

**Influencia del Empaquetamiento de los Agregados sobre la Resistencia a la Deformación
Permanente de Mezclas Asfálticas**

Trabajo de tesis para optar el título de
Magíster en Ingeniería de Pavimentos

Autor

Didier Alexis Bellon Maldonado

Asesor

Ph.D. David González Herrera

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Pavimentos
Popayán, Cauca
Junio de 2018

AGRADECIMIENTOS

A Yolima, mi esposa, y a Laura, mi hija. Seres de un mismo amor.

A mis padres. Su esfuerzo me ha hecho lo que soy.

Al Ing. David. Modelo a seguir, en lo personal y en lo profesional.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tabla de Contenidos

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL EXPERIMENTO	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ALCANCE.....	3
1.4. ORGANIZACIÓN DEL INFORME	4
2. LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	5
2.1. COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA.....	5
2.1.1. Cemento Asfáltico	5
2.1.1.1. Propiedades	5
2.1.1.2. Relación reología–desempeño en el cemento asfáltico.....	7
2.1.1.3. Sistemas de clasificación de ligantes asfálticos	8
2.1.2. Propiedades de los Agregados Minerales	9
2.1.2.1. Dureza	9
2.1.2.2. Durabilidad.....	10
2.1.2.3. Forma y textura superficial de las partículas.....	10
2.1.2.4. Limpieza y partículas deletéreas	10
2.1.2.5. Tamaño y gradación.....	10
2.1.3. Pasta o Mastic (Combinación Llenante–Ligante).....	12
2.2. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	12
2.2.1. Objetivos del Diseño de Mezclas Asfálticas.....	13
2.2.1.1. Resistencia a la deformación permanente	13
2.2.1.2. Resistencia a la fatiga.....	13
2.2.1.3. Durabilidad.....	13
2.2.1.4. Resistencia al daño por humedad	13
2.2.1.5. Resistencia al deslizamiento	13
2.2.1.6. Trabajabilidad	13
2.2.1.7. Espesor de la película de asfalto	14
2.2.2. Criterios del Método Marshall para Diseño de Mezclas.....	14
2.2.2.1. Vacíos en los agregados minerales	14
2.2.2.2. Vacíos totales en la mezcla	15
2.2.2.3. Densidad	15
2.2.2.4. Estabilidad.....	15
2.2.2.5. Flujo	15
2.2.2.6. Criterios de diseño establecidos en la especificación.....	16
2.3. DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	16
2.3.1. Método de Ensayo para Determinar la Deformación Permanente.....	17
2.4. MÉTODO BAILEY PARA DEFINICIÓN DEL EMPAQUETAMIENTO.....	18
2.4.1. Principios del Método	18
2.4.2. Propiedades de Empaquetamiento	20
2.4.3. Metodología de Cálculo.....	22
3. METODOLOGÍA, MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.....	25
3.1. METODOLOGÍA	25

3.2. MATERIALES	26
3.3. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO	26
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	28
4.1. MATERIALES UTILIZADOS.....	28
4.1.1. Asfalto.....	28
4.1.2. Agregados Individuales	28
4.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO BAILEY	30
4.2.1. Modificación de los Agregados Individuales.....	30
4.2.2. Diseño de la Granulometría	31
4.3. DISEÑO DE MEZCLAS	34
4.3.1. Selección del Óptimo de Asfalto	35
4.3.2. Efecto del Empaquetamiento sobre los Parámetros Volumétricos	36
4.3.3. Efecto del Empaquetamiento sobre los Parámetros Marshall	36
4.3.4. Efecto del Empaquetamiento sobre la Densidad.....	37
4.4. ADHERENCIA.....	37
4.5. DEFORMACIÓN PERMANENTE	38
4.5.1. Velocidad de Deformación	38
4.5.2. Deformación Total	39
5. CONCLUSIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	42
ANEXOS	43

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparación entre métodos de clasificación de asfaltos.....	8
Tabla 2. Franjas granulométricas para mezclas de gradación continua	11
Tabla 3. Puntos de control y zona restringida – Mezclas 25 y 19 mm	12
Tabla 4. Parámetros volumétricos objetivo del diseño de mezclas	14
Tabla 5. Criterios de diseño de mezclas asfálticas de gradación continua.....	16
Tabla 6. Definición de los tamices de control del método Bailey	19
Tabla 7. Tamices de control en función del tamaño máximo nominal (NMAS)	19
Tabla 8. Efecto de las propiedades de empaquetamiento sobre el desempeño	21
Tabla 9. Rangos recomendados para los parámetros Bailey	21
Tabla 10. Relación de procedimientos de laboratorio a emplear en el proyecto.....	27
Tabla 11. Características del asfalto utilizado	28
Tabla 12. Características de calidad de los agregados individuales.....	29
Tabla 13. Granulometría de los agregados individuales originales	29
Tabla 14. Características de los agregados individuales originales	30
Tabla 15. Granulometría de los agregados individuales modificados	31
Tabla 16. Características de los agregados individuales modificados	31
Tabla 17. Porcentaje de los agregados individuales modificados sobre la mezcla	32
Tabla 18. Parámetros Bailey para las gradaciones de diseño.....	33
Tabla 19. Parámetros del diseño de mezcla para el óptimo de asfalto.....	36

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de los parámetros volumétricos de la mezcla.....	14
Figura 2. Grafica carga–deformación (estabilidad–flujo) en el ensayo Marshall	16
Figura 3. Ejemplo de curva deformación–tiempo.....	18
Figura 4. Esquema de las divisiones del método Bailey	19
Figura 5. Selección del peso unitario suelto de los gruesos	21
Figura 6. Programa experimental.....	26
Figura 7. Gradaciones de diseño – Mezclas 25 mm.....	32
Figura 8. Gradaciones de diseño – Mezclas 19 mm.....	33
Figura 9. Porcentaje de grava, arena y fino en las mezclas.....	34
Figura 10. Comportamiento de los parámetros volumétricos – Mezclas 25 mm.....	34
Figura 11. Comportamiento de los parámetros volumétricos – Mezclas 19 mm.....	35
Figura 12. Comportamiento de los parámetros Marshall – Mezclas 25 mm	35
Figura 13. Comportamiento de los parámetros Marshall – Mezclas 19 mm	35
Figura 14. Parámetros volumétricos para el óptimo de asfalto	36
Figura 15. Parámetros Marshall para el óptimo de asfalto.....	37
Figura 16. Densidades Rice y Bulk para el óptimo de asfalto	37
Figura 17. Velocidad de deformación en tres intervalos.....	38
Figura 18. Velocidad de deformación durante el ensayo de pista.....	38
Figura 19. Deformación total en ensayo de pista.....	39

ANEXOS

A. CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE LOS MATERIALES

B. CÁLCULOS MÉTODO BAILEY

C. DISEÑOS MARSHALL

D. ENSAYOS DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA

RESUMEN

Título: Influencia del Empaquetamiento de los Agregados sobre la Resistencia a la Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas.

Autor: Didier Alexis Bellon Maldonado

Asesor: Ph.D. David González Herrera

Palabras clave: empaquetamiento, ahuellamiento, método Bailey, mezcla asfáltica.

Contenido

El objetivo del experimento fue comprobar si el grado de empaquetamiento de los agregados, establecido de acuerdo con los criterios del método Bailey, mejora la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas. Se diseñó la granulometría y la mezcla con dos tamaños máximos (25 y 19 mm), cada uno de ellos con dos masas unitarias elegidas (95 y 105 % de la suelta del agregado grueso). Las cuatro mezclas así obtenidas, junto con las dos producidas por la planta de origen de los agregados, fueron sometidas al procedimiento de ensayo de pista en laboratorio (I.N.V. E-756).

Los parámetros volumétricos comprueban que, a mayor masa elegida, se incrementan los vacíos en los agregados minerales, el contenido de ligante y el espesor de la película de asfalto. En cuanto a los parámetros Marshall, se observó disminución de la estabilidad, aumento en el flujo y disminución en la relación estabilidad/flujo, todo ello con el aumento en la masa unitaria elegida.

Los resultados del ensayo de ahuellamiento comprueban que la velocidad de deformación disminuye en función del tamaño máximo del agregado, al igual que en función de la masa unitaria elegida. La mayor deformación total se presentó en la mezcla de la planta de origen, no diseñada por método Bailey y con el menor tamaño máximo, y la menor deformación en la mezcla de mayor tamaño y masa unitaria. Considerando que la deformación total disminuye con el aumento en la masa unitaria elegida y, en mayor proporción, con el aumento en el tamaño máximo del agregado, resultado del experimento se comprobó que la resistencia a la deformación plástica mejora cuando la granulometría es diseñada aplicando el método desarrollado por el Ingeniero estadounidense Robert Bailey.

ABSTRACT

Title: Influence of the Packaging of the Aggregates on the Resistance to the Permanent Deformation of Asphalt Mixtures.

