

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Reporte: LM-PI-UMP-026-R1

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA COSTA RICA

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Mayo, 2015

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-
LanammeUCR fabricio.leiva@ucr.ac.cr



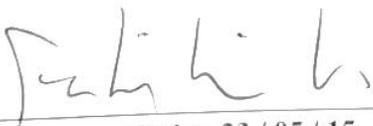
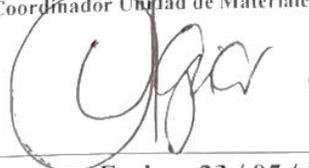
1. Informe LM-PI-UMP-026-R1		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA COSTA RICA		4. Fecha del Informe MAYO, 2015
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <p><i>El objetivo del diseño de mezcla es encontrar una combinación ideal de agregados y contenido de asfalto, según criterios de costo y desempeño, y que además sea capaz de simular adecuadamente las condiciones reales de mezclado, densificación y desempeño en sitio. El propósito del presente documento es establecer como metodología de diseño de mezclas asfálticas en caliente el procedimiento volumétrico SUPERPAVE[®], adecuado a las condiciones de nuestro país. Específicamente se proponen cambios en los niveles o energía de compactación (número de giros de diseño), el establecimiento de ensayos de desempeño para medir la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga, así como los requisitos mínimos con los que debe cumplir cada ensayo, los cuales se basan en los datos obtenidos de las investigaciones desarrolladas en el LanammeUCR. Se plantea el uso de 4 niveles de diseño directamente asociados al nivel de tránsito e importancia del proyecto. Se espera que la futura implementación de esta propuesta de diseño de mezcla permita establecer una metodología de diseño no solamente basada en parámetros volumétricos sino también en parámetros de desempeño y criterios de falla típicos de mezclas asfálticas aplicables a las condiciones propias de nuestro país.</i></p>		
10. Palabras clave Diseño Mezcla, Desempeño, Superpave [®]	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 62
13. Preparado por: Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D. Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 23 / 05 / 15	Ing. Mónica Jiménez Acuña Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 23 / 05 / 15	
14. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 23 / 05 / 15		15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 23 / 05 / 15

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
RESUMEN EJECUTIVO.....	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 ANTECEDENTES.....	7
1.2 DISEÑO DE MEZCLA SUPERPAVE®	8
2. OBJETIVO	10
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2.3 JUSTIFICACIÓN	10
3. CRITERIOS PARA ESTABLECER EL TIPO DE DISEÑO DE MEZCLA A UTILIZAR.....	11
4. DISEÑO DE MEZCLA SISTEMA SUPERPAVE® PARA EL NIVEL 1	16
4.1 GENERALIDADES	16
4.2 SELECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO.....	17
4.3 SELECCIÓN DE LOS AGREGADOS	33
4.4 SELECCIÓN DE LA GRANULOMETRÍA ÓPTIMA DE DISEÑO	39
4.5 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE MEZCLA ASFÁLTICA	42
4.6 SELECCIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE LIGANTE ASFÁLTICO	50
4.7 SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD.....	52
5. DISEÑO DE MEZCLA NIVEL 2.....	53
5.1 DEFORMACIÓN PERMANENTE	53
6. DISEÑO DE MEZCLA NIVEL 3.....	55
6.1 DEFORMACIÓN PERMANENTE	55
6.2 AGRIETAMIENTO	55
6.3 MÓDULO DINÁMICO COMPLEJO.....	56
7. DISEÑO DE MEZCLA NIVEL 4.....	58
7.1 DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	58
7.2 AGRIETAMIENTO POR FATIGA	61
8. COMENTARIOS FINALES	61
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE LOS PASOS PARA EL DISEÑO SUPERPAVE® NIVEL 1.	9
FIGURA 2. ESQUEMA PARA ESCOGER LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.	15
FIGURA 3. ZONIFICACIÓN PG DE LA ALTA TEMPERATURA PARA COSTA RICA.	18
FIGURA 4. ZONIFICACIÓN PG DE LA BAJA TEMPERATURA PARA COSTA RICA.	19
FIGURA 5. EQUIPO COPA DE CLEVELAND.	22
FIGURA 6. VISCOSÍMETRO ROTACIONAL BROOKEFIELD.	22
FIGURA 7. REÓMETRO DINÁMICO DE CORTANTE.	23
FIGURA 8. HORNO ROTATORIO DE PELÍCULA DELGADA.	24
FIGURA 9. CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN.	24
FIGURA 10. VIGA A FLEXIÓN (REÓMETRO).	25
FIGURA 11. FALLA POR DEFORMACIÓN PERMANENTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA.	26
FIGURA 12. FALLA DE FISURAMIENTO POR FATIGA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA.	27
FIGURA 13. FALLA POR FISURAMIENTO TÉRMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA.	27
FIGURA 14. DIFERENCIAS ENTRE CARAS FRACTURADAS Y SIN FRACTURAR.	34
FIGURA 15. ENSAYO DE VACÍOS EN FINOS NO COMPACTADOS.	35
FIGURA 16. PARTÍCULAS PLANAS Y ELONGADAS EN EL AGREGADO GRUESO.	35
FIGURA 17. ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA.	36
FIGURA 18. EJEMPLO DE AGREGADO ENSAYADO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.	37
FIGURA 19. RESULTADOS DEL ENSAYO DE DISGREGABILIDAD.	37
FIGURA 20. AGREGADO CON PRESENCIA DE MATERIALES CONTAMINANTES.	38
FIGURA 21. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS COMPONENTES DE GRANULOMETRÍA.	41
FIGURA 22. DIAGRAMA DEL COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE® (CGS).	44
FIGURA 23. COMPORTAMIENTO DE LA COMPACTACIÓN CON RELACIÓN AL NÚMERO DE GIROS.	45
FIGURA 24. EJEMPLO DE LOS GRÁFICOS DE DISEÑO VOLUMÉTRICO SUPERPAVE®.	51
FIGURA 25. MONTAJE DE ESPECÍMENES EN EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS (APA).	54
FIGURA 26. EQUIPO DE FLEXOTRACCIÓN EN VIGAS.	56

FIGURA 27. MONTAJE DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO.	57
FIGURA 28. EJEMPLO DE CURVA MAESTRA.	58
FIGURA 29. EQUIPO DE RUEDA DE HAMBURGO.	59
FIGURA 30. CURVA CARACTERÍSTICA DE DEFORMACIÓN EN LA RUEDA DE HAMBURGO.	60

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. REPETICIONES DE CARGA MÍNIMAS PARA LA FALLA POR FATIGA EN MEZCLA ASFÁLTICA.	13
TABLA 2. RESUMEN DE ESPECIFICACIONES PARA DISEÑO DE MEZCLA SEGÚN LOS NIVELES PROPUESTOS.	13
TABLA 3. SELECCIÓN DEL AUMENTO DE LA ALTA TEMPERATURA PG POR VOLUMEN DE TRÁNSITO Y VELOCIDAD.	21
TABLA 4. POSIBLE ESPECIFICACIÓN DE ASFALTO POR GRADO DE DESEMPEÑO PARA COSTA RICA.	21
TABLA 5. ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS CLASIFICADOS POR GRADO DE DESEMPEÑO'.	29
TABLA 6. ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS CLASIFICADOS POR GRADO DE DESEMPEÑO' (CONTINUACIÓN).	30
TABLA 7. ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS CLASIFICADOS POR GRADO DE DESEMPEÑO' (CONTINUACIÓN).	31
TABLA 8. REQUERIMIENTOS SUPERPAVE® PARA LAS PROPIEDADES DE LA FUENTE. .	38
TABLA 9. REQUERIMIENTOS SUPERPAVE® PARA LAS PROPIEDADES DE CONSENSO. .	39
TABLA 10. PUNTOS DE CONTROL DE GRANULOMETRÍAS SUPERPAVE®.	40
TABLA 11. NÚMERO DE GIROS DE COMPACTACIÓN SUPERPAVE®.	46
TABLA 12. REQUERIMIENTOS VOLUMÉTRICOS SUPERPAVE®.	52

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo del diseño de mezcla es encontrar una combinación ideal de agregados y contenido de asfalto en el laboratorio, según criterios de costo y desempeño, y que además sea capaz de simular adecuadamente las condiciones reales de mezclado, densificación y desempeño en sitio. Los métodos de diseño de mezcla Marshall y Hveem se basan en criterios empíricos y se han usado desde los años 40s y 50s respectivamente. Por otro lado, la metodología de diseño de mezcla SUPERPAVE®, desarrollada desde principios de los 90s, incluye el diseño volumétrico (base del análisis) que toma en cuenta el tránsito de diseño, condiciones climáticas, propiedades de la materia prima y usos de la mezcla como capa de base o capa de ruedo.

El propósito del presente documento es establecer como metodología de diseño de mezclas asfálticas en caliente el procedimiento volumétrico SUPERPAVE®, adecuado a las condiciones de nuestro país. Específicamente se proponen cambios en los niveles o energía de compactación (número de giros de diseño), el establecimiento de ensayos de desempeño para medir la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga, así como los requisitos mínimos con los que debe cumplir cada ensayo, los cuales se basan en los datos obtenidos de las investigaciones desarrolladas en el LanammeUCR.

El esquema propuesto para escoger la metodología de diseño de mezcla para Costa Rica se basa en el formato del Protocolo AMAAC, desarrollado en el año 2008, por la Asociación Mexicana de Asfaltos. Se plantea el uso de 4 niveles de diseño directamente asociados al nivel de tránsito e importancia del proyecto. Se espera que la futura implementación de esta propuesta de diseño de mezcla permita establecer una metodología de diseño que no solo se base en parámetros volumétricos, sino que también considere parámetros de desempeño y criterios de falla típicos de mezclas asfálticas aplicables a las condiciones propias de nuestro país.

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo del diseño de la mezcla asfáltica es determinar la proporción óptima de los componentes (asfalto, agregado, aire, aditivos) que garanticen el mejor desempeño de ésta durante el período de diseño de una estructura de pavimento flexible o semi-rígido. La mejor selección de estas proporciones debe garantizar lo siguiente (1):

- Suficiente ligante para garantizar una adecuada resistencia al agrietamiento por fatiga y durabilidad (resistencia al daño por humedad).
- Suficiente estabilidad y rigidez de la mezcla, para resistir las deformaciones debidas al tránsito.
- Suficientes vacíos de aire que facilitan la densificación de la mezcla por cargas de tránsito, sin que se presenten exudaciones o pérdidas de estabilidad (flujo plástico). Así mismo, un porcentaje de vacíos adecuado para prevenir el ingreso de agua y aire a la mezcla (resistencia al envejecimiento y al daño por humedad).
- Suficiente trabajabilidad que garantice la eficiente colocación de la mezcla sin segregación y consumo tolerable de energía de densificación.
- Suficiente resistencia al deslizamiento y bajo nivel de ruido, si la mezcla va a ser usada como capa de rodadura.

1.1 Antecedentes

Hoy por hoy, en el país se usan los procedimientos Marshall y Hveem que utilizan moldes de 100 mm de diámetro que limitan el uso de tamaños de partícula en el agregado. Con la más reciente metodología SUPERPAVE® (desarrollada hace 20 años) se utilizan moldes de 150 mm para incorporar agregados de mayor tamaño.

Los métodos tradicionales de diseño de mezcla Marshall y Hveem se basan en criterios empíricos y se han usado desde los años 40s y 50s respectivamente (2). Sin embargo, bajo las condiciones de cargas pesadas de los últimos años (incremento en cargas por eje y porcentaje de vehículos con sobrepesos, mayores presiones de inflado y tamaño de la flota vehicular) se ha visto la necesidad de aplicar nuevas metodologías de diseño de mezcla, con el propósito de equiparar los períodos de diseño estructural con la vida útil efectiva de las capas de ruedo. Así, surgió la necesidad de considerar diferentes escenarios de:

- Cargas (ejes equivalentes de 8 200 kg vs. espectros de carga).
- Condiciones climáticas (temperaturas máximas y mínimas).

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 23 de Mayo de 2015	Página 7 de 63
--------------------------	--------------------------------------	----------------

- Usos (capas de base y ruedo).

Adicionalmente, a la hora de preparar el diseño se debe contemplar que la mezcla asfáltica debe presentar las condiciones necesarias para resistir:

- Resistencia al daño por humedad.
- Deformación plástica (roderas).
- Agrietamiento por fatiga (temperaturas intermedias y bajas).
- Agrietamiento por bajas temperaturas.

En los Estados Unidos y algunos países de Latinoamérica, se aplica el método de diseño de mezcla por criterios volumétricos de SUPERPAVE[®] que incorpora la evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad. Adicionalmente, se ha adoptado la metodología de clasificación de ligantes asfálticos con base en el criterio de grado de desempeño PG (Performance Grade).

1.2 Diseño de Mezcla SUPERPAVE[®]

El sistema SUPERPAVE[®] presenta 3 diferentes niveles de diseño de mezcla (3); en todos se incluye el diseño volumétrico (base del análisis). Para seleccionar el nivel a emplearse en el diseño de mezcla, se toma en cuenta el tránsito de diseño (típicamente se requiere la cantidad de ejes equivalentes sobre el carril de diseño, para un período de 20 años). Así, en términos de ESAL (ejes equivalentes simples de 8 200 kg) los criterios para definir el nivel de diseño son:

- Nivel 1 \Rightarrow para los tráficos más ligeros ($\leq 1 \times 10^6$ ESAL)
- Nivel 2 \Rightarrow para tráficos medios ($1 \times 10^6 - 10 \times 10^6$ ESAL)
- Nivel 3 \Rightarrow para tráficos pesados ($\geq 10 \times 10^6$ ESAL)

Cada uno de los niveles superiores incluye los ensayos de evaluación correspondientes a los niveles inferiores. De esta forma, para cualquier nivel existe un componente en común que comprende el Nivel 1 (**Figura 1**):

- Selección del tipo de ligante según las especificaciones por Grado de Desempeño (PG).
- Comprobación de la calidad de los agregados elegidos por apilamiento y por combinación.
- Selección de la granulometría óptima.
- Selección del contenido de asfalto óptimo.
- Análisis de la resistencia por el daño causado por la humedad.

Figura 1. Esquema de los pasos para el diseño Superpave® Nivel 1.

Fuente: FHWA-IF-04-014, 2004 (4).

Para el caso del Nivel 2 se completa esta primera información con ensayos de desempeño simulado en el laboratorio como:

- Ahuellamiento por deformación plástica.
- Agrietamiento por fatiga.
- Agrietamiento térmico.

En el Nivel 3 se amplían los análisis del Nivel 2 realizándolos a varias temperaturas (el nivel 2 usa una temperatura única representativa para algunos ensayos) y también mediante otros ensayos complementarios.

El Nivel 1 se finalizó en el año 1993, el cual es el método implementado de mayor uso. Sin embargo, dada la complejidad y el alto costo de los equipos de ensayo, los Niveles 2 y 3 no se han implementado completamente en los Estados Unidos, por lo que en la actualidad se encuentra en desarrollo investigaciones dirigidas al tema de desempeño desde un punto de vista más simple bajo un programa llamado originalmente Simple Performance Test (SPT). Hoy en día se utiliza un equipo altamente

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 23 de Mayo de 2015	Página 9 de 63
--------------------------	--------------------------------------	----------------

versátil llamado Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT), el cual es una máquina que aplica cargas dinámicas y presiones de confinamiento.

2. OBJETIVO

El propósito del presente documento es establecer como metodología de diseño de mezclas asfálticas en caliente el procedimiento volumétrico SUPERPAVE® incorporando ensayos de desempeño adecuados a las condiciones de Costa Rica y considerando valores de diseño de acuerdo con la importancia del proyecto.

