilizado para realizar las probetas de la mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Preparación de proporciones para la mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Compactación de probetas de mezcla asfáltica



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Tabla de factores de corrección de estabilidad Marshall**

CORRECCION DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD		
Volumen de la briqueta cm³	Espesor aproximado de la briqueta en cm	Factor de corrección
200-213	2.54	5.56
214-225	2.70	5.00
226-237	2.86	4.55
238-250	3.02	4.17
251-264	3.17	3.85
265-276	3.33	3.57
277-289	3.49	3.33
290-301	3.65	3.03
302-316	3.81	2.78
317-328	3.97	2.50
329-340	4.13	2.27
341-353	4.29	2.08
354-367	4.44	1.92
368-379	4.60	1.79
390-392	4.76	1.67
393-405	4.92	1.56

Volumen de la briqueta cm³	Espesor aproximado de la briqueta en cm	Factor de corrección
406-420	5.08	1.47
421-431	5.24	1.39
432-443	5.40	1.32
444-456	5.56	1.25
457-470	5.71	1.19
471-482	5.87	1.14
483-495	6.03	1.09
496-508	6.19	1.04
509-522	6.35	1.00
523-535	6.51	0.96
536-546	6.67	0.93
547-559	6.82	0.89
560-573	6.98	0.86
574-585	7.14	0.83
586-598	7.30	0.81
599-610	7.46	0.78
611-625	7.62	0.76

Fuente: ASTM International. ASTM D 1559. *Diseño de mezclas de método Marshall e interpretación de resultados.* p. 6-7.

Anexo 2. Tabla Humboldt Mfg. Co. Corrección de estabilidad Marshall

7300 W. AGATITE AVE.
MORRIDGE, IL 60706

4 SEP 20

RECOMMEND RECALIBRATION ONE YEAR FROM START OF USE AFTER LAST CALIBRATION
CALIBRATION FOR MODEL H-4454.100 11000 LBF SERIAL 2366 BY *C. Blackman*
CALIBRATED USING LOAD CELL 626314 CAL. DATE 10/11/07 DEFLT=.0001 in.

LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT
0	.1	1000	105.1	3500	370.0	6000	637.5	8500	908.9
20	2.2	1050	110.4	3550	375.3	6050	643.3	8550	914.4
40	4.3	1100	115.7	3600	380.7	6100	648.7	8600	919.8
60	6.4	1150	121.0	3650	386.0	6150	654.1	8650	925.3
80	8.5	1200	126.2	3700	391.3	6200	659.5	8700	930.7
100	10.5	1250	131.5	3750	396.7	6250	664.9	8750	936.2
120	12.6	1300	136.8	3800	402.0	6300	670.3	8800	941.6
140	14.7	1350	142.0	3850	407.3	6350	675.7	8850	947.1
160	16.8	1400	147.3	3900	412.7	6400	681.1	8900	952.6
180	18.9	1450	152.6	3950	418.0	6450	686.5	8950	958.0
200	21.0	1500	157.9	4000	423.3	6500	691.9	9000	963.5
220	23.1	1550	163.2	4050	428.7	6550	697.3	9050	968.9
240	25.2	1600	168.4	4100	434.0	6600	702.7	9100	974.4
260	27.3	1650	173.7	4150	439.4	6650	708.1	9150	979.9
280	29.4	1700	179.0	4200	444.7	6700	713.5	9200	985.3
300	31.5	1750	184.3	4250	450.1	6750	718.9	9250	990.8
320	33.6	1800	189.6	4300	455.4	6800	724.3	9300	996.3
340	35.7	1850	194.9	4350	460.8	6850	729.7	9350	1001.8
360	37.8	1900	200.1	4400	466.1	6900	735.1	9400	1007.2
380	39.9	1950	205.4	4450	471.5	6950	740.5	9450	1012.7
400	42.0	2000	210.7	4500	476.8	7000	746.0	9500	1018.2
420	44.1	2050	216.0	4550	482.2	7050	751.4	9550	1023.6
440	46.2	2100	221.3	4600	487.5	7100	756.8	9600	1029.1
460	48.3	2150	226.6	4650	492.9	7150	762.2	9650	1034.6
480	50.4	2200	231.9	4700	498.2	7200	767.6	9700	1040.1
500	52.5	2250	237.2	4750	503.6	7250	773.0	9750	1045.6
520	54.6	2300	242.5	4800	508.9	7300	778.5	9800	1051.0
540	56.7	2350	247.8	4850	514.3	7350	783.9	9850	1056.5
560	58.8	2400	253.1	4900	519.7	7400	789.3	9900	1062.0
580	61.0	2450	258.4	4950	525.0	7450	794.7	9950	1067.5
600	63.1	2500	263.7	5000	530.4	7500	800.2	10000	1073.0
620	65.2	2550	269.0	5050	535.8	7550	805.6	10050	1078.5
640	67.3	2600	274.3	5100	541.1	7600	811.0	10100	1084.0
660	69.4	2650	279.6	5150	546.5	7650	816.4	10150	1089.5
680	71.5	2700	284.9	5200	551.9	7700	821.9	10200	1094.9
700	73.6	2750	290.2	5250	557.2	7750	827.3	10250	1100.4
720	75.7	2800	295.5	5300	562.6	7800	832.7	10300	1105.9
740	77.8	2850	300.8	5350	568.0	7850	838.2	10350	1111.4
760	79.9	2900	306.2	5400	573.3	7900	843.6	10400	1116.9
780	82.0	2950	311.5	5450	578.7	7950	849.0	10450	1122.4
800	84.1	3000	316.8	5500	584.1	8000	854.5	10500	1127.9
820	86.2	3050	322.1	5550	589.5	8050	859.9	10550	1133.4
840	88.3	3100	327.4	5600	594.9	8100	865.4	10600	1138.9
860	90.4	3150	332.7	5650	600.2	8150	870.8	10650	1144.4
880	92.5	3200	338.1	5700	605.6	8200	876.2	10700	1149.9
900	94.6	3250	343.4	5750	611.0	8250	881.7	10750	1155.4
920	96.7	3300	348.7	5800	616.4	8300	887.1	10800	1160.9
940	98.8	3350	354.0	5850	621.8	8350	892.6	10850	1166.4
960	100.9	3400	359.3	5900	627.2	8400	898.0	10900	1172.0
980	103.0	3450	364.7	5950	632.5	8450	903.5	10950	1177.5

Fuente: Humboldt Mfg. Corrección de estabilidad Marshall. p. 1.

Anexo 3. Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico

Tabla 401 -12 Requisitos para la Mezcla de Concreto Asfáltico

METODO DE DISEÑO ⁽¹⁾	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 ⁽²⁾	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⁾	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 ⁽⁴⁾	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: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 401-7.

Anexo 4. **Vacíos en el agregado mineral**

Tabla 401-13 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: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 401-8