Author: Didier Alexis Bellon Maldonado

Tutor: Ph.D. David González Herrera

Keywords: packaging, rutting, Bailey method, asphalt mixture.

Description

The experiment's objective was to verify if the packing of the aggregates, established according to Bailey method, improves the resistance to asphalt mixtures permanent deformation. The granulometry and the mixture were designed with two maximum sizes, each with two chosen unit masses. The four resulting mixtures, both with two produced by the aggregates origin plant, were subjected to rutting test in laboratory (I.N.V. E-756).

The volumetric parameters proved that, the greater the mass chosen, voids in the mineral aggregates, binder content and asphalt thickness film increases. Regarding the Marshall parameters, a decrease in stability, an increase in the flow and a decrease in the stability / flow ratio were observed, all with the increase in the chosen unit mass.

The results of the rutting test verify that deformation speed decreases as a function of the maximum aggregate size, as well as depending on the unit mass chosen. The greatest total deformation occurred in the mixture of the plant of origin, not designed by Bailey method and with the smallest maximum size, and the least deformation in the mixture of larger size and unit weight. Considering that total deformation decreases with increase in the selected unit mass and, in greater proportion, with the increase in the maximum aggregate size, the experiment proved that plastic deformation resistance improves when granulometry is designed applying the Bailey method.

INTRODUCCIÓN

En general, las mezclas asfálticas son una combinación de agregados, asfalto y aire, también conocida como concreto asfáltico. Uno de los posibles y más comunes mecanismos de deterioro de los pavimentos cuya superficie de rodadura es concreto asfáltico, es la degradación del perfil transversal en forma de irregularidades o hundimientos longitudinales coincidentes con las huellas de los vehículos, principalmente por deformación permanente en las capas estructurales o en el suelo de fundación, deterioro conocido como ahuellamiento. Cuando dicha deformación se ve acompañada de abultamientos laterales, su origen se atribuye a la excesiva deformación del concreto asfáltico, entre otras causas probables, por insuficiente compactación, combinación de cargas pesadas y baja velocidad de tráfico, baja viscosidad del asfalto en condiciones de alta temperatura, debilidad de la pasta (combinación llenante–ligante) como generadora de cohesión, inadecuada distribución del tamaño de las partículas de agregado o deficientes propiedades volumétricas de la mezcla.

En el caso particular de la distribución del tamaño de las partículas (granulometría), las proporciones individuales de los distintos agregados disponibles son determinadas en laboratorio, buscando un material que, entre otras características, sea capaz de soportar las deformaciones producidas por las cargas del tráfico, alcanzando un nivel de deformación tolerable durante el periodo de diseño, particularmente a alta temperatura, condición en la que la rigidez de la mezcla disminuye porque lo propio sucede con la consistencia del ligante asfáltico y es la fricción interna entre los agregados aquella que se opone a la deformación.

En consecuencia con lo anterior, las especificaciones técnicas de materiales para pavimentos han incluido entre sus exigencias de calidad una serie de parámetros como la forma, textura y granulometría de los agregados, así como procedimientos de diseño de mezcla para determinar el volumen de asfalto y agregados óptimos: el adecuado para garantizar durabilidad y evitar la probabilidad de deformaciones permanentes (ahuellamiento).

El principal objetivo de este estudio es comprobar experimentalmente la influencia que tiene la combinación de los agregados (empaquetamiento) sobre la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas, particularmente en condiciones de alta temperatura, ante las cuales es posible observar dicho fenómeno. La fórmula de trabajo se determina con el uso del método Marshall para diseño de mezclas, empleando asfalto de penetración 60-70. La proporción de cada agregado individual dentro de la mezcla de agregados combinados, se obtiene aplicando el método Bailey, en función del peso aparente suelto del agregado grueso, manteniendo el objetivo de lograr las proporciones volumétricas definidas en la especificación técnica de construcción del Instituto Nacional del Vías para este tipo de materiales. A fin de comprobar y analizar la relación entre ellas, se evalúa la resistencia a la deformación plástica en la pista de ensayo de laboratorio para cada una de las combinaciones de agregados previamente establecidas.

1.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL EXPERIMENTO

Cuando la excesiva deformación plástica longitudinal de la superficie del pavimento se encuentra limitada a las capas asfálticas, lo que sucede como consecuencia del desplazamiento relativo de los agregados bajo cargas repetidas, el deterioro es denominado ahuellamiento. Aunque no es exclusivo de los pavimentos en regiones de clima cálido ni sometidos a cargas de gran magnitud, sí es en esas condiciones donde el riesgo de ocurrencia es mayor y el deterioro se presenta con mayor frecuencia, dado que la consistencia de los cementos asfálticos es menor a alta temperatura y el grado de fricción entre partículas se torna preponderante para enfrentar los esfuerzos producidos por el tráfico.

Existe una serie de propiedades físicas de los agregados, entre ellas el tamaño y la granulometría, que tienen influencia sobre la resistencia al corte y por ende sobre la deformación plástica. La definición de la contribución de cada agregado individual dentro de las mezclas, es un propósito fundamental en la obtención de la fórmula de trabajo y su relación con el desempeño del material en campo. Comúnmente, la selección de la estructura del agregado es el resultado de la experiencia (NCHRP, 2011), pero también se utilizan criterios como la curva de máxima densidad, los puntos de control, la franja restringida, o simplemente las franjas granulométricas de las especificaciones de construcción. Sin embargo, existe un método basado en conceptos de trabazón y empaquetamiento que establece una relación entre la granulometría y los parámetros volumétricos, desarrollado por el Ingeniero estadounidense Robert Bailey.

Las especificaciones de construcción vigentes en el país (INVIAS, 2013) sugieren evaluar las mezclas asfálticas de gradación continua con los parámetros del método Bailey (TRB, 2002). No obstante, no existen investigaciones a nivel nacional que permitan comprobar si una granulometría ajustada con los parámetros Bailey garantiza el cumplimiento de los demás requisitos de diseño y desempeño en la mezcla, más aún, si se tiene en cuenta que dicha metodología es en realidad un procedimiento volumétrico para asegurar la correcta trabazón de agregados y el buen empaquetamiento, determinando así la resistencia a la deformación permanente (TRB, 2002). Ya que Bailey recomienda el rango 95–105 % del peso aparente suelto del agregado grueso para mezclas de tipo grueso, es de esperar que el límite superior resulte en una mayor resistencia a la deformación plástica, como resultado de una mayor interacción entre las partículas gruesas.

Se espera entonces comprobar la relación entre el grado de empaquetamiento de los agregados y la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas producidas en caliente, utilizando como herramienta el método Bailey para definir las fracciones de los agregados y el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica descrito en la norma I.N.V. E-756. En tal forma, se pretende brindar un aporte a la ingeniería vial nacional, con base en una verificación soportada en ensayos de laboratorio, que permita corroborar si granulometrías diseñadas por el método volumétrico de Bailey, que satisfacen también los rangos de los parámetros que para dicho método estableció el TRB (2002), cumplen con los criterios de granulometría para mezclas de gradación continua, diseño de la mezcla y comprobación del mismo, esto último particularmente en términos de deformación permanente.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general consiste en analizar, con base en ensayos de desempeño, la relación entre el grado de empaquetamiento de los agregados y la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas producidas en caliente.

Específicamente, los objetivos del proyecto, son:

- a. Comprobar, experimentalmente, el efecto del porcentaje de la masa unitaria suelta del agregado grueso, como medida del grado empaquetamiento de los agregados.
- b. Determinar cómo influye la masa unitaria suelta elegida (CUW) sobre las proporciones de gravas, arenas y sobre la superficie específica de los agregados combinados.
- c. Verificar la relación entre el grado de empaquetamiento, en función del CUW, y otros criterios para diseño de la gradación.
- d. Analizar la influencia de la granulometría diseñada con criterios de empaquetamiento sobre la composición volumétrica de las mezclas asfálticas.
- e. Analizar el efecto de la granulometría sobre los parámetros de diseño Marshall.
- f. Comprobar si, granulometrías que satisfacen los rangos de los parámetros Bailey, coinciden con las franjas granulométricas para mezclas de gradación continua incluidas en la especificación INVIAS.
- g. Comprobar si, granulometrías diseñadas por el método volumétrico de Bailey, garantizan el cumplimiento de los criterios de diseño y desempeño (deformación permanente) de la especificación de construcción colombiana.
- h. Analizar la relación entre el grado empaquetamiento, en función del CUW, y la deformación total de las mezclas asfálticas en el ensayo I.N.V. E-756.
- i. Analizar la relación entre el CUW y la velocidad de deformación en los intervalos de tiempo 30-45, 75-90 y 105-120 minutos del ensayo I.N.V. E-756.
- j. Analizar los posibles efectos del diseño de la granulometría bajo el criterio de empaquetamiento sobre las prácticas habituales de diseño de mezclas y producción de agregados.