2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos se encuentran:

1. Establecer el procedimiento a seguir para el diseño volumétrico SUPERPAVE®.
2. Establecer los ensayos a realizar al agregado que se clasifican como: Consenso y Fuente de origen.
3. Establecer los ensayos a realizar al ligante asfáltico para clasificarlo por Grado de Desempeño (PG).
4. Establecer los ensayos y ecuaciones para calcular la volumetría de la mezcla asfáltica.
5. Establecer los ensayos de desempeño para medir la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga.
6. Establecer las especificaciones a cumplir para cada ensayo, basadas en los datos obtenidos de las investigaciones desarrolladas en el LanammeUCR.

2.3 Justificación

El presente documento se encuentra enmarcado dentro del planteamiento del Proyecto de Aporte Tecnológico para el Mejoramiento de la Infraestructura Vial de Costa Rica (Promeval). Este proyecto busca la generación de herramientas necesarias en el área de infraestructura vial que produzcan un cambio significativo en la calidad de vida de los costarricenses mediante una salto positivo en la calidad funcional y estructural de nuestras carreteras.

Por mucho tiempo el desempeño de las mezclas asfálticas que se producen en Costa Rica se ha evaluado mediante ensayos empíricos que poco o nada representan las condiciones reales a las que estará sometida la mezcla asfáltica y por tanto no darán herramientas suficientes para valorar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a presentar alguna falla. Sin embargo, en las últimas décadas

el avance en la tecnología ha permitido que los métodos clásicos para la caracterización de los materiales componentes de una estructura de pavimento evolucionen de ensayos empíricos, a ensayos que pretenden modelar mejor las condiciones y características reales a las que estarán sometidos.

Estos ensayos complementan la tecnología de diseño de mezclas permitiendo conocer de manera más precisa el comportamiento de las mezclas nacionales que se refleja en el desempeño durante la vida de servicio de los pavimentos. Estos nuevos ensayos están basados en las propiedades mecánicas fundamentales de los materiales y comprenden una serie de ensayos dinámicos basados en las propiedades fundamentales (esfuerzos y deformaciones), que tienen como objetivo evaluar su desempeño. Algunos de los ensayos implementados se relacionan con la susceptibilidad a la fatiga, la susceptibilidad a la deformación permanente y el aporte estructural (capacidad mecánica) de una mezcla asfáltica.

El LanammeUCR cuenta con la tecnología más moderna para la caracterización del desempeño en mezclas asfálticas mediante ensayos dinámicos, con los cuales se puede generar una base de datos con información para el seguimiento histórico del comportamiento de las mezclas asfálticas que se producen en el país así como la implementación de un sistema para el mejoramiento continuo en la producción de mezclas asfálticas.

3. CRITERIOS PARA ESTABLECER EL TIPO DE DISEÑO DE MEZCLA A UTILIZAR

La **Figura 2** muestra el esquema para escoger la metodología de diseño de mezcla propuesto para Costa Rica. Este esquema se basa en el Protocolo AMAAC (5) desarrollado en el año 2008 por la Asociación Mexicana de Asfaltos. Se plantea el uso de 4 niveles de diseño directamente asociados al nivel de tránsito e importancia del proyecto.

NIVEL 1: se plantea para vías de bajo volumen con menos de un millón de ejes equivalentes y consiste en realizar el diseño volumétrico Superpave® (AASHTO M 323 y R 35) y la medición de la susceptibilidad al daño por humedad (AASHTO T 283). Este procedimiento incluye la selección del ligante asfáltico, selección de los agregados, selección de la curva granulométrica óptima y selección del contenido de asfalto óptimo por criterios volumétricos. Finalmente, se incorpora la evaluación de la mezcla al contenido óptimo de asfalto y establecer su susceptibilidad al daño por humedad (se debe

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 23 de Mayo de 2015	Página 11 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

cumplir con un mínimo de 85 % de resistencia retenida por tensión diametral (RRTD), de acuerdo con el método AASHTO T 283). Los especímenes acondicionados deben tener una resistencia mínima a la tensión diametral de 750 kPa a una temperatura de 25 °C.

NIVEL 2: se incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por desempeño y criterios de falla. Está planteado para más de un millón de ejes equivalentes y menos de diez millones de ejes equivalentes. Incluye el **NIVEL 1** más el análisis de la susceptibilidad a la deformación permanente mediante el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) (Deformación medida < 5,5 mm a una temperatura de 60 °C, de acuerdo con el método AASHTO T 340).

NIVEL 3: se incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por criterios de falla más la caracterización física-mecánica de la mezcla asfáltica. Está planteado para más de diez millones de ejes equivalentes y menos de treinta millones de ejes equivalentes. Incluye el **NIVEL 1** más el análisis de la susceptibilidad a la deformación permanente mediante el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) (Deformación < 3,5 mm a una temperatura de 60 °C, de acuerdo con el método AASHTO T 340). Adicionalmente, se incluye la caracterización de la mezcla asfáltica mediante el ensayo de módulo dinámico complejo E* de acuerdo con el método AASHTO T 342 junto con PP 62 (Witzack) o TP 79 junto con PP 61 (AMPT) que se puede incorporar en una guía de diseño mecánica-empírica. Finalmente se plantea la evaluación de agrietamiento por fatiga mediante el ensayo de flexotracción en vigas (VF) (AASHTO T 321). La **Tabla 1** muestra las especificaciones propuestas para el ensayo de fatiga.

NIVEL 4: incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por desempeño y criterios de falla más avanzados y está planteado para tránsito de diseño de más de treinta millones de ejes equivalentes. El NIVEL 4 es recomendado para todo proyecto estratégico o de gran importancia a ser desarrollado. Incluye el **NIVEL 1** más el análisis de deformación permanente mediante el uso de la Rueda de Hamburgo (RH) (Deformación < 5,0 mm a 10 000 ciclos de carga a una temperatura de 50 °C, AASHTO T 324) y el análisis de susceptibilidad al daño por humedad/ahuellamiento mediante el uso de la Rueda de Hamburgo (Punto de inflexión de desnudamiento (PID) > 10 000 ciclos de carga, AASHTO T 324). Adicionalmente, se plantea la evaluación de agrietamiento por fatiga mediante el ensayo de flexotracción en vigas (VF) (AASHTO T 321) para 4 niveles de deformación unitaria y 3 temperaturas (10, 20 y 30 °C) y que cumpla con . Se incluye la caracterización de la mezcla asfáltica

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 23 de Mayo de 2015	Página 12 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

mediante el ensayo de modulo dinámico complejo E* de acuerdo con el método AASHTO T 342 junto con PP 62 (Witzack) o TP 79 junto con PP 61(AMPT). Finalmente se plantea la evaluación de deformación permanente mediante el ensayo triaxial con carga cíclica (RLT) de acuerdo con el método NCHRP 9-19 para 3 temperaturas (Grado de desempeño del proyecto ± 6 °C).

Tabla 1. Repeticiones de carga mínimas para la falla por fatiga en mezcla asfáltica.

Deformación unitaria controlada a lo largo de todo el ensayo	Cantidad mínima de repeticiones de carga para la falla a 20 °C	
	Capa de ruedo	Capa base o intermedia
400×10^{-6} mm/mm	300 000	450 000
600×10^{-6} mm/mm	30 000	50 000

Fuente: Propuesta modificación CR-2010, 2013 (6).

De manera resumida se presentan las diferentes especificaciones para cada nivel (6) (Ver **Tabla 2**).

Tabla 2. Resumen de especificaciones para diseño de mezcla según los niveles propuestos.

Nivel de Diseño	Nivel de Tránsito, ESAL's	Criterio de Análisis
1	< 1 millón	Diseño Volumétrico + TSR > 85 %
2	1 a 10 millones	Nivel 1 + DP _{APA} < 5,5 mm
3	10 a 30 millones	Nivel 1 + DP _{APA} < 3,5 mm + Fatiga VF Tabla 1 + E*
4	> 30 millones	Nivel 1 + DP _{RH} < 5,0 mm + PID _{RH} > 10 000 ciclos + Fatiga VF Tabla 1 + E* + RLT

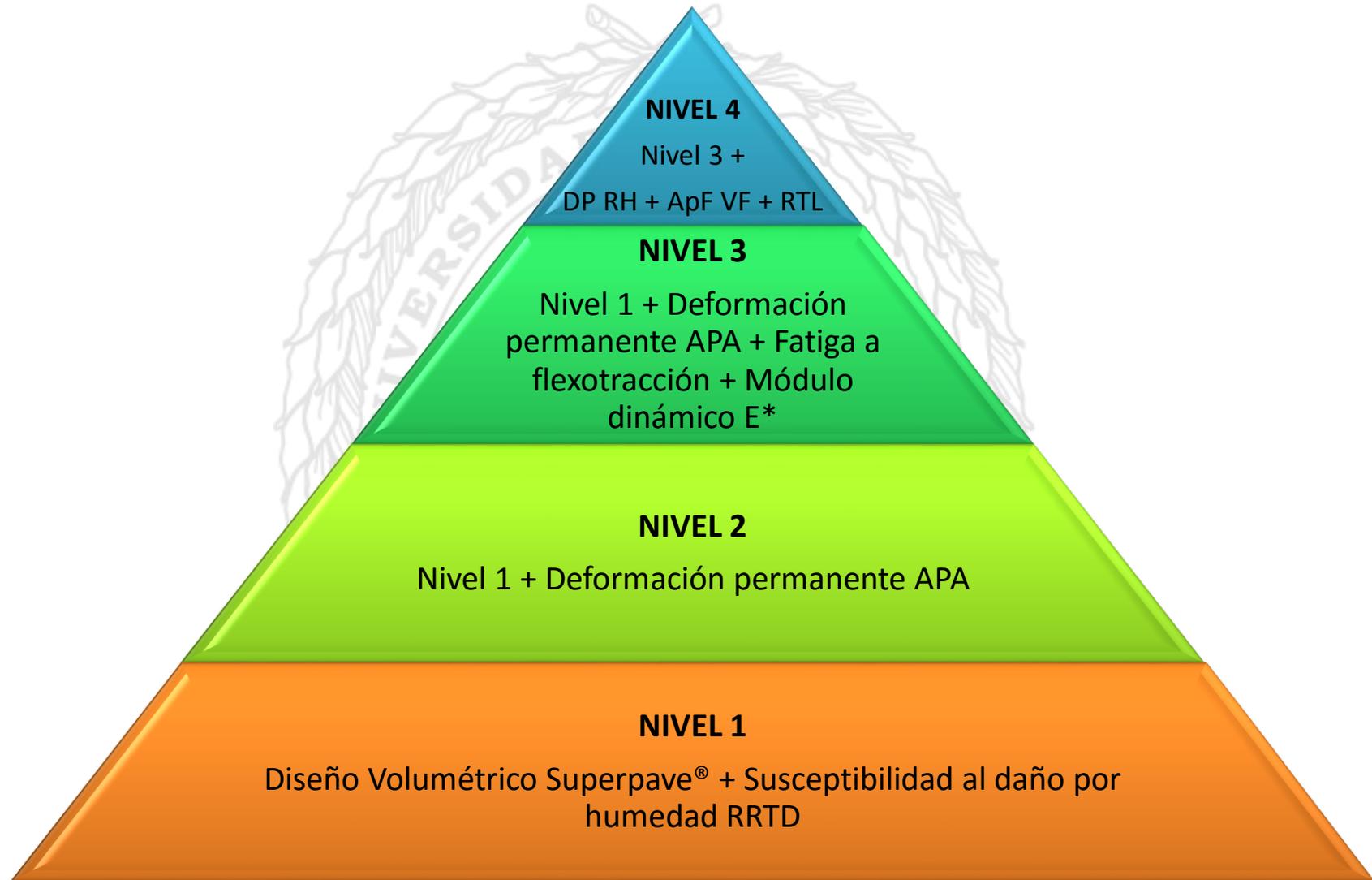


Figura 2. Esquema para escoger la metodología de diseño de mezclas asfálticas.



4. DISEÑO DE MEZCLA SISTEMA SUPERPAVE® PARA EL NIVEL 1

A continuación se describe el procedimiento a seguir para desarrollar el diseño volumétrico SUPERPAVE® (AASHTO R 35 y M 323) (7,8) y el proceso utilizado para evaluar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica al contenido óptimo de asfalto (AASHTO T 283) (9).

4.1 Generalidades

El primer paso es la selección del tipo de ligante asfáltico a emplearse, en función de los criterios de temperatura superior a inferior del sistema de Grado de Desempeño (PG) para ligantes. Este se basa en el concepto de que un ligante, para tener un comportamiento satisfactorio durante el proceso constructivo y a lo largo de su vida de servicio, debe cumplir con una serie de propiedades físicas (rigidez y elasticidad) bajo condiciones críticas de temperatura y envejecimiento a las que se verá sometido.

Los requerimientos nominales para el ligante son los mismos para todos los grados PG (Performance Grade); lo que cambia son las temperaturas a las que cada requisito debe obtenerse (determinante del grado de desempeño). Estas temperaturas máximas y mínimas de desempeño deben lograrse estadísticamente basados en las condiciones extremas presentes en el sitio de la obra (con un nivel de confianza dado). Adicionalmente, SUPERPAVE® presenta especificaciones comunes a todos los grados PG, con la finalidad de garantizar el bombeo en planta, seguridad de procesamiento y calidad (contenido de volátiles). Estas especificaciones son: punto de inflamación, viscosidad a una temperatura de 135 °C y pérdida de masa en RTFO (horno vertical de película delgada).

Para determinar las temperaturas máximas y mínimas en el sitio de obra, y definir el grado PG requerido, SUPERPAVE® propone disponer de una base de datos de temperatura del aire lo suficientemente amplia (mínimo 20 años de registros) en el sitio del proyecto. En el caso de Costa Rica no se cuenta con una base de datos de tantos años por lo que se propone utilizar toda la información disponible dependiendo de la ubicación del proyecto.

Por otro lado, los agregados a emplear deben reunir una serie de requisitos. Entre los que se encuentran las propiedades de consenso:

- Angularidad de gruesos: caras fracturadas para las partículas retenidas por el tamiz de 4,75 mm (N° 4).

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 16 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

- Angularidad de finos: ensayo de contenido de vacíos de una muestra no compactada del material, que pasa el tamiz de 2,36 mm (N° 8).
- Partículas planas y elongadas.
- Contenido de arcilla: ensayo de equivalente de arena.

Y las propiedades de la fuente:

- Resistencia a la abrasión en la máquina de Los Ángeles.
- Presencia de materiales extraños o perjudiciales: arcilla, materia orgánica, etc.
- Índice de durabilidad
- Disgregabilidad (sanidad) en sulfato de sodio

Una vez escogidos los materiales a utilizar, se procede a formular tres granulometrías de prueba de las cuales se escoge la óptima con base en criterios volumétricos, para luego obtener el contenido de asfalto óptimo mediante los mismos criterios (volumetría). Finalmente, se hace una comprobación de la susceptibilidad de la mezcla al daño por humedad con el ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral (AASHTO T 283) (9).

A continuación se describe con más detalle los ensayos relacionados con la selección de los materiales, cuyos requisitos o especificaciones también se pueden encontrar en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR 2010 (10), vigente en Costa Rica.

4.2 Selección de ligante asfáltico

4.2.1 Selección de Grado de Desempeño de ligantes asfálticos

Una de las principales diferencias de las especificaciones convencionales para ligante y las especificaciones SUPERPAVE®, se refiere a que en los requerimientos se mantienen constantes, variando sólo las temperaturas de ensayo en que se deben cumplir. Es decir, distintos grados asfálticos cumplen con las mismas propiedades físicas, pero a distintas temperaturas.

El grado de desempeño PG (por sus siglas en inglés) se designa como PG XX-YY, donde:

- PG: Grado de desempeño (“Performance Grade”).
- XX: Temperatura alta máxima promedio del pavimento (a 20 mm dentro de la capa).

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 17 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

- YY: Temperatura baja mínima en la superficie del pavimento.