1.3. ALCANCE

Las especificaciones de construcción colombianas (INVIAS, 2013) establecen que el diseño preliminar de las mezclas asfálticas de gradación continua debe ser efectuado de acuerdo con el

método Marshall; posteriormente, la fórmula de trabajo se debe someter a pruebas de verificación: adherencia, resistencia al ahuellamiento, módulo resiliente y resistencia a la fatiga. No obstante, el presente experimento se limita a la evaluación de la deformación permanente en las mezclas asfálticas propuestas.

1.4. ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El primer capítulo del documento contiene el marco referencial relacionado con los aspectos de la ingeniería de pavimentos que tienen que ver con el experimento: descripción de los componentes de una mezcla asfáltica, objetivos y criterios del diseño volumétrico de laboratorio, definición y metodología de evaluación de la resistencia a la deformación permanente y descripción de los parámetros del método Bailey para la determinación del empaquetamiento de los agregados. El siguiente capítulo se concentra en explicar la metodología prevista para la ejecución del experimento, a describir los materiales utilizados para el diseño de las mezclas de prueba y los procedimientos de ensayo seguidos para el cumplimiento de los objetivos. Posteriormente, en el tercer capítulo se presenta los resultados del diseño de las mezclas asfálticas de prueba, con el propósito de establecer las fórmulas de trabajo a someter al ensayo de deformación permanente y, por último, presentar y analizar los resultados del experimento.

2. LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una mezcla asfáltica se compone por una combinación de agregados, unidos entre sí por la pasta o mastic (combinación llenante–ligante). Típicamente, el agregado representa cerca del 95 % de la mezcla en peso y el asfalto el 5 % restante; en volumen, una mezcla típica es aproximadamente 85 % de agregado, 10 % de asfalto y 5 % de vacíos. El asfalto mantiene juntas las partículas de agregado; sin asfalto, la mezcla sería roca triturada o grava (NCHRP, 2011).

Entre las formas de clasificar los concretos asfálticos, la más general es en función de si se requiere calentamiento. Las mezclas asfálticas en caliente, tratadas a lo largo del presente documento, requieren mantenerse calientes durante la mezcla, transporte, colocación y compactación; una vez expuesto a temperatura ambiente, el asfalto se enfría y se hace más rígido y fuerte para soportar el tráfico pesado (NCHRP, 2011).

2.1. COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Los siguientes numerales se dedican a la descripción de los elementos constitutivos de una mezcla asfáltica y su influencia sobre el desempeño del material como parte de la estructura del pavimento.

2.1.1. Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico es el resultado del procesamiento del crudo de petróleo mediante la separación de fracciones destilables, donde el asfalto, por tener el más alto punto de ebullición, es el último de los componentes resultantes, motivo por el que se le conoce como subproducto de la industria. Posteriormente, el proceso se complementa con la desasfaltación (obtención de sustancias útiles como lubricantes) y la extracción de solventes en fracciones (asfaltenos, resinas y aceites) que, combinadas en determinadas proporciones, permiten obtener las características de calidad definidas en las especificaciones.

2.1.1.1. Propiedades

Entre los parámetros físicos del asfalto, se encuentran la consistencia, la durabilidad y la pureza, definida la primera como el grado de fluidez a determinada temperatura. Los métodos de medición de la consistencia del bitumen, son descritos a continuación (NCAT, 1996):

- **Viscosidad Absoluta**
Se entiende viscosidad como la resistencia de un fluido a desplazarse. A la temperatura máxima de servicio (60 °C), la viscosidad del asfalto es tal que se requiere aplicar vacío para producir flujo.
- **Viscosidad Cinemática**
Medida a temperatura similar a la de mezcla y compactación en laboratorio (135 °C), de modo que, el flujo se produce únicamente como resultado de las fuerzas gravitacionales.

- **Penetración**

Hasta la publicación del sistema Superpave, a la temperatura media de servicio (25 °C), no existía método para medir la consistencia en términos de viscosidad. En su lugar, se ha utilizado la profundidad de penetración sobre el asfalto (en décimas de milímetro, 1/10 mm) de una aguja de dimensiones y peso especificados durante 5 segundos.

- **Punto de Ablandamiento**

Temperatura de fluencia o a la cual el asfalto se comporta como un fluido. En laboratorio se establece la temperatura a la cual el asfalto no puede soportar el peso de una bola de acero de dimensiones especificadas y empieza a fluir.

- **Ductilidad**

Capacidad del asfalto a deformarse sin romperse. En el laboratorio, el ensayo de ductilidad mide la distancia, en centímetros, que se estira una briqueta de dimensiones especificadas antes de romperse, a temperatura media de servicio (25 °C) y a una velocidad de 5 cm/min.

- **Durabilidad**

Además de la consistencia, los cementos asfálticos son evaluados en términos de durabilidad. Para tal fin, se simula en laboratorio el envejecimiento primario, aquel que se presenta en la planta de producción, donde agregado y asfalto son mezclados en caliente. Durante el corto tiempo de mezcla, el bitumen en láminas delgadas se expone al aire a temperaturas de 135–165 °C, produciéndose cambios en la reología como disminución de la penetración e incremento en la viscosidad, tanto por oxidación como por pérdida de componentes volátiles. Los métodos de laboratorio desarrollados para someter el asfalto a un envejecimiento a corto plazo, son:

- *Horno de lámina delgada (Thin Film Oven Test, TFOT)*

Se introduce una capsula (diámetro 5.5 in, altura 3/8 in) con 50 gr de asfalto en un horno ventilado y mantenido a 163 °C de temperatura. La muestra rota durante 5 horas a una velocidad de 5–6 revoluciones por minuto (r.p.m.). La norma de ensayo es la I.N.V. E–721.

- *Horno giratorio de lámina delgada (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)*

Este ensayo alcanza el mismo grado de envejecimiento que el TFOT, pero solo en 75 minutos, siendo además posible acomodar un mayor número de muestras. La norma de ensayo es la I.N.V. E–720.

Al ligante asfáltico resultante de los ensayos de envejecimiento, se le conoce como residuo. Entre otros métodos, la magnitud del envejecimiento puede ser cuantificada en función de penetración o viscosidad, como sigue:

- *Porcentaje de penetración retenida*

Relación entre la penetración del residuo y la penetración del asfalto original, en porcentaje. Ya que el envejecimiento primario disminuye la penetración (asfalto más duro), la especificación INVIAS 450, establece un mínimo de 55, 50 y 46 % de

penetración retenida para asfaltos de penetración 40–50, 60–70 y 80–100, respectivamente.

- *Índice de envejecimiento*

Relación entre la viscosidad del residuo y la viscosidad del asfalto original. Teniendo en cuenta que el envejecimiento en planta incrementa la viscosidad, la especificación INVIAS 450–2013 establece un máximo índice de 4 para los tres tipos de asfaltos allí considerados.

2.1.1.2. Relación reología–desempeño en el cemento asfáltico

El comportamiento reológico del cemento asfáltico se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación en función del tiempo de aplicación de la carga y la temperatura. Uno de los parámetros utilizados para medir la rigidez del bitumen es el módulo o *Stiffness* (S). El asfalto ideal es aquel que, a alta temperatura, cuenta con una rigidez lo suficientemente alta para controlar el ahuellamiento y, a baja temperatura, tiene un módulo o rigidez lo suficientemente bajo para resistir el agrietamiento por contracción térmica. A alta temperatura, la resistencia al ahuellamiento puede incrementarse con una adecuada selección de agregados y diseño de mezcla, ya que en dichas condiciones la rigidez del ligante asfáltico es secundaria. Existen cinco deterioros del pavimento asfáltico relacionados con la reología del bitumen, ellos son:

- **Desintegración (*Raveling*)**
Desintegración progresiva desde la superficie, como resultado del desprendimiento de partículas. Excesivo envejecimiento produce fragilidad y falta de adherencia del asfalto con el agregado. También puede influir un deficiente contenido de asfalto en la mezcla, insuficientes finos para mantener unidos los gruesos y compactación insuficiente.
- **Agrietamiento por Fatiga (*Fatigue Cracking*)**
Cementos asfálticos excesivamente rígidos por envejecimiento pueden presentar un pobre desempeño a fatiga, entendida esta como el daño acumulado por la acción repetida de las cargas.
- **Agrietamiento Térmico (*Thermal Cracking*)**
Pavimentos sometidos a bajas temperaturas desarrollan esfuerzos de tensión en la superficie debido a la contracción, resultando en agrietamientos no asociados a la repetición de cargas. Cementos asfálticos de alta rigidez a baja temperatura son causantes de este tipo de agrietamiento.
- **Ahuellamiento (*Rutting*)**
Definido como el movimiento de las partículas bajo cargas repetidas. El ahuellamiento es un deterioro a corto plazo y se produce en dos fases: i) consolidación por pobre compactación durante la construcción, la cual es compensada por el tráfico y; ii) flujo plástico o deformación lateral permanente desde las huellas. La resistencia al ahuellamiento puede ser optimizada usando el tamaño de agregado adecuado, partículas gruesas y finas angulares y rugosas.

- **Daño inducido por humedad (*Stripping*)**

Debilitamiento o pérdida de la capacidad ligante, usualmente en presencia de humedad entre la superficie del agregado y el asfalto. La resistencia de la mezcla asfáltica se debe a la cohesión del conjunto llenante–ligante (pasta o mastic), la trabazón y fricción entre partículas; si la liga bitumen–agregado es pobre, se produce falla en la interface y daño prematuro de la mezcla.

2.1.1.3. Sistemas de clasificación de ligantes asfálticos

Para comparar diferentes asfaltos, es necesario evaluarlos a la misma temperatura y esfuerzo de corte. Con dicho propósito, existen sistemas de clasificación en función de la consistencia, cada uno de ellos descrito enseguida, junto con sus ventajas y desventajas:

Tabla 1. Comparación entre métodos de clasificación de asfaltos

Método de Clasificación	Significado	Ventajas	Desventajas
Penetración	<ul style="list-style-type: none"> - Basado en la penetración a temperatura media de servicio (25 °C). - A mayor penetración, más blando el asfalto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consistencia a temperatura media de servicio. - A temperaturas medias de servicio, la penetración es más representativa que la viscosidad. - Corto tiempo de ensayos. - Bajo costo de equipos. - Posibilidad de evaluar susceptibilidad a diferentes temperaturas. - También se evalúa penetración retenida y ductilidad después del ensayo RTFOT. 	<ul style="list-style-type: none"> - La penetración es un ensayo empírico, que no mide propiedades fundamentales como la viscosidad. - Alto esfuerzo de corte durante el ensayo. - Las comparaciones a altas o bajas temperaturas pueden ser engañosas. - No se establece viscosidad para mezcla y compactación.
Viscosidad del asfalto original	<ul style="list-style-type: none"> - Basado en la viscosidad absoluta del asfalto original a temperatura alta de servicio (60 °C). - A menor número de Poises, menor viscosidad del asfalto original. 	<ul style="list-style-type: none"> - La viscosidad es un parámetro fundamental. - Adecuado para amplios rangos climáticos. - Basado en temperatura crítica para el desempeño (60 °C). - Existe variedad de equipos para medir viscosidad. - Es posible evaluar susceptibilidad con tres temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comparación engañosa a bajas temperaturas. - No es adecuado para controlar agrietamiento a baja temperatura. - Mayor costo frente al ensayo de penetración. - Mayor tiempo de ensayos. - La viscosidad del residuo puede variar considerablemente.
Viscosidad del residuo (después del ensayo RTFOT)	<ul style="list-style-type: none"> - Basado en la viscosidad absoluta del residuo a temperatura alta de servicio (60 °C). - A menor número de Poises, menor viscosidad del residuo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Representa propiedades después de la fabricación de la mezcla. - Se espera un comportamiento similar durante extendido y compactación entre asfaltos de diferente procedencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rangos altamente dependientes de la región. - Mayor requerimiento de equipos. - Mayor tiempo de ensayos, ya que se requiere obtener el residuo.

Nota Fuente: Adaptado de NCAT (1996)

1 Poise= 1 gr/(cm.seg)

Las desventajas comentadas sobre los métodos de clasificación de asfaltos por penetración y viscosidad, se resumen en que (NCAT, 1996): i) no existe relación directa con el desempeño, en términos de agrietamiento por fatiga, agrietamiento térmico o ahuellamiento; ii) ensayos a temperatura estándar (25, 60 o 135 °C) no son representativos de las condiciones de clima de determinada región, donde el rango de temperatura es particular y; iii) tampoco se evalúa el envejecimiento a largo plazo en servicio.

Con lo anterior como premisa, los Estados Unidos lanzaron en 1987 el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (Strategic Highway Research Program, SHRP), con el objetivo de desarrollar especificaciones para cementos asfálticos y mezclas asfálticas basadas en ensayos de desempeño, lo que se denominó como Pavimentos Asfálticos de Desempeño Superior (Superior Performing Asphalt Pavements, Superpave). A diferencia de los sistemas por penetración y viscosidad, Superpave requiere simular tres estados del asfalto: i) original, transportado y almacenado antes de la mezcla; ii) envejecimiento a corto plazo por efecto de la producción y; iii) envejecimiento a largo plazo en servicio (NCAT, 1996). Los criterios de la especificación para controlar ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico (alta, media y baja temperatura) se mantienen constantes para todos los grados de desempeño (Performance Grade, PG), pero la temperatura a la cual deben lograrse varía de grado a grado dependiendo del clima que va a enfrentar el bitumen.

Teniendo en cuenta que el asfalto utilizado para el presente experimento fue clasificado por penetración, en consonancia con la especificación de construcción vigente, no se considera necesario ahondar más en el sistema Superpave dentro del presente marco teórico.

2.1.2. Propiedades de los Agregados Minerales

Los agregados utilizados en mezclas asfálticas requieren cumplir una serie de requerimientos de dureza, durabilidad, resistencia, gradación, tamaño, forma y limpieza.

2.1.2.1. Dureza

Mediante la fricción interna, los agregados deben transmitir las cargas a las capas subyacentes y resistir la abrasión o pulimento ocasionados por el tráfico. Deben ser lo suficientemente duros y resistentes para soportar los procesos de trituración, almacenamiento, producción, transporte y compactación.

Uno de los métodos de laboratorio para evaluar la dureza o resistencia a la abrasión es el ensayo de la máquina de Los Ángeles (I.N.V. E-218 e I.N.V. E-219). En términos generales, el ensayo consiste en determinar el porcentaje de tamaños menores que 1.7 mm (tamiz # 12) después de aplicar 500 revoluciones a una mezcla de agregado con esferas de acero de dimensiones especificadas.

Otro método de ensayo para evaluar la resistencia a la degradación por abrasión (dureza) es el aparato Micro-Deval (I.N.V. E-238), el cual, permite establecer el porcentaje de partículas

menores que 1.18 mm (tamiz # 16) después de la acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua, a 100 rpm durante 2 horas.

Por otra parte, el valor del 10% de finos (I.N.V. E-224), evalúa la resistencia al aplastamiento cuando el agregado grueso es sometido a un esfuerzo de compresión, determinando la carga necesaria para producir 10 % de material de tamaño menor que 2.36 mm (pasa tamiz # 8).

2.1.2.2. Durabilidad

Los agregados deben resistir el rompimiento o desintegración bajo acción de humedecimiento y secado. La durabilidad se determina en función de la resistencia a la pérdida en sulfatos o ensayo de durabilidad (I.N.V. E-220), el cual consiste en sumergir cierta cantidad de agregado en una solución de sulfato de sodio o magnesio que produce el crecimiento de cristales de sal en los poros, los cuales a su vez desintegran las partículas. Se establece el porcentaje de pérdida en peso después de 5 ciclos (inmersión y secado a 110 ± 5 °C).

2.1.2.3. Forma y textura superficial de las partículas

En cuanto a la forma, es deseable que las partículas sean cúbicas, no planas ni alargadas. Partículas angulares resultan en mayor estabilidad mecánica que las redondeadas; aunque estas últimas se acomodan mejor unas con otras, bajo acción del tráfico pueden densificarse y resultar en ahuellamiento por bajo porcentaje de vacíos y flujo plástico.

Sobre la textura superficial, partículas rugosas forman estructuras más fuertes que las lisas. Las primeras requieren mayor contenido de asfalto para mejorar la trabajabilidad, dado que producen mayores espacios vacíos para la acomodación del bitumen.

Los ensayos de laboratorio utilizados para determinar la forma y textura de las partículas, se encuentran en las normas I.N.V. E-227 e I.N.V. E-240: porcentaje de partículas fracturadas y proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.

2.1.2.4. Limpieza y partículas deletéreas

Se busca materiales ausentes de vegetación, arcillas activas o polvo de trituración. La presencia de dichas partículas sobre los agregados gruesos puede impedir la adhesión de los agregados con el asfalto, resultar en ingreso de agua en la película de asfalto y desprendimiento de partículas. La especificación colombiana controla la limpieza de los agregados mediante los ensayos de limpieza superficial (I.N.V. E-237), el equivalente de arena (I.N.V. E-133) y el índice de plasticidad (I.N.V. E-126).

2.1.2.5. Tamaño y gradación

La gradación o granulometría del agregado corresponde a la distribución de los tamaños de las partículas expresados como porcentaje del peso total. Se determina pasando el material por una serie de tamices (mallas) graduados con aberturas cada vez menores y pesando el material

retenido en cada uno de ellos; se expresa entonces como el porcentaje total que pasa una serie de aberturas o tamaños de tamices.