Los valores de XX y YY se determinan con base en registros históricos de temperatura, y considerando un factor de confiabilidad. Además, el volumen y velocidad de las cargas de tránsito se consideran dentro de la alta temperatura XX.

La selección del grado de ligante asfáltico en el sistema de clasificación SUPERPAVE® se realiza de tres maneras:

1) Por área geográfica a través del uso de mapas de temperaturas especialmente diseñados:

En la **Figura 3** se muestra la zonificación para la alta temperatura mientras que la **Figura 4** muestra la zonificación para la baja temperatura.

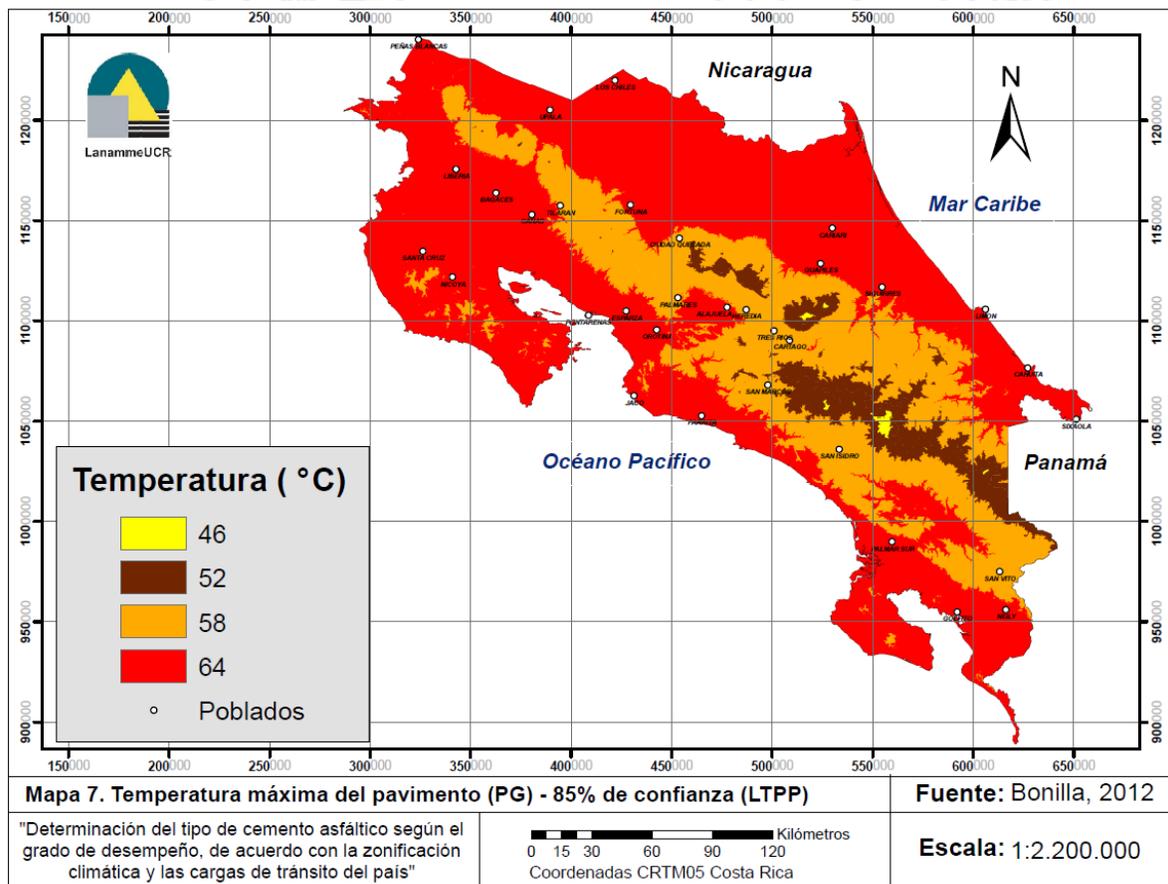


Figura 3. Zonificación PG de la alta temperatura para Costa Rica.

Fuente: Tesis Elías Bonilla, 2012 (11).

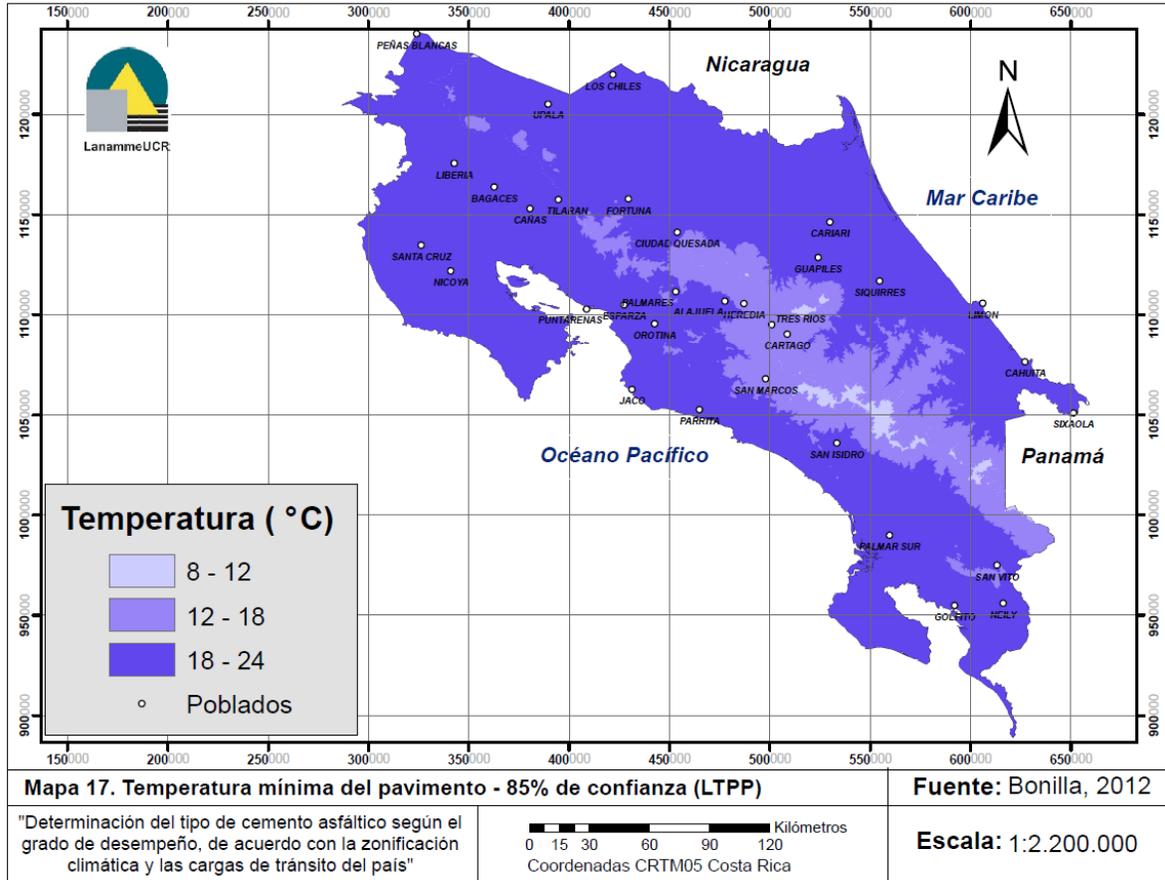


Figura 4. Zonificación PG de la baja temperatura para Costa Rica.

Fuente: Tesis Elías Bonilla, 2012 (11).

2) Por temperaturas del aire que luego se convierten en temperaturas del pavimento:

La temperatura máxima se define a partir de los siete días continuos de mayor temperatura del aire para 20 años de registros. La temperatura mínima del aire se obtiene de la menor temperatura del día más frío durante los años de registro. Con la información meteorológica, el ingeniero diseñador elige el nivel de confianza que normalmente es de un 98 %.

Las nuevas especificaciones están basadas en las temperaturas del pavimento y no en las del aire; así la temperatura máxima de diseño está definida a una profundidad de 20 mm por debajo de la superficie del pavimento y la mínima en su superficie. Existen ecuaciones de regresión calibradas en

Norteamérica para estimar la temperatura del pavimento en función de la del aire y una ubicación geográfica específica. Este cálculo da un nivel de confianza del 50 % los cuales deben elevarse a un 98 % con las ecuaciones **Ec. 1** y **Ec. 2**.

a) *Modelo LTPP Temperatura Alta para un 98 % de confianza:*

$$\text{Temp máx}_{\text{pav}} = 54,32 + 0,78\text{Temp}_{\text{aire}} - 0,0025\text{Lat}^2 - 15,14 \log_{10}(\text{H} + 25) + z \sqrt{(9 + 0,61\sigma_{\text{aire}}^2)} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Temp máx_{pav} = Temperatura alta del pavimento dentro de la capa, °C

Temp_{aire} = Temperatura del aire promedio de los 7 días más calurosos, °C

Lat = Latitud del proyecto, grados

H = espesor desde la superficie, mm

σ_{aire} = desviación estándar de los 7 días más calurosos, °C

z = valor estadístico de la distribución normal, z = 2,055 para un 98 % de confianza

b) *Modelo LTPP Temperatura Baja para un 98 % de confianza:*

$$\text{Temp mín}_{\text{pav}} = -1,56 + 0,72\text{Temp}_{\text{aire}} - 0,004\text{Lat}^2 + 6,26 \log_{10}(\text{H} + 25) - z \sqrt{(4,4 + 0,52\sigma_{\text{aire}}^2)} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Temp mín_{pav} = Temperatura baja del pavimento dentro de la capa, °C

Temp_{aire} = Temperatura del aire promedio de 1 año más frío, °C

Lat = Latitud del proyecto, grados

H = espesor desde la superficie, mm

σ_{aire} = desviación estándar de temperaturas mínimas durante el año más frío, °C

z = valor estadístico de la distribución normal, z = 2,055 para un 98% de confianza

Adicionalmente, se puede requerir un “salto” de la temperatura alta por consideraciones de volumen y velocidad del tránsito. Este cálculo se realiza con el 50 % de confianza, es decir, se debe utilizar la

Tabla 3 para realizar los aumentos del grado PG, se debe tener el cuidado que, para el cálculo con un nivel de confianza del 98 % no se hace esta consideración.

Tabla 3. Selección del aumento de la alta temperatura PG por volumen de tránsito y velocidad.

ESAL´s diseño (20 años carril de diseño)	Velocidad (km/h)		
	Detenido (< 20)	Baja (entre 20 y 70)	Alta (> 70)
< 0,3	-	-	-
0,3 a 3	2	1	-
3 a 10	2	1	-
10 a 30	2	1	-
>30	2	1	1

Fuente: AASHTO R 35, 2009 (7).

Por ejemplo, después de calcular las temperaturas alta y baja del pavimento se obtiene un Grado de Desempeño PG 58-22, y se requiere colocar la mezcla en una zona de peaje entonces el nuevo ligante se clasifica como PG 64-22, mientras que si se requiere colocar en una zona de parada entonces el ligante debería ser PG 70-22. Es importante resaltar que, el “salto” de grado se alcanza cuando el ligante ya se encuentra clasificado como “H”, “V” y “E” según la clasificación que se muestra en la Tabla 5 (12).

3) Por especificación ya establecida basada en la experiencia y como parte de las tareas del LanammeUCR (revisión y actualización de las especificaciones técnicas), para este año se propone promover el uso de asfalto según las especificaciones establecidas en la **Tabla 4**:

Tabla 4. Recomendación de especificación de asfalto por Grado de Desempeño para Costa Rica.

ESAL´s diseño (millones) (20 años carril de diseño)	Grado de Desempeño PG	
	Velocidad alta (> 60 km/h)	Velocidad baja (< 60 km/h)
< 0,3	PG 64-22	
0,3 a 30	PG 64-22	PG 70-22
> 30	PG 70-22	PG 76-22

Fuente: Tabla 406-1. Grados de desempeño mínimo a utilizar, 2013 (6)

4.2.2 Ensayos físicos y reológicos del ligante para clasificarlo por PG

Punto de inflamación: ensayo de seguridad para el manejo del asfalto, se mide la temperatura mínima a la cual el asfalto no se inflama (**Figura 5**).



Figura 5. Equipo Copa de Cleveland.

Viscosímetro Rotacional (RV): se utiliza para determinar las características de fluidez del asfalto y para asegurar el bombeo y manejo en la planta de producción. Se mide la viscosidad del ligante asfáltico a temperaturas altas e intermedias, mediante una propela cilíndrica que se introduce en la muestra y se hace girar. El equipo mide el torque necesario para producir un giro de 20 rpm y determina automáticamente la viscosidad del asfalto como resistencia a la rotación de una propela estandarizada (**Figura 6**).

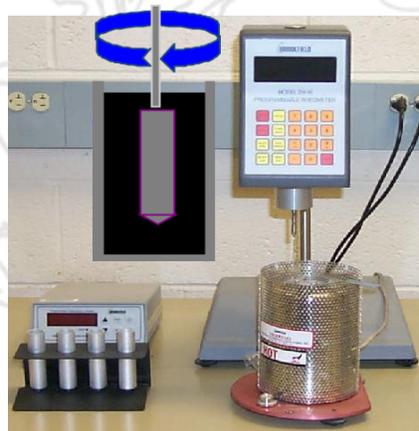


Figura 6. Viscosímetro rotacional Brookfield.

Reómetro de Corte Dinámico (DSR): se usa para medir las propiedades viscoelásticas del ligante asfáltico, es decir, medir su comportamiento de acuerdo con la temperatura y velocidad de carga. El reómetro aplica un patrón sinusoidal de tensiones de corte sobre una muestra, midiendo su respuesta (deformación angular) (**Figura 7**).



Figura 7. Reómetro dinámico de cortante.

La respuesta del ligante asfáltico presenta un patrón similar a la frecuencia, pero de distinta amplitud y desfasada en el tiempo (efecto de la componente viscosa del módulo de rigidez). Comparando ambos patrones se obtienen dos importantes parámetros reológicos del asfalto:

- **Módulo Complejo (G^*):** Razón entre la máxima tensión de corte aplicada y la máxima deformación angular obtenida. La magnitud de este parámetro indica la resistencia del ligante asfáltico a deformarse por esfuerzos de corte.
- **Ángulo de Fase (δ):** La respuesta del asfalto a temperaturas intermedias presenta ambos comportamientos, elástico y viscoso. Si la respuesta fuera puramente elástica sería inmediata, sin embargo la componente viscosa hace que se retarde. El ángulo de fase indica qué tan retrasada está la deformación con respecto a la aplicación de la carga, variando desde 0° (respuesta puramente elástica) hasta 90° (respuesta puramente viscosa).

Para poder evaluar los cambios de las características del ligante asfáltico en todas las etapas de su vida de servicio, se usan los siguientes ensayos:

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 23 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO): Con este ensayo se simula el envejecimiento del asfalto durante el proceso de mezclado con el agregado hasta el proceso de colocación de la mezcla en el sitio de pavimentación. Lo que se hace es que se envejece una muestra de ligante original mediante un ciclo de 85 minutos a una temperatura de 163 °C e inyección de aire. También se mide la pérdida de volátiles (**Figura 8**).



Figura 8. Horno rotatorio de película delgada.

Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV): El objetivo de este ensayo es simular el envejecimiento producido en los primeros años de servicio. Se envejece una muestra de ligante asfáltico (previamente envejecido en RTFO) durante 20 horas, mediante calor y presión (**Figura 9**).



Figura 9. Cámara de envejecimiento a presión.

Viga a Flexión (reómetro): se analizan los parámetros reológicos y la susceptibilidad al agrietamiento térmico a bajas temperaturas. Las muestras que se ensayan tienen que haber sido envejecidas en RTFO y PAV (**Figura 10**).



Figura 10. Viga a flexión (reómetro).