La gradación de un agregado se representa también como una curva cuyas ordenadas, en escala aritmética, corresponden al porcentaje total en peso que pasa un tamiz dado; mientras que las abscisas corresponden al tamaño de las partículas, en escala logarítmica. Según la especificación colombiana (INVIAS, 2013), la granulometría de las mezclas asfálticas de gradación continua, obtenida mediante combinación de distintas fracciones (materiales de diversa fuente o procedencia), deberá estar dentro de los rangos incluidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Franjas granulométricas para mezclas de gradación continua

Mezcla	Tamiz (mm/ U.S. Estándar)								
	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
MDC-25	100	80–95	67–85	60–77	43–59	29–45	14–25	8–17	4–8
MDC-19		100	80–95	70–88	49–65	29–45	14–25	8–17	4–8
MSC-25	100	80–95	65–80	55–70	40–55	24–38	9–20	6–12	3–7
MSC-19		100	80–95	65–80	40–55	24–38	9–20	6–12	3–7

La distribución de tamaños (granulometría o gradación) es la propiedad de los agregados que mayor importancia tiene, dado que afecta todas las características de la mezcla asfáltica: rigidez, estabilidad, durabilidad, permeabilidad, trabajabilidad, resistencia a la fatiga, fricción interna, resistencia al daño por humedad. Teóricamente, la mejor gradación es aquella que proporciona mayor densidad. No obstante, esto no es conveniente, ya que es necesario contar con vacíos suficientes para evitar la exudación del asfalto y/o el ahuellamiento. También es necesario garantizar un espesor promedio de la película de asfalto para máxima durabilidad de la mezcla. La gradación más densa posible, llamada curva de máxima densidad de Fuller, puede ser calculada en forma aproximada usando la siguiente fórmula (NCHRP, 2011):

$$\%PMD = \left(\frac{d}{D}\right)^{0.45} * 100\%$$

Donde %PMD es el porcentaje que pasa la gradación de máxima densidad, d es el tamaño del agregado en cuestión (mm) y D la malla de mayor tamaño (mm).

Otro método para definir la gradación de una mezcla asfáltica es la curva de máxima densidad a la potencia 0.45 (FHWA, 1960), que consiste en trazar una diagonal desde cero hasta el tamaño máximo del agregado, con los tamaños en el eje horizontal en milímetros y elevados a la 0.45.

Es necesario desviar la granulometría de la curva de máxima densidad para incrementar los vacíos en los agregados minerales (volumen de aire más volumen de asfalto efectivo), ya que se requiere un mínimo para obtener suficiente bitumen y lograr una mezcla durable.

De otro lado, el método Superpave (SHRP, 1987), estableció dos parámetros a tener en cuenta para la definición de la granulometría de los agregados: i) Puntos de control: dentro de cuyos límites debe pasar la gradación combinada y; ii) Franja restringida: como una guía para asegurar que no se utilice arena natural en exceso y lograr los vacíos en los agregados minerales

requeridos. Para los tamaños máximos (MS) de 25 y 19 mm, máximos nominales (NMA) de 19 y 12.5 mm, respectivamente, los puntos de control y la zona restringida corresponden a los incluidos en la Tabla 2 (NCAT, 1996).

Tabla 3. Puntos de control y zona restringida – Mezclas 25 y 19 mm

Tamaño		MS=25 mm, NMA= 19 mm				MS=19 mm, NMA= 12.5 mm			
		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida	
(mm)	(U.S.)	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
25	1 ”	100							
19	3/4 ”	90	100			100			
12.5	1/2 ”		90			90	100		
9.5	3/8”						90		
4.75	No. 4								
2.36	No. 8	23	49	34.6	34.6	28	58	39.1	39.1
1.18	No. 16			22.3	28.3			25.6	31.6
0.6	No. 30			16.7	20.7			19.1	23.1
0.3	No. 50			13.7	13.7			15.5	15.5
0.15	No. 100								
0.075	No. 200	2	8			2	10		

Es posible que gradaciones que pasen a través de la franja restringida y no incluyan excesiva cantidad de arena natural alcancen los vacíos en los agregados minerales requeridos y se desempeñen satisfactoriamente (NCAT, 1996), por esa razón versiones más recientes de Superpave no incluyen dicho parámetro (NCHRP, 2011).

Otras definiciones de importancia con respecto al tamaño de los agregados, son: el tamaño máximo (*Maximum Size*, MS) y el tamaño máximo nominal (*Nominal Maximum Aggregate Size*, NMA). El primero corresponde al tamiz o malla más pequeña por la cual pasa el 100 % del agregado; el segundo a la malla más grande que retiene algunas partículas, no más del 10 %.

2.1.3. Pasta o Mastic (Combinación Llenante–Ligante)

El llenante mineral es agregado de tamaño menor que 0.075 mm (pasa tamiz # 200), porción del material que ayuda a llenar los vacíos entre las partículas de agregado grueso. Dicho llenante puede provenir de los procesos de trituración y clasificación o puede ser de aporte como producto comercial, generalmente cal hidratada o cemento hidráulico (INVIAS, 2013).

La combinación de llenante mineral y bitumen forma una pasta que, en altas proporciones, puede mejorar la resistencia a la deformación y la durabilidad de las mezclas, pero en exceso puede producir mezclas rígidas y propensas al agrietamiento.

2.2. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El diseño de una mezcla asfáltica es un proceso volumétrico cuyo objetivo es determinar el volumen de asfalto (bitumen) requerido para lograr las propiedades deseadas: el adecuado para garantizar durabilidad y evitar probabilidad de deformación permanente (ahuellamiento). Sumado a ello, métodos más recientes (SHRP, 1993) concluyeron que el diseño debe involucrar

tanto parámetros volumétricos como ensayos de desempeño soportados en modelos para juzgar la calidad de una mezcla sobre la base de la predicción de su comportamiento a largo plazo en servicio (NCHRP, 2011).

2.2.1. Objetivos del Diseño de Mezclas Asfálticas

Los objetivos específicos de un diseño de mezcla asfáltica, son descritos a continuación:

2.2.1.1. Resistencia a la deformación permanente

Los agregados de una mezcla asfáltica no deben desacomodarse por efecto del tráfico. La deformación permanente es crítica a altas temperaturas, donde la viscosidad del bitumen es baja y el agregado enfrenta por sí solo las cargas. El ahuellamiento o deformación plástica puede ser controlado con adecuados agregados y ligante y apropiados contenidos de bitumen y vacíos.

2.2.1.2. Resistencia a la fatiga

Durante un lapso de tiempo, relacionado con el periodo de diseño estructural del pavimento, el concreto asfáltico no debe agrietarse al ser sometido al tráfico.

2.2.1.3. Durabilidad

La mezcla debe contener suficiente asfalto para asegurar una adecuada película sobre las partículas de agregado, minimizando el envejecimiento durante la producción y en servicio. Un alto contenido de vacíos en la mezcla compactada resulta en alta permeabilidad y envejecimiento prematuro.

2.2.1.4. Resistencia al daño por humedad

Algunas mezclas pierden adhesión o adherencia cuando se someten a la humedad. Las propiedades del agregado son responsables del fenómeno. Si existe propensión al *stripping*, es necesario incorporar aditivos mejoradores de adherencia; disminuir la permeabilidad también puede ser una medida efectiva, cuidando que los vacíos no sean tan bajos que impidan la acomodación del asfalto y resulten en exudación o ahuellamiento.

2.2.1.5. Resistencia al deslizamiento

Esta es una característica importante en capas de rodadura. El agregado y sus características de forma, textura, tamaño, granulometría y resistencia al pulimento son responsables de dicha propiedad.

2.2.1.6. Trabajabilidad

Se trata de lograr una mezcla cuya densificación en campo se alcance con energía de compactación razonable.

2.2.1.7. Espesor de la película de asfalto

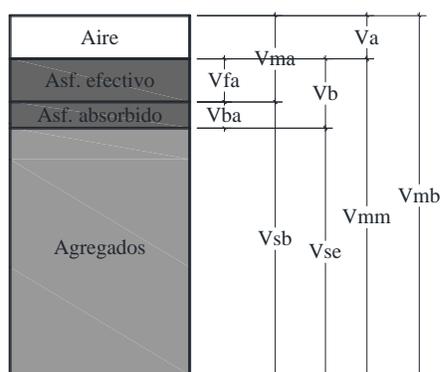
De otro lado, el diseño de mezcla debe garantizar un espesor de la película de asfalto que provea un recubrimiento adecuado de las partículas. Aunque dicho espesor no es un parámetro directo de diseño, se encuentra estrechamente relacionado con la durabilidad; si los agregados son susceptibles al daño por humedad, delgadas películas de asfalto permiten más fácilmente el ingreso de agua que las gruesas.