4.2.3 Especificaciones a cumplir por el ligante para clasificarlo por PG

Las especificaciones para clasificar el asfalto por Grado de Desempeño están orientadas a controlar la deformación permanente así como el fisuramiento por fatiga y el fisuramiento térmico. Durante los primeros años de servicio (1 a 3), y especialmente en períodos calurosos y bajo condiciones críticas de carga (en cuanto a volumen y velocidad de carga), la mezcla es propensa a sufrir ahuellamiento. El ahuellamiento es la acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables de la mezcla. Para minimizar la contribución del asfalto al ahuellamiento se exige que éste tenga una alta rigidez a altas temperaturas de servicio y que tenga un comportamiento predominantemente elástico.

Para controlar el ahuellamiento (**Figura 11**), se exige que el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$, que representa la resistencia a la deformación plástica, tenga un valor mínimo de 1,0 kPa para el asfalto sin envejecer y un valor mínimo de 2,20 kPa, para el asfalto envejecido en RTFO, ambos medidos en el rango alto de temperaturas de servicio del proyecto.



Figura 11. Falla por deformación permanente de una mezcla asfáltica.

Tras varios años en servicio, el ligante alcanza una condición de envejecimiento de largo plazo, por lo cual su rigidez y tendencia frágil ha aumentado. En esta etapa el ahuellamiento ya no es un modo de falla probable, sino más bien es posible que se presenten problemas asociados al comportamiento sólido-frágil del ligante, como agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico.

Para prevenir el desarrollo de las grietas por fatiga (**Figura 12**), se exige que el parámetro $G^* \cdot \sin \delta$, que representa la componente viscosa de módulo dinámico de rigidez a temperaturas intermedias y bajas, tenga un valor máximo de 5 000 kPa. Este parámetro se mide en el Reómetro de Corte Dinámico, sobre muestras envejecidas en RTFO y PAV.



Figura 12. Falla de fisuramiento por fatiga de una mezcla asfáltica.

Para minimizar la tendencia al agrietamiento térmico (**Figura 13**), se controla los siguientes parámetros, medidos en muestras envejecidas en RTFO y PAV, se exige un valor de rigidez en estado de flujo S máximo de 300 MPa, es decir, el ligante debe tener una baja rigidez (asociada con menor fragilidad). Además se exige un valor mínimo de 0,3 para el valor m (pendiente de la curva S versus tiempo de carga), lo que significa que disminuye rápidamente su rigidez al estar bajo carga a baja temperatura (comportamiento dúctil y no frágil).



Figura 13. Falla por fisuramiento térmico de una mezcla asfáltica.

Fuente: <http://www.pavementinteractive.org/article/direct-tension-tester/>, 2014

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 27 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

Durante la producción de la mezcla asfáltica se requiere elevar el ligante asfáltico a temperaturas que permitan su manejo seguro, entonces se especifica que la temperatura mínima de inflamación debe ser de 230 °C. Mientras que, para las operaciones de bombeo, se especifica que la viscosidad del asfalto a 135 °C sea menor o igual a 0,3 Pa·s.

Los diversos grados contenidos en la especificación de Grado de Desempeño indican las temperaturas superiores e inferiores que los mismos resisten adecuadamente a fin de maximizar la resistencia a deformaciones permanentes, grietas por fatiga y agrietamiento térmico. Se presentan en las **Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7** las especificaciones para clasificar los ligantes asfálticos sin modificar y modificados por Grado de Desempeño.

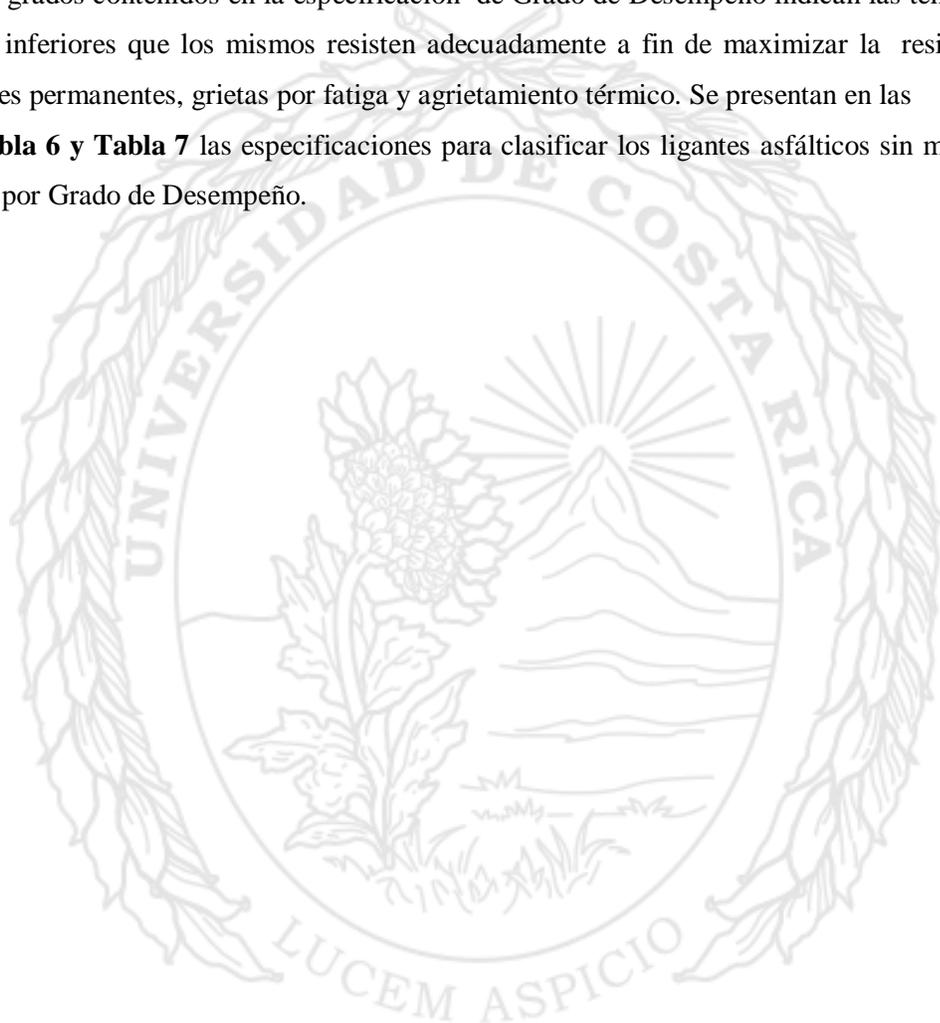


Tabla 5. Especificaciones para asfaltos Clasificados por Grado de Desempeño¹⁾

Grado de Desempeño	PG 46			PG 52						PG 58					
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40
Promedio 7-días Temperatura Máxima de Diseño de Pavimento ²⁾ (°C)	<46			<52						<58					
Temperatura Mínima de Diseño de Pavimento ²⁾ (°C)	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Asfalto Original															
Punto de Inflamación, T 48, mín (°C)	230														
Viscosidad, T 316: ³⁾ máx 3 Pa·s, Temperatura de ensayo, (°C)	135														
Cortante dinámico, T 315: ⁴⁾ G*senδ, mín. 1,00 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C)	46			52						58					
Horno Rotatorio de Película Delgada Vertical (AASHTO T 240)															
Pérdida de Masa ⁶⁾ , máxima (%)	1,00														
Cortante dinámico, T315: G*senδ, mín. 2,20 kPa Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C)	46			52						58					
MSCR, TP 70: Tránsito estándar Grado "S" J _{nr3.2} máx 4,0 kPa ⁻¹ J _{nrdiff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	46			52						58					
MSCR, TP 70: Tránsito pesado Grado "H" J _{nr3.2} máx 2,0 kPa ⁻¹ J _{nrdiff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	46			52						58					
MSCR, TP 70: Tránsito muy pesado Grado "V" J _{nr3.2} máx 1,0 kPa ⁻¹ J _{nrdiff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	46			52						58					
MSCR, TP 70: Tránsito extremadamente pesado Grado "E" J _{nr3.2} máx 0,5 kPa ⁻¹ J _{nrdiff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	46			52						58					
Residuo de Recipiente para Envejecimiento a Presión (AASHTO R 28)															
Temp. de Envejecimiento PAV ⁷⁾	90			90						100					
Cortante dinámico, T 315: G*senδ, máx. 5 000 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C) Tránsito Grado "S"	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13
Cortante dinámico, T 315: G*senδ, máx. 6 000 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C) Tránsito Grado "H", "V" y "E"	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13
Rigidez Fluencia "Creep", T 313: ⁸⁾ S, máx. 300 MPa, Valor m: mín. 0,300, Temp. de ensayo en 60 s (°C)	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión Directa, T 314: ⁹⁾ Falla de Deformación, mín. 1,0 %, Temp. de ensayo a 1,0 m/min (°C)	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30

Fuente: AASHTO MP 19, 2013.

Tabla 6. Especificaciones para asfaltos Clasificados por Grado de Desempeño¹⁾ (Continuación)

Grado de Desempeño	PG 64						PG 70					
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
Promedio 7-días Temperatura Máxima de Diseño de Pavimento ²⁾ (°C)	<64						<70					
Temperatura Mínima de Diseño de Pavimento ²⁾ (°C)	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Asfalto Original												
Punto de Inflamación, T 48, mín (°C)	230											
Viscosidad, T 316: ³⁾ máx 3 Pa-s, Temperatura de ensayo, (°C)	135											
Cortante dinámico, T 315: ⁴⁾ G*/senδ, mín. 1,00 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C)	64						70					
Horno Rotatorio de Película Delgada Vertical (AASHTO T 240)												
Pérdida de Masa ⁶⁾ , máxima (%)	1,00											
Cortante dinámico, T315: G*/senδ, mín. 2,20 kPa Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C)	64						70					
MSCR, TP 70: Tránsito estándar Grado "S" J _{nr3.2} máx 4,0 kPa ⁻¹ J _{nr diff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	64						70					
MSCR, TP 70: Tránsito pesado Grado "H" J _{nr3.2} máx 2,0 kPa ⁻¹ J _{nr diff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	64						70					
MSCR, TP 70: Tránsito muy pesado Grado "V" J _{nr3.2} máx 1,0 kPa ⁻¹ J _{nr diff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	64						70					
MSCR, TP 70: Tránsito extremadamente pesado Grado "E" J _{nr3.2} máx 0,5 kPa ⁻¹ J _{nr diff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	64						70					
Residuo de Recipiente para Envejecimiento a Presión (AASHTO R 28)												
Temp. de Envejecimiento PAV ⁷⁾	100						100 (110)					
Cortante dinámico, T 315: G*/senδ, máx. 5 000 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C) Tránsito Grado "S"	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19
Cortante dinámico, T 315: G*/senδ, máx. 6 000 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C) Tránsito Grado "H", "V" y "E"	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19
Rigidez Fluencia "Creep", T 313: ⁸⁾ S, máx. 300 MPa, Valor m: mín. 0,300, Temp. de ensayo en 60 s (°C)	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión Directa, T 314: ⁸⁾ Falla de Deformación, mín. 1,0 %, Temp. de ensayo a 1,0 m/min (°C)	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Fuente: AASHTO MP 19, 2013.

Tabla 7. Especificaciones para asfaltos Clasificados por Grado de Desempeño¹⁾ (Continuación)

Grado de Desempeño	PG 76					PG 82				
	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34
Promedio 7-días Temperatura Máxima de Diseño de Pavimento ²⁾ (°C)	<76					<82				
Temperatura Mínima de Diseño de Pavimento ²⁾ (°C)	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34
Asfalto Original										
Punto de Inflamación, T 48, mín (°C)						230				
Viscosidad, T 316: ³⁾ máx 3 Pa·s, Temperatura de ensayo, (°C)						135				
Cortante dinámico, T 315: ⁴⁾ G*/senδ, mín. 1,00 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C)	76					82				
Horno Rotatorio de Película Delgada Vertical (AASHTO T 240)										
Pérdida de Masa ⁶⁾ , máxima (%)						1,00				
Cortante dinámico, T315: G*/senδ, mín. 2,20 kPa Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C)	76					82				
MSCR, TP 70: Tránsito estándar Grado "S" J _{nr3.2} máx 4,0 kPa ⁻¹ J _{nr diff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	76					82				
MSCR, TP 70: Tránsito pesado Grado "H" J _{nr3.2} máx 2,0 kPa ⁻¹ J _{nr diff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	76					82				
MSCR, TP 70: Tránsito muy pesado Grado "V" J _{nr3.2} máx 1,0 kPa ⁻¹ J _{nr diff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	76					82				
MSCR, TP 70: Tránsito extremadamente pesado Grado "E" J _{nr3.2} máx 0,5 kPa ⁻¹ J _{nr diff} máx 75 % Temperatura de ensayo, °C	76					82				
Residuo de Recipiente para Envejecimiento a Presión (AASHTO R 28)										
Temp. de Envejecimiento PAV ⁷⁾	100 (110)					100 (110)				
Cortante dinámico, T 315: G*/senδ, máx. 5 000 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C) Tránsito Grado "S"	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Cortante dinámico, T 315: G*/senδ, máx. 6 000 kPa ⁵⁾ , Temp. de ensayo a 10 rad/s (°C) Tránsito Grado "H", "V" y "E"	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Rigidez Fluencia "Creep", T 313: ⁸⁾ S, máx. 300 MPa, Valor m: mín. 0,300, Temp. de ensayo en 60 s (°C)	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Tensión Directa, T 314: ⁸⁾ Falla de Deformación, mín. 1,0 %, Temp. de ensayo a 1,0 m/min (°C)	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

¹⁾ El ensayo MSCR en el asfalto RTFO se debe realizar en la alta temperatura ambiental del grado PG. El aumento en el grado se alcanza especificando un valor menor de J_{nr} mientras se ensaya a temperatura ambiente.

- 2) Las temperaturas del pavimento se estiman por medio de las temperaturas del aire usando el algoritmo contenido en el programa informático LTPP Bind, también puede ser especificadas por el Contratante o siguiendo el procedimiento establecido en los métodos M 323 y R 35, excluyendo los aumentos de grado.
- 3) Este requisito se puede excluir a discreción del Contratante si el vendedor del asfalto garantiza que este puede ser bombeado y mezclado adecuadamente a temperaturas que cumplan con los estándares de seguridad aplicables.
- 4) Para control de calidad de la producción de cemento asfáltico sin modificar, la medida de viscosidad del cemento asfáltico original puede sustituir a las medidas de cortante dinámica de $G^*/\text{sen}\delta$ en las temperaturas de prueba donde el asfalto es un fluido Newtoniano.
- 5) $G^*/\text{sen}\delta$ = rigidez a temperatura alta y $G^* \cdot \text{sen}\delta$ = rigidez a temperatura intermedia.
- 6) La pérdida de masa puede ser menor a 1,00 % ya sea un cambio positivo (ganancia de masa) o negativo (pérdida de masa).
- 7) La temperatura de envejecimiento PAV se basa en condiciones climáticas simuladas y es una de estas tres temperaturas 90 °C, 100 °C y 110 °C. Normalmente, la temperatura de envejecimiento PAV es 100 °C para un PG 58-XX y grados superiores, sin embargo, en climas desérticos, la temperatura de envejecimiento PAV es 110 °C para un PG 70-XX y grados superiores.
- 8) Si la rigidez en el ensayo de "Creep" es menor que 300 MPa, no se requiere realizar la prueba de tensión directa. Si la rigidez en el ensayo de "Creep" está entre 300 y 600 MPa el requisito de falla de deformación en tensión directa se puede utilizar en lugar del requisito de rigidez de fluencia "Creep". El requisito del valor m se debe cumplir en ambos casos.

Grado estándar "S": se requiere para niveles de tránsito menores a 10 millones de ejes equivalentes y velocidades mayores a 70 km/h

Grado alto "H": se requiere para niveles de tránsito entre 10 millones y 30 millones de ejes equivalentes o velocidades bajas entre 20 km/h y 70 km/h

Grado muy alto "V": se requiere para niveles de tránsito mayores a 30 millones de ejes equivalentes o velocidades bajas menores a 20 km/h

Grado extremadamente alto "E": se requiere para niveles de tránsito mayores a 30 millones de ejes equivalentes y tránsito detenido (< 20 km/h) como en peajes y puertos.