2.2.2. Criterios del Método Marshall para Diseño de Mezclas

Como se mencionó, el diseño de una mezcla es un proceso volumétrico que, en particular, pretende controlar una serie de parámetros volumétricos, cada uno de ellos descrito en la Tabla 4 e ilustrados en la Figura 1 (IMT, 2004):

Tabla 4. Parámetros volumétricos objetivo del diseño de mezclas

Parámetro	Definición	Cálculo
Vacíos en los agregados minerales (VMA)	- Espacio entre partículas de agregado de una mezcla compactada. - Incluye volumen de aire y del asfalto no absorbido (Va+Vbe).	$VMA = \frac{Va + Vbe}{V_T}$
Vacíos totales (VTM)	- Volumen de espacios con aire entre partículas de agregado cubierto con asfalto en una mezcla compactada.	$VTM = \frac{Va}{V_T}$
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	- Porcentaje de los vacíos en los agregados minerales (VMA) que se encuentran llenos de asfalto.	$VFA = \frac{Vbe}{Va + Vbe}$



V_{ma}: volumen de vacíos en los agregados minerales
 V_{mb}: volumen total de la mezcla
 V_{mm}: volumen de la mezcla sin vacíos
 V_{fa}: volumen de vacíos llenos de asfalto
 V_a: volumen de vacíos con aire
 V_b: volumen de asfalto
 V_{ba}: volumen de asfalto absorbido
 V_{sb}: volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)
 V_{se}: volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

Figura 1. Esquema de los parámetros volumétricos de la mezcla

El procedimiento de ensayo para la determinación de la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleado el aparato Marshall, se encuentra en la norma I.N.V. E-748. Aunque no se considera necesario describir el procedimiento, se procede sí con la definición de los criterios del método.

2.2.2.1. Vacíos en los agregados minerales

Como se mencionó, el volumen de vacíos en los agregados minerales incluye los vacíos llenos de asfalto y los vacíos con aire, disponibles para la expansión del asfalto a alta temperatura. El

volumen de asfalto y la gradación son responsables del espesor promedio de la película de asfalto. Sin una película suficiente, la humedad puede penetrar más fácil, el cemento asfáltico oxidarse, y afectarse la resistencia a la tensión de la mezcla.

2.2.2.2. Vacíos totales en la mezcla

La mezcla asfáltica requiere alta resistencia al corte para transmitir las cargas y prevenir compactación adicional en servicio, ahuellamiento y exudación. Adicionalmente, se requiere una superficie tan impermeable como sea posible ante el aire y el agua. Un contenido de vacíos entre 3 y 5 % no permite interconexión entre vacíos sino vacíos aislados alrededor de la masa agregado-asfalto. Como resultado, un bajo contenido de vacíos minimiza el envejecimiento del asfalto, impide el ingreso de agua y el desprendimiento de la película de asfalto (*stripping*).

2.2.2.3. Densidad

La densidad puede ser alcanzada incrementando adecuadamente la compactación, el contenido de bitumen, el llenante mineral o cualquier otro método que disminuya los vacíos. Sin embargo, entre las opciones posibles, es mejor enfocarse en una compactación satisfactoria que en modificar la composición volumétrica de la mezcla, ya que un bajo contenido de vacíos o elevado de asfalto pueden resultar en exudación o ahuellamiento.

Importante es mencionar la influencia de la compactación sobre el desempeño en campo. Un alto nivel de tráfico producirá alta densidad, bajo contenido de vacíos e inestabilidad de la mezcla; un nivel de tráfico bajo resulta en menor densidad, alto contenido de vacíos, insuficiente película de asfalto y baja durabilidad. La mezcla en laboratorio requiere ser compactada a la misma densidad (contenido de vacíos) a la cual el tráfico la compactará en condiciones de servicio.

2.2.2.4. Estabilidad

La estabilidad es la máxima carga soportada en el ensayo Marshall por un espécimen a 60 °C y a una velocidad de 2 pulgadas por minuto (in/min). Es una medida de la resistencia a la deformación de la masa agregado-asfalto y se ve influenciada significativamente por el ángulo de fricción interna del agregado, incluido el llenante, y la viscosidad del asfalto a 60 °C.

La estabilidad puede ser incrementada utilizando agregados angulares o utilizando un asfalto de mayor viscosidad. Aunque también es posible incrementar el polvo o llenante (porcentaje de partículas menores que 0.075 mm, tamiz #200), el consecuente aumento en la superficie específica, puede aumentar el contenido de asfalto.

2.2.2.5. Flujo

El flujo es la deformación vertical de la muestra ensayada a compresión diametral en el ensayo Marshall, medida desde el inicio de aplicación de la carga hasta que la carga (estabilidad) empieza a disminuir. Valores altos de flujo indican un comportamiento plástico en la mezcla que puede resultar en deformación permanente; por el contrario, flujos bajos pueden representar una

mezcla con insuficiente asfalto para controlar durabilidad, envejecimiento prematuro y menor resistencia a la fatiga por alta rigidez. Ver Figura 2 (NCAT, 1996).

2.2.2.6. Criterios de diseño establecidos en la especificación

El cuadro siguiente relaciona los criterios de diseño de la mezcla por el método Marshall (INVIAS, 2013).

Tabla 5. Criterios de diseño de mezclas asfálticas de gradación continua

Característica	Unidad/ Rango	Nivel de Tráfico		
		NT1	NT2	NT3
Estabilidad	N, mín..	5,000	7,500	9,000
Flujo	mm, mín..	2-4	2-4	2-3.5
Relación estabilidad/flujo	kN/mm	2-4	3-5	3-6
Vacíos con aire	Rodadura	%	3-5	
	Intermedia	%	4-8	
	Base	%	-	5-8
Vacíos en los agregados minerales	T. máx. 25 mm	%, mín.	14	
	T. máx. 19 mm	%, mín.	15	
	T. máx. 10 mm	%, mín.	16	
Vacíos llenos de asfalto	%	65-80	65-78	65-75
Relación llenante/ligante (peso)	-	0.8-1.2		
Contenido de asfalto	%	-		

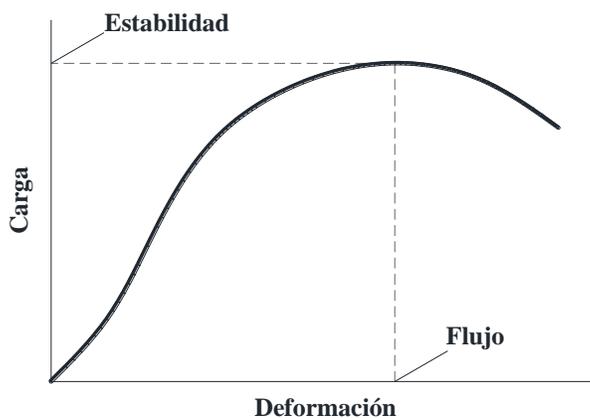


Figura 2. Grafica carga-deformación (estabilidad-flujo) en el ensayo Marshall

2.3. DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Como se mencionó, la consistencia del cemento asfáltico tiene una parte viscosa y otra elástica a alta temperatura. La deformación permanente es el resultado de la acumulación de pequeñas deformaciones plásticas sucedidas cada vez que se aplica una carga y se observa como una depresión de superficie del pavimento acompañada de un abultamiento lateral, particularmente en las franjas de los carriles que atienden el paso de las ruedas de los camiones.

Entre otros factores que influyen sobre la resistencia a la deformación permanente del concreto asfáltico, se encuentran la rigidez del cemento asfáltico, el tipo bitumen, la forma y tamaño de las partículas y la composición volumétrica (Monismith, 1994). Sobre cada uno de ellos:

- a. La rigidez de un cemento asfáltico incide directamente sobre la resistencia a la deformación permanente. En virtud de ello, para mejorar la resistencia al ahuellamiento, es necesario utilizar asfaltos de mayor viscosidad.
- b. Altos contenidos de asfalto impiden la óptima fricción entre partículas del agregado, disminuyendo la resistencia a las deformaciones del material.
- c. Altos contenidos de vacíos con aire representan una compactación insuficiente, de modo que, con la aplicación de las cargas del tráfico, se produce una nueva acomodación relativa entre partículas que a su vez resulta en deformación vertical y desplazamiento lateral del concreto asfáltico.
- d. La forma y textura de los agregados también inciden sobre la resistencia al ahuellamiento. Agregados angulares y ásperos resultan en estructuras más estables y con mejor fricción interna.
- e. La distribución de agregados de diferente tamaño y el grado de interacción entre ellos tienen relación directa con las deformaciones no recuperables. Esta variable es la analizada para el presente estudio.

En cuanto a la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas, otras fuentes (NCHRP, 2011) mencionan:

- f. La resistencia al ahuellamiento tiende a mejorar con la disminución en los vacíos en los agregados minerales, estos últimos relacionados con el volumen de aire en la mezcla, componentes que se deforman ante la acción de las cargas.
- g. Dicha resistencia mejora con el incremento en los tamaños máximo y máximo nominal del agregado combinado.
- h. La angularidad del agregado fino y el contenido de llenante mineral son características importantes para la resistencia a la deformación plástica, aunque un exceso de llenante puede producir una mezcla rígida y difícil de compactar.