Como puede verse, para cada temperatura alta existen varias temperaturas bajas que conforman a un grado asfáltico determinado. Así por ejemplo, un PG 64 puede ser PG 64-10 o PG 64-40. Lo anterior significa que el asfalto es capaz de resistir hasta los 7 días de temperatura alta consecutivos a 64 °C de temperatura promedio del periodo considerado (mayor que 20 años) y hasta una temperatura mínima de -10 °C, o -40 °C; con un nivel de confianza del 98 %. Adicionalmente, el ligante asfáltico se puede clasificar como PG 64-22, Grado S que se puede tratar de un asfalto modificado con algún aditivo.

Una vez seleccionado el ligante asfáltico a utilizar, se necesitan los siguientes datos para poder realizar el diseño de mezcla:

- Gravedad específica a 25 °C: se puede obtener realizando el ensayo de laboratorio AASHTO T 228 o del certificado de RECOPE corregida a la temperatura.
- Rango de temperaturas de mezclado que se obtiene al alcanzar una viscosidad entre 150 ctS y 190 ctS.

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 32 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

- Rango de temperaturas de compactación que se obtiene al alcanzar una viscosidad entre 250 ctS y 310 ctS.

Estas temperaturas se obtienen con el Gráfico de Equiviscosidad para asfaltos sin modificar, también se obtienen del certificado de RECOPE. Es importante aclarar que este criterio no aplica para asfaltos modificados por lo que esta información la tiene que proveer el distribuidor del aditivo en específico. Es importante, indicar que la temperatura de mezclado nunca puede superar los 168 °C y la temperatura de compactación no puede ser menor que 115 °C, de acuerdo con lo que establece el Instituto del Asfalto (13). De acuerdo con el tramo de prueba, la temperatura de compactación podría bajar, sin embargo, esto podría ir en detrimento del módulo de resiliencia del material.

4.3 Selección de los agregados

Los agregados son un conjunto de partículas de composición mineral, provenientes de la fragmentación de rocas o de depósitos naturales. Estos se dividen en agregado grueso (retenido en la malla de 4,75 mm (N° 4) y agregado fino (pasando la malla de 4,75 mm (N° 4). Para establecer la granulometría (acomodo de partículas por tamaño), se utiliza un gráfico donde el tamaño del tamiz en milímetros se eleva a la potencia 0,45 y se coloca en el eje x , mientras que en el eje y se coloca el porcentaje de material pasando para cada determinado tamiz (**Figura 21**).

La metodología SUPERPAVE® considera que las características de los agregados son de suma importancia, ya que algunas de ellas son consideradas críticas para un buen desempeño de la mezcla asfáltica. Estas características se clasificaron en: Propiedades de Consenso y en Propiedades de la Fuente, en donde éstas últimas son inherentes del material mientras que, para las de Consenso se establecieron regulaciones que dependen del nivel de tránsito (expresado en ejes equivalentes) y de la posición de los agregados en la estructura del pavimento (en este caso capa de rodamiento). Tales características son (7):

4.3.1 Ensayos a realizar a los agregados

1) Propiedades de Consenso:

a) Angularidad del agregado grueso:

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna y de resistencia a la deformación plástica (ahuellamiento). Se define como el porcentaje por peso de los agregados retenido en la malla de 4,75

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 33 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

mm (N° 4), con una o más caras fracturadas. Usualmente se obtiene contando manualmente las partículas para determinar las caras fracturadas. Una cara fracturada se define como un corte transversal sobre la partícula de agregado, de manera que su redondez se ve considerablemente alterada (**Figura 14**).



Figura 14. Diferencias entre caras fracturadas y sin fracturar.

Fuente: <http://www.pavementinteractive.org/article/coarse-aggregate-angularity/>, 2014.

b) Angularidad del agregado fino:

Esta propiedad también asegura un alto grado de fricción interna y de resistencia a la deformación plástica, pero considera el aporte de los agregados finos únicamente. Se define como el porcentaje de espacios vacíos presentes en una muestra levemente compactada de agregado menor a 2,36 mm (pasando malla N° 8) (**Figura 15**). Un alto contenido de vacíos corresponde a una elevada cubicidad o sea partículas angulosas, que no encajan unas dentro de otras, y que por lo tanto determinan más espacios vacíos. Las partículas finas redondeadas se empaquetan mejor por lo que quedan menos espacios vacíos.



Figura 15. Ensayo de vacíos en finos no compactados.

c) Partículas planas y elongadas:

Esta característica se define como el porcentaje por peso de agregado grueso retenido en la malla de 4,75 mm (N° 4) que posee una relación de dimensiones largo – ancho que excede la relación 1:5 ó 1:3 (para mezclas discontinuas). Las partículas elongadas tienden a quebrarse fácilmente durante la construcción y bajo el tráfico vehicular por lo que se trata al máximo evitar el uso de este tipo de partículas (**Figura 16**).



Figura 16. Partículas planas y elongadas en el agregado grueso.

Fuente: <http://www.pavementinteractive.org/article/flat-and-elongated-particles/>, 2014.

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 35 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

d) Equivalente de arena:

Este procedimiento permite identificar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de material arcilloso o finos plásticos o polvo en agregados finos (o suelos) que pasan el tamiz de 4,75 mm (N° 4). El término equivalente de arena implica el concepto de que la mayoría de agregados finos y suelos granulares están compuestos de partículas granulares, arena y arcillas, finos plásticos o polvo (indeseables) (**Figura 17**).

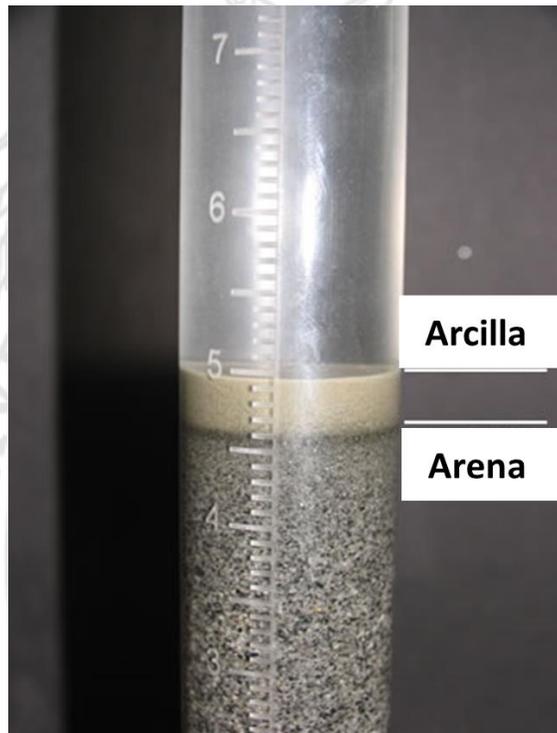


Figura 17. Ensayo de equivalente de arena.

Fuente: <http://www.pavementinteractive.org/article/sand-equivalent/>, 2014.

2) Propiedades de la Fuente:

a) Resistencia a la abrasión en máquina de Los Ángeles:

Con la prueba de Abrasión en la máquina de los Ángeles se estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manejo, construcción y vida de servicio (**Figura 18**).



Figura 18. Ejemplo de agregado ensayado en la Máquina de Los Ángeles.

Fuente: <http://www.pavementinteractive.org/article/los-angeles-abrasion/>, 2014.

b) Disgregabilidad por la acción de sulfatos:

Con esta prueba se estima la resistencia a cambios climáticos, simulando la acción del congelamiento-descongelamiento en 5 ciclos de secado y humedecimiento en una solución de sulfato de sodio (Figura 19).

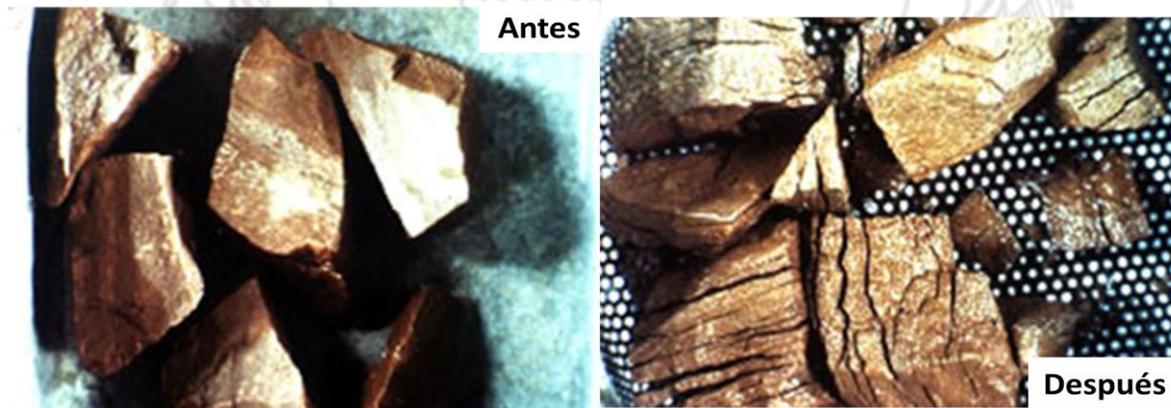


Figura 19. Resultados del ensayo de Disgregabilidad.

Fuente: <http://www.pavementinteractive.org/article/durability-and-soundness/>, 2014.

c) Partículas friables y arcillosas:

Con este ensayo se estima la cantidad de contaminantes como arcillas, madera, mica entre otros, es decir cuánta contaminación tiene el agregado (**Figura 20**).



Figura 20. Agregado con presencia de materiales contaminantes.

4.3.2 Especificaciones a cumplir por los agregados

En la **Tabla 8** se muestran las especificaciones para las propiedades de la Fuente.

Tabla 8. Requerimientos SUPERPAVE® para las propiedades de la Fuente.

Propiedad	Norma de ensayo	Especificación
Abrasión Los Ángeles	AASHTO T 96	Máximo 35 %
Disgregabilidad en sulfatos	AASHTO T 104	Máximo 10 %
Partículas friable y arcillosas	AASHTO T 112	Máximo 0,2 %

Fuente: Propuesta de modificación al CR-2010, 2013 (6)

La **Tabla 9** muestra las especificaciones establecidas para las propiedades de consenso que los agregados deben cumplir para incorporar en la metodología de diseño Superpave®.

Tabla 9. Requerimientos SUPERPAVE® para las propiedades de Consenso.

Tránsito diseño (Millones de ESAL's)	Angularidad en Agregado grueso, ASTM D 5821 % 1 cara fracturada / % 2 caras fracturadas		Contenido de vacíos en Agregado Fino, AASHTO T 304, %		Equivalente de Arena, AASHTO T 176 Mínimo, %	Partículas planas y elongadas, ASTM D 4791 Máximo, %
	Espesor ≤ 100 mm	Espesor > 100 mm	Espesor ≤ 100 mm	Espesor > 100 mm		
< 1	75/-	50/-	40	40	40	10
1 a < 10	85/80	60/-	45	40	45	10
10 a < 30	95/90	80/75	45	40	45	10
≥ 30	100/100	100/100	45	45	50	10

Fuente: AASHTO R 35, 2013 (7)

Una vez escogido el agregado a utilizar, se necesitan los siguientes datos para poder realizar el diseño de mezcla:

- Cantidad y granulometría de cada apilamiento a utilizar.
- Gravedad específica bruta y absorción de cada apilamiento.

Los agregados son porosos, por lo tanto, pueden absorber agua y ligante asfáltico en grado variable. Además, la relación de absorción de agua – asfalto varía, dependiendo del agregado; generalmente la absorción de asfalto es de ¼ a ¾ de la absorción del agua. La gravedad específica bruta del agregado toma en cuenta todos los poros de la muestra para el cálculo del volumen, asumiendo que los poros que absorben agua no lo hacen con el asfalto. De manera que corresponde a la relación volumétrica de menor magnitud (mayor volumen).

4.4 Selección de la granulometría óptima de diseño

La granulometría es la propiedad más importante del agregado para mezclas asfálticas. La graduación de los agregados controla o influye en las propiedades volumétricas de la mezcla, en la estabilidad, la trabajabilidad, la tendencia hacia la separación del ligante y a la dificultad o facilidad de compactación. La graduación también determina la macro textura del pavimento terminado.

Los límites de la granulometría se establecen en función del tránsito y de la posición relativa de la capa específica dentro de la estructura del pavimento. En la **Tabla 10** se presentan los requerimientos SUPERPAVE® para la distribución de los agregados. La curva granulométrica se debe diseñar de

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 39 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

acuerdo con una serie de puntos de control: tamaño máximo (pasa 100 %), tamaño máximo nominal (primer tamiz que retiene al menos 10 %), un tamiz de separación gruesos/finos y polvo mineral (pasa por el tamiz 75 μm (N° 200)). Estos puntos de control dependen del tamaño máximo nominal del agregado. El sistema SUPERPAVE® establece cinco usos granulométricos, correspondientes a tamaños máximos nominales de 37,5 mm, 25,0 mm, 19,0 mm, 12,5 mm, 9,5 mm y 4,75 mm.

Tabla 10. Puntos de control de granulometrías SUPERPAVE®.

Tamiz, mm	Tamaño Máximo Nominal del Agregado, mm												
	37,50		25,00		19,00		12,50		9,50		4,75		
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
50,000	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
37,500	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
25,000	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	
19,000	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-	
12,500	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-	100	-	
9,500	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100	95	100	
4,750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100	
2,360	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67	-	-	
1,180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	60	
0,075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	12	
Tamiz de Control Primario PCS, mm		9,5		4,75		4,75		2,36		2,36		1,18	
% Pasando tamiz de control primario:	Fina	67		60		67		58		67		60	
	Densa	47		40		47		39		47		42	
	Gruesa	31		28		32		28		32		30	

Fuente: AASHTO M 323, 2013 (8)

El Punto PCS (Primary Control Sieve) indica si la granulometría es densa gruesa cuando pasa por debajo o densa fina si pasa por encima. Línea de máxima densidad sirve de comparación pues granulometrías muy cercanas no cumplen con los parámetros volumétricos como el VMA (Ver **Figura 21**).

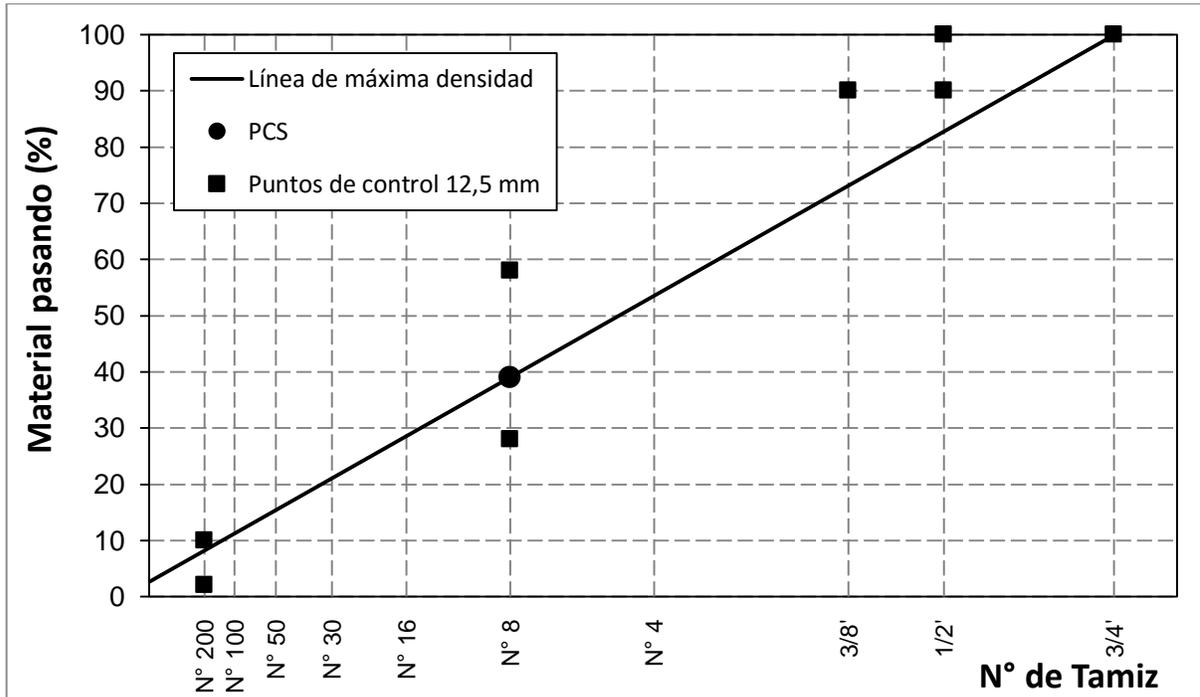


Figura 21. Representación esquemática de los componentes de granulometría.

Se procede a formular tres granulometrías de prueba que cumplan con lo indicado anteriormente, para luego preparar la mezcla asfáltica. De acuerdo a las combinaciones establecidas se tienen que combinar las propiedades de los agregados para confirmar que cumplen con las especificaciones establecidas de los agregados de la sección 4.3.2 de este documento.

Para la combinación de las propiedades de angularidad del agregado grueso y fino, equivalente de arena y absorción se tiene que utilizar la ecuación **Ec. 3**:

$$Y = \frac{Y_1 \times P_1 + Y_2 \times P_2 + Y_3 \times P_3 + \dots + Y_n \times P_n}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

Y = propiedad a combinar

Y_n = propiedad de cada apilamiento

P_n = porcentaje de combinación de cada apilamiento

Para la combinación de las gravedades específicas se utiliza la ecuación **Ec. 4**:

$$G_{bs \text{ agreg}_{comb}} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n)}{\left(\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots + \frac{P_n}{G_n}\right)} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$G_{bs \text{ agreg}_{comb}}$ = gravedad específica de la combinación de agregados

G_n = gravedad específica de cada apilamiento

P_n = porcentaje de combinación de cada apilamiento

4.5 Preparación de especímenes de mezcla asfáltica

El asfalto y los agregados son combinados a la temperatura de mezclado. Después de mezclado el ligante con los agregados, la mezcla debe ser acondicionada por un período de 2 horas a la temperatura de compactación (AASHTO R 30). Este envejecimiento a corto plazo simula la producción de la mezcla en planta hasta la colocación en sitio. El envejecimiento a corto plazo (curado) es importante porque provee tiempo para que el agregado absorba asfalto y ayuda a minimizar la variabilidad en cálculos volumétricos. La pérdida de volumen efectivo de ligante asfáltico por absorción del agregado tiene un efecto importante en el diseño de mezcla y en su desempeño.

Se preparan 2 especímenes, cada uno con aproximadamente 4500 g, que se compactan por giros al $N_{diseño}$ para alcanzar una altura entre 110 mm y 120 mm (AASHTO T 312). Este peso puede variar de acuerdo con el volumen del agregado. También se preparan dos especímenes para la determinación de la densidad máxima teórica con un peso de 2000 g (tamaño nominal máximo de 19,0 mm).

El contenido de asfalto a adicionar depende de cada granulometría por lo que se tiene que calcular de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Se calcula la gravedad específica efectiva de la mezcla G_{se} según la ecuación **Ec. 5**:

$$G_{se} = G_{bs} + 0,8(G_{sa} - G_{bs}) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

G_{se} = gravedad específica efectiva de la mezcla

G_{sa} = gravedad específica aparente de la combinación de agregados

G_{bs} = gravedad específica bruta de la combinación de agregados

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 42 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

El valor de 0,8 se puede cambiar entre 0,6 o 0,5 para agregados absorbentes a criterio del diseñador basado en su experiencia.

Luego se estima el volumen de asfalto absorbido V_{ba} con la ecuación **Ec. 6**:

$$V_{ba} = \frac{P_{agreg}(1 - V_a)}{\left(\frac{P_{asf}}{G_{asf}} + \frac{P_{agreg}}{G_{sc}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{bs}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

V_{ba} = volumen de asfalto absorbido

P_{agreg} = porcentaje de agregado en la mezcla (suponer 94 %)

V_a = volumen de vacíos de aire de 0,04

P_{asf} = porcentaje de ligante en la mezcla (suponer un 6 %)

G_{asf} = gravedad específica del ligante

Luego se estima el volumen de ligante efectivo V_{be} con la ecuación **Ec. 7**:

$$V_{be} = 0,081 - 0,02931 \times \ln TMN \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

V_{be} = volumen de asfalto efectivo

TMN = tamaño máximo nominal (en pulgadas)

Finalmente el contenido de asfalto inicial P_{bi} se calcula con la ecuación **Ec. 8**:

$$P_{bi} = \frac{G_{asf}(V_{be} + V_{ba})}{G_{asf}(V_{be} + V_{ba}) + W_s} \times 100 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

P_{bi} = contenido de asfalto inicial en % PTM

G_{asf} = gravedad específica del ligante

V_{ba} = volumen de asfalto absorbido

V_{be} = volumen de asfalto efectivo

W_s = peso del agregado en gramos que se calcula con la ecuación **Ec. 9**:

$$W_s = \frac{P_s(1 - V_a)}{\left(\frac{P_{asf}}{G_{asf}} + \frac{P_{agreg}}{G_{se}}\right)} \quad \text{Ec. 9}$$

4.5.1 Compactación Giratoria SUPERPAVE® (CGS)

El proceso debe realizarse rápidamente, para evitar pérdida de calor, y se debe tener el cuidado de que la fracción fina y la gruesa de la mezcla no se separen. Se usa el Compactador Giratorio Superpave® (CGS) que ejerce una acción de compactación axial y de cortante. Se utilizan moldes de 150 mm de diámetro, para poder utilizar agregados de mayores tamaños de hasta 37,5 mm de tamaño máximo. Se registra de manera automática la medida de la altura durante la compactación. Esto permite evaluar la densificación durante la compactación (porcentaje de compactación en función del número de giros). El compactador aplica 600 kPa de presión al espécimen y gira a una velocidad de 30 rpm con un ángulo interno de giro de 1,16 ° y ángulo externo de 1,25 ° (Figura 22).

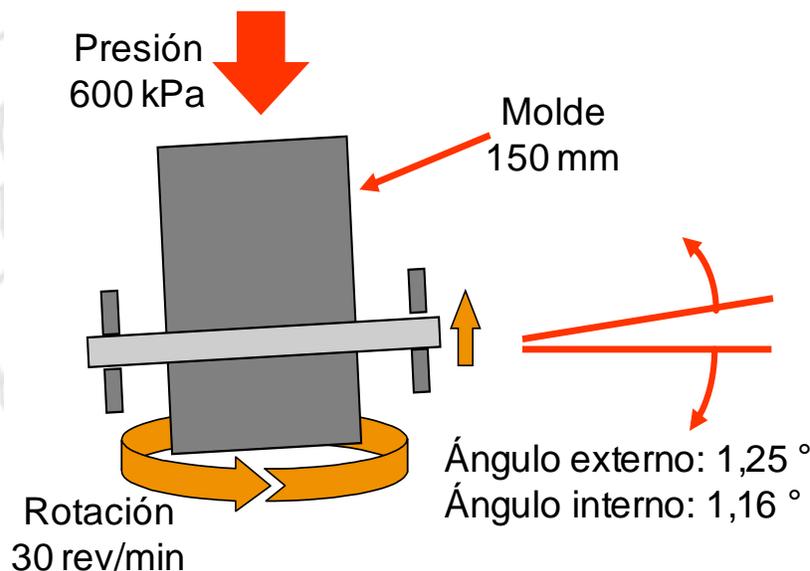


Figura 22. Diagrama del Compactador Giratorio Superpave® (CGS).

Fuente: FHWA-IF-04-014, 2004 (4).

El esfuerzo de compactación es función del número de giros del compactador que a la vez es función del nivel de tránsito. Usando la gravedad específica bruta de la mezcla y la altura final de

compactación se puede calcular el cambio en la compactación como porcentaje de la gravedad específica máxima teórica, a partir del número de giros.

Existen tres puntos críticos en la curva de compactación que son evaluados en el diseño SUPERPAVE®. N_{ini} se utiliza para evitar mezclas muy blandas, es importante porque se ha encontrado que mezclas fácilmente compactables son también deformables. $N_{máx}$ es importante para prevenir que las mezclas sean compactadas bajo las cargas de tránsito y alcancen un nivel de densificación tal que se produzca flujo plástico. También se cuenta con N_{dis} que depende de la cantidad de ejes equivalentes (nivel de tránsito); representando la densificación del proceso constructivo y la asociada con las primeras cargas sobre el pavimento (

Figura 23). En la **Tabla 11** se encuentran los valores de números de giros para diseño original y la modificación propuesta en el informe del NCHRP 573 (14).

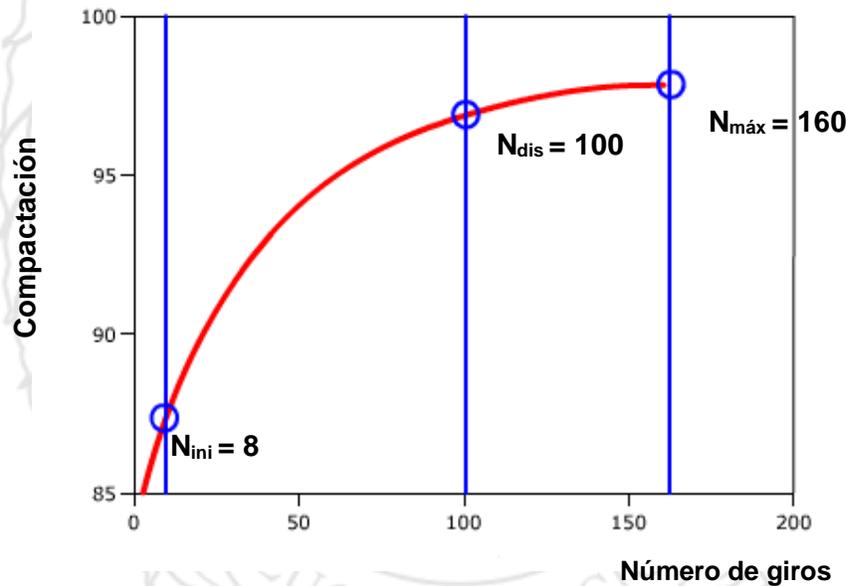


Figura 23. Comportamiento de la compactación con relación al número de giros.

Fuente: http://training.ce.washington.edu/VSL/mix_design/gyratory_compactor/gyratory_description.htm.Fig_15, 2014.

Tabla 11. Número de giros de compactación Superpave®.

Tránsito diseño (Millones ESAL's)	Número de giros de compactación original			Cambio propuesto en el número de giros de compactación	
	N _{ini}	N _{dis}	N _{máx}	N _{dis} < PG 76-XX	N _{dis} ≥ PG 76-XX o capa a 100 mm o más de profundidad
< 1	7	75	115	65	50
1 a < 10	8	100	160	80	65
10 a < 30	8	100	160	80	65
≥ 30	9	125	205	100	80

Fuente: NCHRP 573, 2007 (14).

Una vez que se tienen los especímenes de ensayo compactados, se procede a medir las gravedades específicas bruta y máxima teórica de acuerdo con los métodos AASHTO T 166 y T 209 respectivamente, para calcular los siguientes parámetros volumétricos:

a) Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}):

El G_{se} incluye todos los espacios de vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto. El volumen de asfalto absorbido por el agregado es menor al volumen de agua absorbida, por lo que el valor de G_{se} debe estar entre las gravedades brutas y aparentes, este valor se determina usando la ecuación **Ec. 10**:

$$G_{se} = \frac{(100 - P_{asf})}{\frac{100}{G_{mm}} + \frac{P_{asf}}{G_{asf}}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado (adim)

G_{mm} = Gravedad específica máxima teórica (adim)

P_{asf} = Contenido de asfalto (% PTM)

G_{asf} = Gravedad específica del asfalto (adim)

b) Vacíos de aire (V_a):

Es el contenido de espacios dentro de la mezcla asfáltica que está entre las partículas recubiertas de agregado. Las capas asfálticas deben diseñarse para contener un volumen de vacíos de aire suficiente al llegar a su densidad final bajo tráfico, de manera que no se produzcan exudaciones que dan problemas

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 46 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

estabilidad y poca resistencia al deslizamiento. Si un pavimento presenta un exceso de vacíos, esto ocasionará problemas de durabilidad y fatiga; Se calcula con la ecuación **Ec. 11**:

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{bs}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

V_a = Vacíos de aire (%)

G_{mm} = Gravedad específica máxima teórica (adim)

G_{bs} = Gravedad específica bruta de la mezcla (adim)

c) Vacíos en el agregado mineral (VMA):

Es la cantidad de cavidades en el agregado mineral llenas con aire y con ligante asfáltico efectivo. Un valor bajo de VMA determina problemas de estabilidad, resistencia al resbalamiento, durabilidad, fatiga, flexibilidad y trabajabilidad. Se calcula con la ecuación **Ec. 12**:

$$VMA = 100 \times \left(1 - \frac{G_{bs} \times P_{agreg}}{G_{bs_{agreg}}} \right) \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

VMA = Vacíos en el agregado mineral (%)

G_{bs} = Gravedad específica bruta de la mezcla (adim)

P_{agreg} = Contenido de agregado (% PTM)

$G_{bs_{agreg}}$ = Gravedad específica del agregado combinado (adim)

d) Vacíos llenos con ligante asfáltico (VFA):

Es el contenido de cavidades llenas con ligante asfáltico en volumen efectivo relativo a la cantidad de cavidades en el agregado (llenas con aire y con ligante asfáltico efectivo). En otras palabras, es el porcentaje del VMA que contiene ligante asfáltico. Un valor alto provoca problemas de estabilidad y resistencia al deslizamiento, mientras que una carencia determina problemas de durabilidad, fatiga, flexibilidad y trabajabilidad. Se calcula con la ecuación **Ec. 13**:

$$VFA = \left(\frac{VMA - V_a}{VMA} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 13}$$

Donde;

VFA = Vacíos llenos con asfalto (%)

V_a = Vacíos de aire (%)

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 47 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

VMA = Vacíos en el agregado mineral (%)

e) Razón polvo/asfalto ($P_{0,075}/P_{asfefe}$):

Se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm (N° 200) y el contenido de asfalto efectivo (en porcentaje del peso total en la mezcla menos el asfalto absorbido). Se calcula con la ecuación **Ec. 14**:

$$\frac{P_{0,075}}{P_{asfefe}} = \frac{P_{0,075}}{-(P_{agreg} \times G_{asf}) \times \left(\frac{G_{se} - G_{bs_{agreg}}}{G_{se} \times G_{bs_{agreg}}} \right) + P_{asf}} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$P_{0,075}/P_{asfefe}$ = relación polvo/asfalto (%)

$P_{0,075}$ = porcentaje del agregado combinado pasando el tamiz N° 200 (%)

P_{agreg} = porcentaje de agregado en la mezcla por peso total de mezcla (%)

G_{asf} = gravedad específica del asfalto (adim)

P_{asf} = porcentaje de asfalto en la mezcla PTM (%)

$G_{bs_{agreg}}$ = gravedad específica de la combinación de agregado (adim)

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado (**Ec. 10**) (adim)

f) Porcentaje de compactación %Gmm al $N_{inicial}$ y al $N_{diseño}$:

Es la medición del porcentaje de compactación del espécimen cuando se utiliza el Compactador Giratorio Superpave®, que se puede calcular en cualquiera de los giros, en este caso se calculan para el N_{ini} (**Ec. 15**) y el $N_{diseño}$ (**Ec. 16**)

$$\%Gmm_{inicial} = 100 \times \frac{G_{bs} \times h_{diseño}}{Gmm \times h_{inicial}} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

$\%Gmm_{inicial}$ = densidad relativa al $N_{inicial}$ (%)

G_{bs} = gravedad específica bruta de la mezcla (adim)

Gmm = gravedad específica máxima teórica (adim)

$h_{diseño}$ = altura a los giros de diseño $N_{diseño}$ (mm)

$h_{inicial}$ = altura a los giros de diseño $N_{inicial}$ (mm)

$$\%Gmm_{inicial} = 100 \times \frac{G_{bs}}{Gmm} \quad \text{Ec. 16}$$

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 48 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

Donde:

%G_{mm}_{diseño} = densidad relativa al N_{diseño} (%)

G_b = gravedad específica bruta de la mezcla (adim)

G_{mm} = gravedad específica máxima teórica (adim)

Una vez calculados todos los parámetros volumétricos para cada granulometría de prueba, se tienen que evaluar las mezclas para establecer cuál es la mejor granulometría, lo cual se hace llevando todas las granulometrías a un mismo punto de comparación, que es en un porcentaje de vacíos de 4 %.