2.3.1. Método de Ensayo para Determinar la Deformación Permanente

En Colombia, la norma de ensayo para determinar la resistencia a la deformación permanente en mezclas asfáltica es la I.N.V. E-756. En términos generales, el ensayo consiste en aplicar una presión de $900 \pm 25 \text{ kN/m}^2$ a una frecuencia de 42 pasadas/minuto, con una rueda metálica de 20 cm de diámetro provista de una banda de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor, sobre una probeta de 30, 30 y 5 cm de largo, ancho y alto, respectivamente. Se registra las deformaciones a los minutos 1, 3 y 5 de iniciado el ensayo, cada 5 minutos hasta el minuto 45 y cada 15 minutos

hasta completar 120 minutos de ensayo. En función de las deformaciones medidas, se calcula la velocidad de deformación en el intervalo de tiempo determinado, como sigue:

$$V_{t_2-t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1}$$

Donde:

$V_{t_2-t_1}$: velocidad de deformación media en el intervalo t_2-t_1 , en $\mu\text{m}/\text{min}$.

d_{t_2} y d_{t_1} : deformaciones correspondientes a t_2 y t_1 , μm .

t_2 y t_1 : tiempos que dependen de la especificación, min.

La norma de ensayo establece reportar la curva de deformación (Figura 3) y las velocidades en los intervalos 30–45 ($V_{30/45}$), 75–90 ($V_{75/90}$) y 105–120 ($V_{105/120}$) minutos.

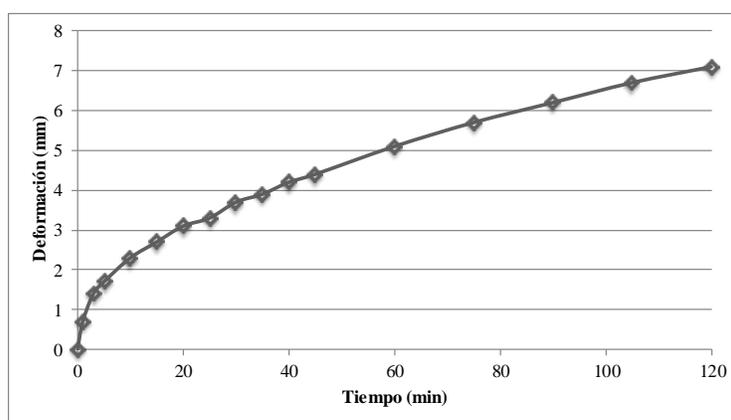


Figura 3. Ejemplo de curva deformación–tiempo

Para efectos de verificación del diseño de la mezcla asfáltica, la Especificación INVIAS 450–2013 establece como parámetro de aceptación una velocidad máxima de deformación, en el intervalo 105–120 min., de 15 o 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ para temperaturas medias ponderadas del aire $> 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\leq 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

2.4. MÉTODO BAILEY PARA DEFINICIÓN DEL EMPAQUETAMIENTO

Para establecer una relación entre la composición granulométrica y los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, el Ingeniero estadounidense Robert Bailey desarrolló un método para prevenir el ahuellamiento sin sacrificar la durabilidad de las mezclas, basado en conceptos de trabazón y empaquetamiento (TRB, 2002). Este método es utilizado para definir el esqueleto mineral que proporcione un buen rozamiento interno, que asegure una buena resistencia a las deformaciones plásticas, y un contenido de vacíos en los agregados minerales adecuado para obtener una buena durabilidad.

2.4.1. Principios del Método

El principio del método es el empaquetamiento de los agregados, el cual no es total por efecto de la compactación, siempre existen vacíos entre las partículas. El empaquetamiento depende del

tipo y energía de compactación, la forma y textura de las partículas, la resistencia a la abrasión, el tamaño y la granulometría, esta última de vital importancia.

El método divide la granulometría en cinco partes, donde los gruesos (*Coarse Aggregate*, CA) tienen una parte gruesa y una fina, los finos (*Fine Aggregate*, FA) tienen también una parte gruesa y otra fina y estos últimos (finos finos) tienen a su vez parte fina y gruesa. Una ilustración de ello se incluye enseguida (TRB, 2002):

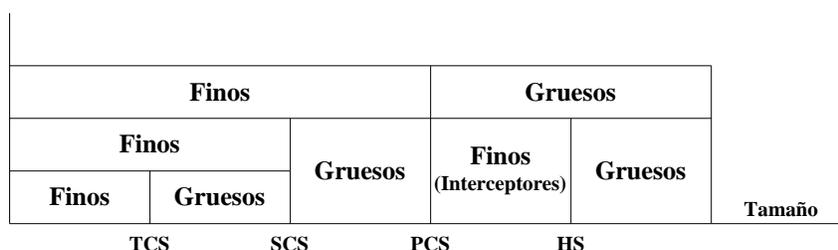


Figura 4. Esquema de las divisiones del método Bailey

El principio consiste en que los gruesos generan espacios vacíos entre partículas, los cuales deben ser ocupados por los finos. Para definir la frontera entre finos y gruesos, se establecen tamices de control, cada uno de ellos definido de la siguiente manera (TRB, 2002):

Tabla 6. Definición de los tamices de control del método Bailey

Tamiz	Denominación	Significado	Cálculo
Promedio	HS (<i>Half sieve</i>)	Establece la frontera entre gruesos gruesos y gruesos finos. Se calcula como la mitad del tamaño máximo nominal.	$HS = 0.5 * NMAS$
De control primario	PCS (<i>Primary control sieve</i>)	Define la frontera entre la parte gruesa y la fina. Aunque en la práctica común es el tamiz # 4 (4.75 mm) aquel que separa dichas fracciones, en el método Bailey el PCS es función del NMAS.	$PCS = 0.22 * NMAS$
De control secundario	SCS (<i>Secondary control sieve</i>)	Separa los finos gruesos de los finos finos.	$SCS = 0.22 * PCS$
De control terciario	TCS (<i>Tertiary control sieve</i>)	Frontera entre las dos porciones de los finos finos.	$TCS = 0.22 * SCS$

La constante de 0.22 fue determinada a partir de un análisis bi y tri-dimensional del empaquetamiento de partículas de diferentes formas (TRB, 2002).

En función del tamaño máximo nominal del agregado (NMAS), los tamices medio (HS), de control primario (PCS), secundario (SCS) y terciario (TCS), son seleccionados de acuerdo con los criterios de la Tabla 8.

Tabla 7. Tamices de control en función del tamaño máximo nominal (NMAS)

NMAS	37.5	25.4	19	12.5	9.5	4.75
HS	19	12.5	9.5	6.25	4.75	2.36
PCS	9.5	4.75	4.75	2.36	2.36	1.18
SCS	2.36	1.18	1.18	0.6	0.6	0.3
TCS	0.6	0.3	0.3	0.15	0.15	0.075

Por otra parte, la dosificación de la granulometría busca determinar los vacíos creados por el agregado grueso para poder llenarlos con el agregado fino. Con tal propósito, se emplea el método de ensayo descrito en la norma I.N.V. E-217: Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto.

- **Densidad aparente compactada (*Rodded Unit Weight, RUW*)**
Cantidad de agregado que llena una unidad de volumen después de aplicar determinada energía de compactación.
- **Densidad aparente sin compactar (*Loose Unit Weight, LUW*)**
Cantidad de agregado que llena una unidad de volumen cuando las partículas se ponen en contacto sin que se aplique ninguna compactación.

Con base en los resultados del ensayo, se selecciona el grado de contacto entre los gruesos en la mezcla, como un porcentaje de la densidad aparente suelta, parámetro denominado peso unitario elegido (*Chosen Unit Weight, CUW*). Mayor CUW implica mayor contacto entre partículas, más resistencia a la compresión y al ahuellamiento, mayor contenido de vacíos en los agregados minerales (vacíos más asfalto efectivo, VMA) y, en lo constructivo, mayor dificultad para compactar. Menor CUW implica mayor espacio para los finos, menor resistencia, menor VMA y mayor facilidad para compactar.

En función del peso unitario elegido (CUW), se define tres tipos de mezclas:

- **Mezclas finas**
No tienen agregado suficiente para formar un esqueleto mineral; su resistencia se debe fundamentalmente al fino. El volumen de agregado fino es mayor que el volumen de vacíos entre partículas gruesas.
- **Mezclas gruesas**
Tienen suficiente agregado grueso para que haya contacto entre ellos y se configure un esqueleto mineral y suficiente fino para acomodarse y densificar la mezcla asfáltica.
- **Mezclas SMA (*Stone Mastic Asphalt*)**
El volumen de finos es menor que el volumen de vacíos entre las partículas gruesas. El contacto entre gruesos es muy elevado y, por ende, la resistencia.

La Figura 5 (TRB, 2002) ilustra la condición suelta (sin compactar) y apisonada (con algún grado de compactación) en función de los rangos de CUW, y su influencia sobre el tipo de mezcla obtenida.