Esto se hace con las siguientes ecuaciones (7):

1. Diferencia de vacíos ΔV_a y vacíos de aire estimado $V_{a\text{estimado}}$:

$$\Delta V_a = 4,0 - V_a \quad \text{Ec. 17}$$

$$V_{a\text{estimado}} = V_a + \Delta V_a \quad \text{Ec. 18}$$

Donde

V_a = porcentaje de vacíos de aire de cada mezcla de prueba (%)

2. Diferencia en el contenido de asfalto ΔP_{asf} y contenido de asfalto estimado $P_{\text{asfestimado}}$:

$$\Delta P_{\text{asf}} = -0,4(\Delta V_a) \quad \text{Ec. 19}$$

$$P_{\text{asfestimado}} = P_{\text{asf}} + \Delta P_{\text{asf}} \quad \text{Ec. 20}$$

3. Diferencia en el ΔVMA y VMA estimado:

$$\Delta VMA = 0,2(\Delta V_a) \quad V_a > 4,0 \quad \text{Ec. 21}$$

$$\Delta VMA = -0,12(\Delta V_a) \quad V_a < 4,0 \quad \text{Ec. 22}$$

$$VMA_{\text{estimado}} = VMA_{\text{mezcla}} + \Delta VMA \quad \text{Ec. 23}$$

4. VFA estimado:

$$VFA_{\text{estimado}} = \frac{100(VMA_{\text{estimado}} - V_{a\text{estimado}})}{VMA_{\text{estimado}}} \quad \text{Ec. 24}$$

5. Relación polvo asfalto estimada:

$$\frac{P_{0,075}}{P_{be}} = \frac{P_{0,075}}{-(P_{agreg} G_{asf}) \times \left(\frac{(G_{se} - G_{bs_{agreg}})}{(G_{se} \times G_{bs_{agreg}})} \right) + P_{asfestimado}} \quad \text{Ec. 25}$$

6. %Gmm inicial estimado:

$$\%Gmm_{inicialestimado} = \%Gmm_{inicial} - \Delta Va \quad \text{Ec. 26}$$

7. %Gmm diseño estimado:

$$\%Gmm_{diseñoestimado} = 100 - Va_{estimado} \quad \text{Ec. 27}$$

Una vez que todas las tres granulometrías han sido analizadas, se procede a escoger la mejor granulometría, es decir, la que cumpla con todos los parámetros volumétricos para la mezcla asfáltica y si todas cumplen se escoge la que tenga menor contenido de asfalto por una cuestión de costos. Los parámetros para comparar se exponen en la **Tabla 12** de la siguiente sección 4.6 de este documento.

4.6 Selección del contenido óptimo de ligante asfáltico

Una vez escogida la granulometría óptima, se procede a preparar los especímenes para encontrar el contenido óptimo de asfalto. Se tienen que dosificar 4 contenidos de asfalto: el contenido de asfalto estimado de diseño y de este porcentaje $\pm 0,5 \%$, y $+ 1 \%$. Se preparan 3 pastillas CGS para cada contenido de asfalto y 2 pastillas Gmm para poder luego realizar los cálculos de la volumetría.

Una vez que la compactación se ha completado, es necesario conducir un análisis de los datos para determinar el contenido óptimo de asfalto. Para este propósito se trazan las curvas de diseño a partir de los 4 contenidos de asfalto de prueba, las cuales incluyen todos los parámetros volumétricos de la mezcla (promedio de los tres especímenes).

Luego, se determinan las propiedades de la mezcla al N_{dis} . En la **Figura 24** dichas propiedades corresponden a las líneas rojas y se comparan con los criterios especificados para cada tamaño de nominal máximo del agregado, como se observa en la **Tabla 12**.

Cuando se ha determinado el contenido de asfalto óptimo, se tienen que preparar 2 especímenes CGS con su respectiva muestra para Gmm. Lo anterior para determinar el cumplimiento del nivel de compactación para los giros máximos $N_{máx}$.

Si todos los parámetros volumétricos se cumplen, entonces el contenido de asfalto óptimo obtenido se puede utilizar. De no ser este el caso, se tiene que realizar un análisis de la mezcla para determinar cuáles parámetros no se cumplen para realizar las acciones pertinentes y corregir los valores. Tales acciones pueden incluir cambios en el agregado desde su granulometría o hasta las fuentes de origen.

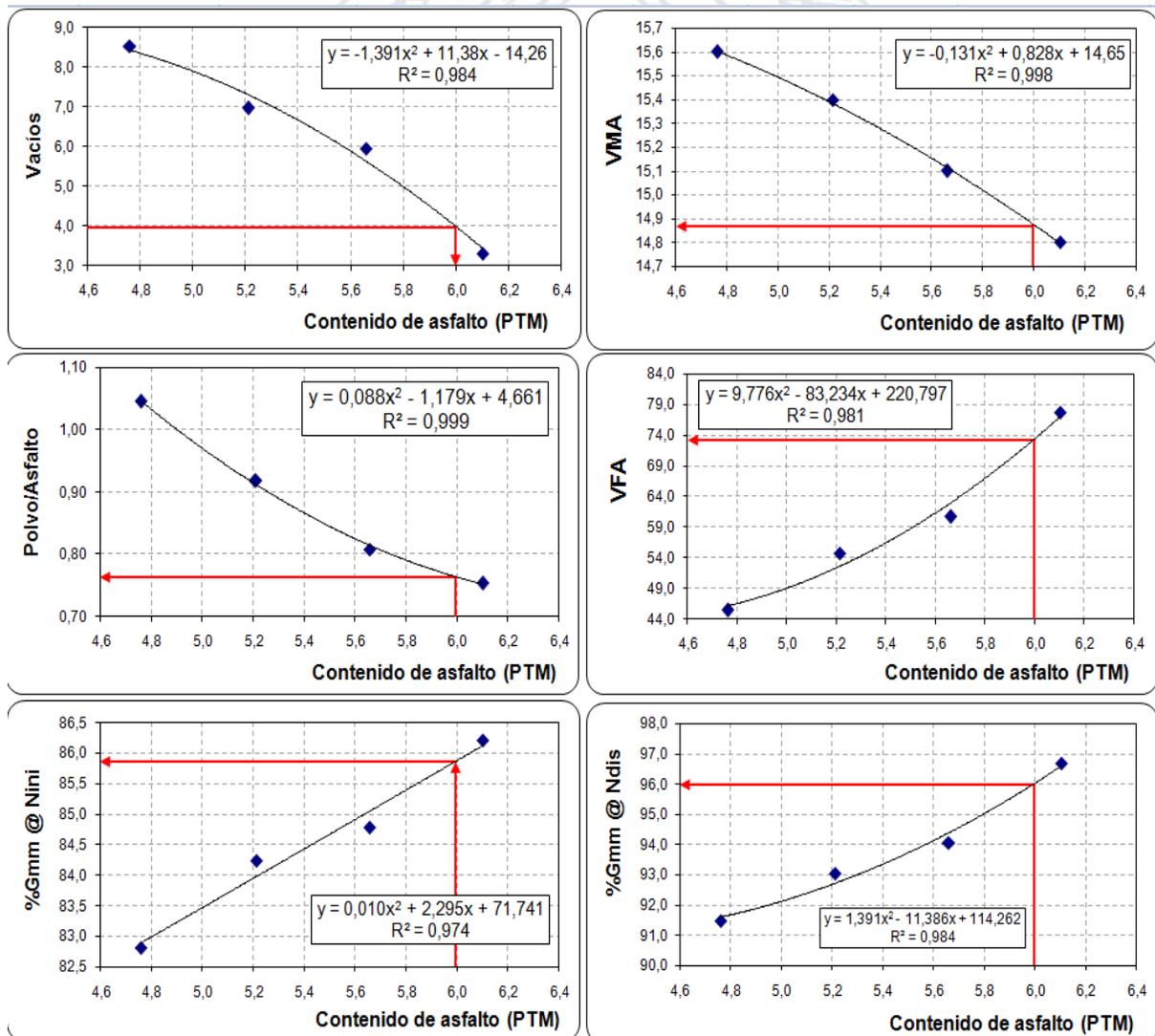


Figura 24. Ejemplo de los gráficos de diseño volumétrico Superpave®.

Tabla 12. Requerimientos volumétricos SUPERPAVE®.

Tránsito diseño (Millones ESAL's)	Nivel de compactación, %Gmm			VFA (%)	VMA (%) Mínimo						Relación Polvo/asfalto (%)
	N _{ini}	N _{dis}	N _{máx}		Tamaño máximo nominal (mm)						
					37,5	25	19	12,5	9,5	4,75	
< 1	≤ 90,5	96	≤ 98	65-80	11	12	13	14	15	16	0,6 - 1,3
1 a < 10				65-80							
10 a < 30	≤ 89	65-75									
≥ 30											

Fuente: AASHTO M 323, 2013 (8).

4.7 Susceptibilidad al daño por humedad

El daño por humedad se presenta como la pérdida de adherencia entre la superficie del agregado y el ligante asfáltico. Este daño ocurre cuando el agua se encuentra entre la película de asfalto y la superficie del agregado. El asfalto es entonces desplazado por el agua o el vapor de agua. La exudación en las huellas de los neumáticos son indicadores de desnudamiento.

Existen diferentes formas de separación ligante asfáltico / agregado (15):

- Desligado (por acción de una capa delgada de agua entre el agregado y el ligante asfáltico).
- Desplazamiento (cuando el agua desplaza el ligante asfáltico).
- Emulsificación espontánea (por contacto con el agua y minerales).
- Presión de poros (dado un alto contenido de vacíos, saturación, entrapamiento y aplicación de cargas)
- Ruptura de película delgada (por esfuerzos elevados).

El ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral se tiene que realizar de acuerdo con el método AASHTO T 283. Se preparan al menos 6 especímenes para el compactador giratorio que tienen un peso aproximado de 3800 g, la altura de los mismos debe estar entre 90 mm y 100 mm. El nivel de vacíos de aire debe estar entre $(7 \pm 1) \%$

La resistencia retenida a la tensión diametral es la relación de resistencia del grupo acondicionado entre la resistencia del grupo seco que debe ser mayor o igual a 85 % (sin efectuar el período de congelamiento). La resistencia a la tensión diametral de los especímenes acondicionados a 25 °C debe

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 52 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

ser de al menos 750 kPa. Para ambas pruebas, tanto en falla al aire como la falla acondicionada, las pastillas Superpave® serán moldeadas con mezcla asfáltica elaborada a escala de laboratorio con agregados que no hayan pasado por el secador de la planta.

5. DISEÑO DE MEZCLA NIVEL 2

En este caso se incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por criterios de falla. Está planteado para más de un millón de ejes equivalentes y menos de diez millones de ejes equivalentes. Incluye todo el análisis del **NIVEL 1** más el análisis de la susceptibilidad a la deformación permanente mediante el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).

5.1 Deformación permanente

La deformación permanente, o lo que se conoce como “roderas”, es uno de los principales modos de falla de una estructura de pavimento (*I*). La deformación permanente, es la acumulación de pequeñas deformaciones causadas por densificación y/o deformaciones de cortante repetidas bajo la carga de neumáticos. Este tipo de deformación es causada por consolidación, movimiento lateral, o ambos, de la mezcla asfáltica bajo la acción del tránsito. En ambos casos, la deformación aparece como una depresión longitudinal a lo largo de las huellas de los neumáticos en la carretera.

Las características del ligante y el agregado afectan el desempeño del pavimento asfáltico. La experiencia indica que ligantes más rígidos con agregado grueso son típicamente más resistentes a la deformación que las mezclas que contienen agregado más fino y contenidos de ligante más altos. El grado de desempeño del ligante afecta el desempeño por deformación permanente de la mezcla asfáltica. En general, a mayor grado, mayor rigidez del ligante y mayor resistencia a la deformación.

Las propiedades del agregado son importantes también. De hecho, se ha demostrado que la resistencia a la deformación de la mezcla puede ser mejorada, diseñando una graduación del agregado más gruesa esto es más efectivo que cambiar el grado de desempeño del ligante asfáltico o el contenido del mismo. Al mejorar las propiedades volumétricas como vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos con asfalto (VFA), de la forma adecuada, puede minimizar la deformación en la mezcla y puede aumentar su durabilidad.

Las características de compactación, definidas por la tasa de densificación durante la compactación de laboratorio, pueden proveer información relativa a la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica. En teoría, a mayor esfuerzo de compactación requerido para compactar el espécimen, mayor es la resistencia a cortante del mismo. Conforme el espécimen se aproxima a la densidad máxima permitida, al final del proceso de compactación, la resistencia a la deformación puede aumentar.

5.1.1 Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

En el equipo APA, una rueda cóncava (**Figura 25**) viaja a lo largo de una manguera presurizada, que descansa sobre el espécimen (16). Los especímenes cilíndricos son compactados en el compactador giratorio con una altura de 75 mm y un diámetro de 150 mm. El APA típicamente usa una carga de 445 N (100 lb) y una presión de 690 kPa (100 psi).

Este ensayo se realiza a una temperatura de 60 °C luego de un acondicionamiento de los especímenes de 6 horas a la misma temperatura (falla en seco). Los vacíos de los especímenes se encuentran entre 6 % y 8 % y el ensayo tiene una duración de 8000 ciclos carga.



Figura 25. Montaje de especímenes en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).

La deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga en el APA deberá ser menor o igual a 5,5 mm. Esta deformación deberá obtenerse como promedio de 1 corrida del ensayo (6 pastillas). Las pastillas Superpave® a ser usadas en el ensayo deberán ser producidas a un contenido de vacíos de aire de $(7,0 \pm 1,0) \%$.

Se requiere adicionalmente que el ensayo de APA sea realizado con mezcla únicamente acondicionada a corto plazo ($4 \text{ horas} \pm 5 \text{ min}$ a $135 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$), compactada inmediatamente después de este acondicionamiento, con el objetivo de evitar un recalentamiento excesivo de la mezcla, ya que esto puede provocar una oxidación y envejecimiento no deseados en la mezcla. En el caso de mezclas de planta se debe calentar la mezcla hasta llevarla a temperatura de compactación en un periodo no mayor a 2 horas. El procedimiento de ensayo a seguir está normado por AASHTO T 340.

6. DISEÑO DE MEZCLA NIVEL 3

Se incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por criterios de falla más la caracterización física mecánica de la mezcla asfáltica. Está planteado para más de diez millones de ejes equivalentes y menos de treinta millones de ejes equivalentes. Incluye el **NIVEL 1** más el análisis de la susceptibilidad a la deformación permanente mediante el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), el análisis de evaluación de agrietamiento por fatiga mediante el ensayo a flexotracción de vigas y se incluye la caracterización de la mezcla asfáltica mediante el ensayo de módulo dinámico complejo E^* para incorporar en una guía de diseño mecánica empírica.

6.1 Deformación Permanente

La deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) a la temperatura alta de desempeño, deberá ser menor o igual a 3,5 mm. El procedimiento de ensayo a seguir está normado por AASHTO T340.

6.2 Agrietamiento

La fatiga en mezclas asfáltica es el fenómeno por el cual el material falla por la repetición de cargas que no son lo suficientemente grandes para causar la falla en una sola aplicación. Se presenta un daño estructural que después de un número de repeticiones de carga que inducen a la aparición de

microgrietas. Estas microgrietas acumuladas con la repetición de carga pueden generar macrogrietas visibles y la eventual falla del material.

Para la determinación de la cantidad de repeticiones para la falla por fatiga se empleará la metodología AASHTO T 321 (**Figura 26**), se deberán correr como mínimo dos especímenes por deformación unitaria. Los especímenes de ensayo son vigas de mezcla asfáltica, con longitud de 380 mm y sección transversal de 50 mm (ancho) por 63 mm (altura), densificadas de forma que su contenido de vacíos sea de $(7,0 \pm 1,0)$ %. Los especímenes de ensayo serán envejecidos, de previo al ensayo, en un horno a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 5 días. La **Tabla 1** muestra las especificaciones propuestas para el ensayo de fatiga.

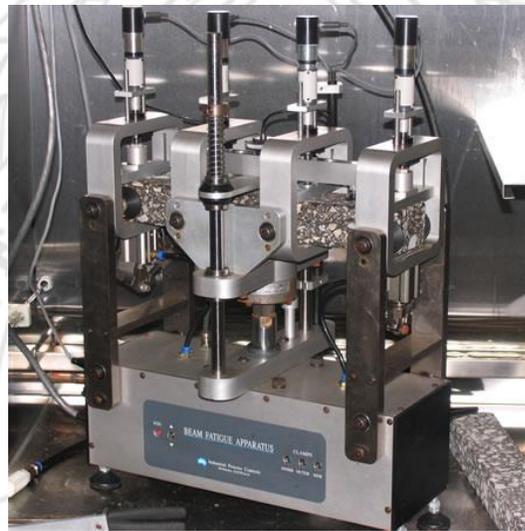


Figura 26. Equipo de flexotracción en vigas.

6.3 Módulo Dinámico Complejo

El módulo dinámico E^* de un material viscoelástico, se define como la respuesta desarrollada por el material bajo condiciones de carga sinusoidales en un dominio de frecuencias definidas (18,19). Este es un número complejo ya que contiene tanto una parte real como una imaginaria. De acuerdo a la teoría de viscoelasticidad, el valor absoluto del módulo complejo es por definición el Módulo Dinámico del material $|E^*|$.

El ensayo se realiza sobre especímenes extraídos de las pastillas compactadas en el CGS, estos tienen un diámetro de 101,6 mm y 150 mm de alto. Los núcleos deben tener un nivel de vacíos de $(7,0 \pm 0,5)$

Reporte LM-PI-UMP-026-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 56 de 63
--------------------------	--------------------------------------	-----------------

%). Los especímenes antes de ser compactados se tienen que acondicionar a corto plazo (4 horas \pm 5 min a 135 ± 3 °C). Adicionalmente, los núcleos tienen que cumplir con los criterios de planicidad y perpendicularidad establecidos en el método AASHTO PP 60 (**Figura 27**).



Figura 27. Montaje del ensayo de Módulo Dinámico.

Mediante la realización de este ensayo es posible conocer el módulo del concreto asfáltico a todos los niveles de análisis de temperatura y tiempos de carga, por medio de la Curva Maestra (AASHTO PP 62 o PP 61). Esta curva es construida utilizando el principio de superposición de tiempo y temperatura. Los datos a las distintas temperaturas ensayadas son corridos con respecto al logaritmo del tiempo hasta que todas las curvas se unen como una sola función (**Figura 28**). La curva resultante en función del tiempo, describe la dependencia del tiempo del material. Por otra parte la dependencia del material a la temperatura, está dada por la cantidad de espacio que debe moverse cada curva (Shift Factor).

La construcción de estas curvas con los resultados obtenidos del ensayo de módulo dinámico, son uno de los principales objetivos a seguir para la calibración de una guía de diseño mecánica en Costa Rica, ya que estas curvas son parte de los parámetros de entrada para la caracterización de pavimento asfáltico en cuanto a su desempeño ante los diversos esfuerzos a los que es sometido.

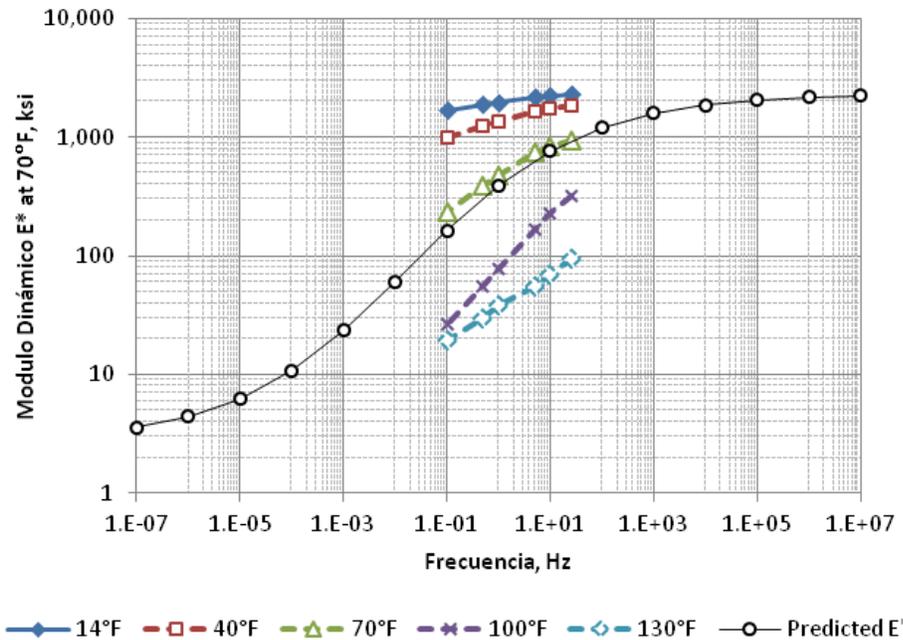


Figura 28. Ejemplo de Curva Maestra.

7. DISEÑO DE MEZCLA NIVEL 4

Se incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por criterios de falla más avanzados y está planteado para tránsito de diseño de más de treinta millones de ejes equivalentes. Incluye el **NIVEL 1** más el análisis de susceptibilidad al daño por humedad/ahuellamiento mediante el uso de la Rueda de Hamburgo (RH) (AASHTO T 324), la evaluación de agrietamiento por fatiga mediante el ensayo de flexotracción en vigas (AASHTO T 321), la caracterización de la mezcla asfáltica mediante el ensayo de modulo dinámico complejo E^* (AASHTO T 342 o TP 79) y el análisis de susceptibilidad al ahuellamiento mediante el ensayo triaxial de carga repetitiva (NCHRP 9-30A).

7.1 Deformación Permanente

La prueba de la rueda de Hamburgo AASHTO T 324 (**Figura 29**) mide los efectos combinados de deformación permanente y daño por humedad haciendo rodar una rueda de acero de 47 mm sobre muestras de mezcla asfáltica que se sumergen en agua caliente (típicamente a 50 °C). La carga en cada rueda es de 0,71 kN y se mueve a una velocidad de 30 cm por segundo (22). La deformación plástica luego de 10 mil ciclos (20 000 repeticiones) de carga en la pista de ensayo de Hamburgo (RH) a 50 °C,

debe ser menor o igual a 5,0 mm. Esta deformación debe obtenerse como promedio de 1 corrida del ensayo (4 pastillas). Las pastillas Superpave® a ser usadas en el ensayo deberán ser producidas a un contenido de vacíos de aire de $(7,0 \pm 1,0) \%$.



Figura 29. Equipo de Rueda de Hamburgo.

Adicionalmente, se deberá verificar que el punto de inflexión (PID) (**Figura 30**) en la curva de deformación en función del número de pasadas no ocurra antes de los 10 000 pasadas de la rueda. Esta situación es indicativa de facilidad de desnudamiento y por lo tanto se debe corregir mediante métodos que aseguren el mejoramiento de la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral (sea un aditivo antidesnudante o cal hidratada, tras una adecuada verificación en el laboratorio).

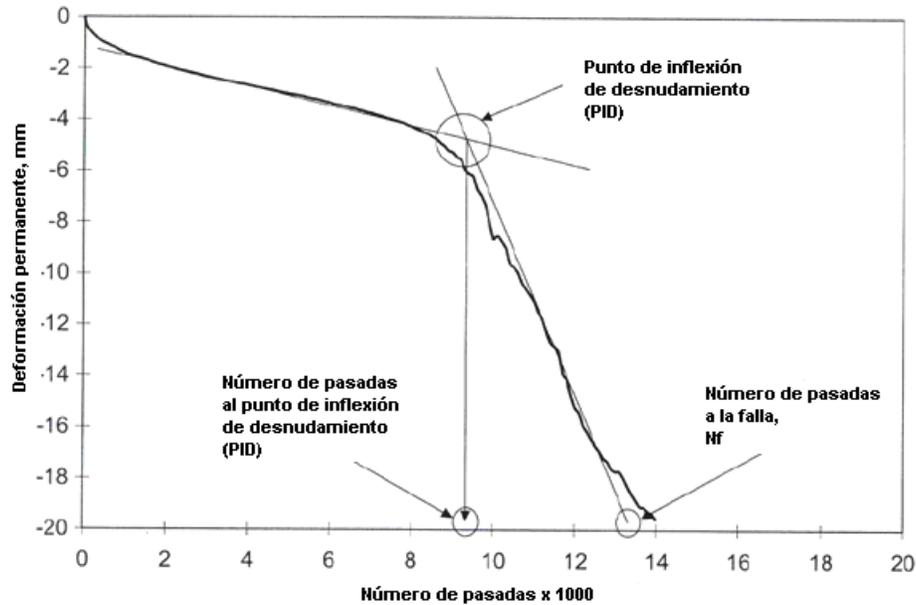


Figura 30. Curva característica de deformación en la rueda de Hamburgo.

Fuente: AASHTO T 324, 2011 (23).

Para el desarrollo del modelo o ecuación constitutiva se deberá realizar un ensayo triaxial de carga repetitiva (RLT por sus siglas en inglés). El procedimiento de ensayo de laboratorio se llevará a cabo de acuerdo al procedimiento establecido en NCHRP 9-30A (23). El ensayo se realiza a tres temperaturas como mínimo y la **Ecuación 28** muestra el formato del modelo típico de deformación permanente de mezclas asfálticas. En este caso, la variable respuesta está compuesta de la razón entre la deformación unitaria permanente (obtenida para cada ciclo de carga) y al deformación unitaria recuperable.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = k_1 T^{k_2} N^{k_3}$$

Ec. 29

Donde,

T= Temperatura, °C.

N= Repeticiones carga,

ϵ_p = Deformación unitaria permanente.

ϵ_r =Deformación unitaria recuperable

k_1, k_2, k_3 = coeficientes de regresión.

7.2 Agrietamiento por fatiga

Para la determinación de la cantidad de repeticiones para la falla por fatiga se empleará la metodología AASHTO T 321 (**Figura 26**), se deberán correr como mínimo dos especímenes por deformación unitaria. Los especímenes de ensayo son vigas de mezcla asfáltica, con longitud de 380 mm y sección transversal de 50 mm (ancho) por 63 mm (altura), densificadas de forma que su contenido de vacíos sea de $(7,0 \pm 1,0)$ %. Los especímenes de ensayo serán envejecidos, de previo al ensayo, en un horno a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 5 días. La **Tabla 1** muestra las especificaciones propuestas para el ensayo de fatiga.

A manera de resumen, el método consiste en aplicar cargas cíclicas que inducen deformaciones constantes a las vigas, hasta que las mismas alcancen una rigidez equivalente a la mitad de la rigidez inicial de la mezcla asfáltica, o de ser el caso de aplicarse deformaciones unitarias muy bajas en las que no se logra alcanzar dicha rigidez, el ensayo se detiene a los diez millones de ciclos de carga (24).

8. COMENTARIOS FINALES

La futura implementación de esta propuesta de diseño de mezcla permitirá establecer una metodología de diseño no solamente basada en parámetros volumétricos sino también en parámetros de desempeño y criterios de falla típicos de mezclas asfálticas. Esto con el objetivo de hacer más eficaces y eficientes las futuras carreteras buscando economizar en gran parte todos los recursos implementados. Adicionalmente se plantea como una herramienta en la toma de decisiones de los participantes de la construcción, mantenimiento, supervisión y control de pavimentos empleados en el diseño y construcción de las redes viales en nuestro país.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Roberts, F.L. Kandhal, P.S. Brown, E.R. Lee, D.Y. & Kennedy, T.W. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA Education Foundation, Lanham, MD, Third Edition, 2009.
2. Federal Highway Administration FHWA, *Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis*, Report Number FHWA-SA-95-003, 1995.
3. *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program*, Transportation Research Board, Report Number SHRP-A-410, 1994.

4. Federal Highway Administration FHWA, *Hot mix Asphalt for Seniors and Graduate Students*. CD/ROM FHWA-IF-04-014, 2004.
5. Padilla Cabrera Montserrat Estefania, D. F. (2011). *Implementación del Protocolo AMAAC para el diseño de mezclas asfálticas-Parte2*. Memoria de veranos de investigación científica UG-2011, 2334-2343.
6. Lanamme, *Propuesta de Modificación de División 400 CR-2010*. Documento LM-PI-UMP-016-R1. LanammeUCR, 2013.
7. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA)*, AASHTO Designation R 35.
8. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*, AASHTO Designation M 323.
9. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. AASHTO Designation T 283.
10. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010*. San José, Costa Rica, 2010.
11. Bonilla Miranda, Elías, *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el Grado de Desempeño de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país*. Tesis de Graduación, Costa Rica, Octubre 2012.
12. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*, AASHTO Designation MP 19.
13. Asphalt Institute, *Asphalt Handbook MS-4*. Estados Unidos. 2007. Pág. 194.
14. Prowell, B. D., and E. R. Brown, NCHRP Report 573: *Superpave Mix Design: Verifying Gyration Levels in the Ndesign Table*, Washington, DC: Transportation Research Board, 2007.
15. B. M. Kiggundu, F. L. Roberts. *Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods*. Report No. NCAT 88-02. Ed. National Center for Asphalt Technology (NCAT). Auburn. Alabama. 1988. pp. 4-38.
16. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Method of Test for Determining Rutting Susceptibility of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)*. AASHTO Designation: T 340-10.

17. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt (HMA)*. AASHTO Designation: T 342, Washington, D.C.
18. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. AASHTO Designation: TP 79, Washington, D.C.
19. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Practice for Preparation of Cylindrical Performance Test Specimens Using the Superpave Gyratory Compactor (SGC)*. AASHTO Designation: PP 60, Washington, D.C.
20. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Practice for Developing Dynamic Modulus Master Curves for Hot-Mix Asphalt (HMA)*. AASHTO Designation: PP 62, Washington, D.C.
21. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Practice for Developing Dynamic Modulus Master Curves for Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. AASHTO Designation: PP 61, Washington, D.C.
22. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)*. AASHTO T 324, Washington, D.C.
23. Von Quintus, H. L., J. Mallela, R. Bonaquist, C. W. Schwartz, and R. L. Carvalho. NCHRP Report 719: Calibration of Rutting Models for Structural and Mixture Design. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011.
24. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*. AASHTO Designation: T 321, Washington, D.C.