2.4.2. Propiedades de Empaquetamiento

Las propiedades de empaquetamiento, también conocidas como parámetros Bailey, hacen parte de los criterios de diseño preliminar de mezclas asfálticas (INVIAS, 2013). Dichos parámetros se encuentran definidos en la literatura (TRB, 2002) y son calculados en función del porcentaje de

2.4.3. Metodología de Cálculo

Como se ha comentado, el principio básico del método Bailey consiste en lograr una granulometría en la cual los espacios entre los gruesos–gruesos sean llenados por los gruesos–finos, que los vacíos entre gruesos sean ocupados por finos–gruesos y así sucesivamente. El procedimiento de cálculo de las proporciones de los agregados individuales en la gradación combinada es descrito a continuación (TRB, 2002):

- **Paso 1 – Peso unitario elegido del agregado i**

$$CUWi = LUWi * CUW / 100$$

- **Paso 2 – Contribución en peso del agregado grueso i**

$$CAiWc = CUWi * CAi / 100$$

- **Paso 3 – Vacíos en el agregado grueso i**

$$VCAi = CAi * (1 - (CUWi / (1000 * Gsbi)))$$

- **Paso 4 – Vacíos totales en el agregado grueso**

$$VCAt = \sum VCAi$$

- **Paso 5 – Contribución en peso del agregado fino i**

$$FAiWc = RUWi * (FAi / 100) * (VCAT / 100)$$

- **Paso 6 – Peso unitario total**

$$TUW = \sum CAiWc + \sum FAiWc$$

- **Paso 7 – Contribución inicial del agregado grueso i como porcentaje de la mezcla**

$$CAiBin = 100 * CAiWc / TUW$$

- **Paso 8 – Contribución inicial total del agregado grueso**

$$CAtBin = \sum CAiBin$$

- **Paso 9 – Contribución inicial del agregado fino i como porcentaje de la mezcla**

$$FAiBin = 100 * FAiWc / TUW$$

- **Paso 10 – Contribución inicial total del agregado fino**

$$F_{AtBin} = \sum F_{AiBin}$$

- **Paso 11 – Porcentaje de agregado fino en el agregado grueso i**

$$F_{AinCAi} = C_{AiBin} * P_{CSi} / 100$$

- **Paso 12 – Porcentaje total de agregado fino en el agregado grueso**

$$F_{AinCAt} = \sum F_{AinCAi}$$

- **Paso 13 – Porcentaje de agregado grueso en el agregado fino i**

$$C_{AinFAi} = F_{AiBin} * (100 - P_{CSi}) / 100$$

- **Paso 14 – Porcentaje total de agregado grueso en el agregado fino**

$$C_{AinFAt} = \sum C_{AinFAi}$$

- **Paso 15 – Contribución final del agregado grueso i como porcentaje de la mezcla**

$$C_{AiBf} = C_{AiBin} + F_{AinCAi} - (C_{AiBin} * C_{AinFAt} / C_{AtBin})$$

- **Paso 16 – Contribución ajustada del agregado fino i como porcentaje de la mezcla**

$$F_{AiBaj} = F_{AiBin} + C_{AinFAi} - (F_{AiBin} * F_{AinCAt} / F_{AtBin})$$

- **Paso 17 – Porcentaje de llenante mineral en el agregado grueso i**

$$M_{FinCAi} = C_{AiBf} * p_{200} / 100$$

- **Paso 18 – Porcentaje de llenante mineral en el agregado fino i**

$$M_{FinFAi} = F_{AiBaj} * p_{200} / 100$$

- **Paso 19 – Porcentaje total de llenante mineral**

$$M_{Ft} = \sum M_{FinCAi} + \sum M_{FinFAi}$$

- **Paso 20 – Contribución final del llenante mineral como porcentaje de la mezcla**

$$M_{FBf} = (Polvo - M_{Ft}) / (p_{200} MF / 100)$$

- **Paso 21 – Contribución final del agregado fino i como porcentaje de la mezcla**

$$F_{AiBf} = F_{AiBaj} - (F_{AiBaj} * M_{FBf} / \sum F_{AiBaj})$$

Las abreviaturas anteriores son definidas tal como sigue:

CAi : Agregado grueso i
FAi : Agregado fino i
MF : Llenante mineral
PCS : Porcentaje que pasa el tamiz de control primario
p200 : Porcentaje que pasa el tamiz de 0.075 mm
Gsbi : Gravedad específica Bulk del agregado i
LUWi : Peso unitario suelto del agregado i (kg/m³)
RUWi : Peso unitario apisonado del agregado i (kg/m³)
CUW : Peso unitario elegido
Polvo : Cantidad deseada de p200 en la gradación final
CAiWc : Peso contribuido por el agregado grueso i
FAiWc : Peso contribuido por el agregado fino i
VCA : Vacíos en el agregado grueso
TUW : Peso unitario total

3. METODOLOGÍA, MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

3.1. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para el cumplimiento de los objetivos, se resume enseguida:

Los agregados utilizados fueron suministrados por una planta ubicada en Villeta (Cundinamarca) que suministra mezcla asfáltica para diversos proyectos viales de la región. Con base en ensayos de caracterización de los agregados individuales que dicha planta utiliza para sus mezclas MDC-25 y MDC-19, actualizados para el desarrollo de este experimento, se procedió en oficina al diseño de las gradaciones combinadas aplicando el método volumétrico de Bailey, con el tamaño máximo (MS) y la masa unitaria elegida (CUW) como variables a estudiar y obteniendo así dos mezclas MS= 25 mm y dos MS= 19 mm, cada una con CUW de 95 y 105 % (cuatro en total). Con las gradaciones de prueba establecidas, se procedió al diseño Marshall de las cuatro mezclas, empleando para tal fin el asfalto de penetración 60-70. Buscando un experimento de laboratorio en condiciones similares, para las seis mezclas (cuatro de prueba más las dos de referencia) se estableció el óptimo de asfalto para el promedio de vacíos con aire de especificación (Va= 5 %). Muestras de los agregados individuales y del ligante asfáltico fueron enviadas a Manufacturas y Procesos Industriales (MPI) para ejecutar el ensayo de deformación permanente (I.N.V. E-756) sobre las seis fórmulas de trabajo.

Con la totalidad de los ensayos disponibles se procedió al análisis de la información, relacionando CUW y MS con las franjas granulométricas de especificación, la resistencia y flujo Marshall, los parámetros volumétricos, la velocidad de deformación y la deformación total del ensayo de ahuellamiento en pista.

La relación entre la metodología desarrollada y los objetivos propuestos, es descrita a continuación:

- Para comprobar el efecto del porcentaje de la masa unitaria suelta (CUW) como medida del empaquetamiento, se utilizan los extremos definidos por Bailey para mezclas gruesas (95 y 105 %).
- Se analiza el porcentaje de gravas y arenas y la superficie específica de las seis gradaciones (MDC-25 y MDC-19, de origen, y 25-105, 25-95, 19-105 y 19-95, de prueba), en función del empaquetamiento.
- Las seis gradaciones de prueba son analizadas con respecto a los criterios de puntos de control, franja restringida y línea de máxima densidad, comparando así el criterio de empaquetamiento con los métodos tradicionales para establecer la gradación.
- Para las seis granulometrías, se analiza los parámetros volumétricos con respecto al grado de empaquetamiento.
- También para las seis mezclas, se analiza la relación entre el empaquetamiento, la estabilidad y flujo Marshall.
- El diseño obedece tanto al procedimiento volumétrico Bailey como al valor medio de los parámetros del TRB; de modo que, al comparar las franjas INVIAS para MS 25 y 19 mm

con las cuatro gradaciones de prueba, es posible concluir si granulometrías que satisfacen criterios Bailey logran lo propio con respecto a la especificación colombiana.

- Los resultados del ensayo de ahuellamiento permiten concluir si las cuatro granulometrías, diseñadas por método Bailey, cumplen con el criterio de desempeño de la especificación INVIAS para deformación permanente.
- La comprobación de la relación entre el empaquetamiento y la deformación total es posible gracias al comparativo entre esta última y las combinaciones de MS y CUW. Lo propio sucede para la velocidad de deformación en diferentes intervalos de tiempo.

En forma esquemática, el programa experimental implementado, se encuentra en la Figura 6.



Figura 6. Programa experimental

3.2. MATERIALES

En el presente estudio, se utilizará cemento asfáltico convencional, de penetración 60/70 y agregados de una única fuente, de modo que, las variables a analizar se limitan a la distribución de los tamaños y, en consecuencia, a los parámetros volumétricos de la mezcla.

3.3. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

La normatividad técnica aplicable al proyecto, se encuentra en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia, 2013.

En particular, el artículo de la especificación INVIAS 2013 aplicable al proyecto, es el 450: Mezclas Asfálticas de Gradación Continua (Concreto Asfáltico). Los procedimientos de ensayo a utilizar en el desarrollo de la metodología, son:

Tabla 10. Relación de procedimientos de laboratorio a emplear en el proyecto

Actividad	Norma de Ensayo	Descripción
Gradación de los agregados individuales	I.N.V. E-123	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos
Gravedad específica de los agregados	I.N.V. E-222	- Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.
	I.N.V. E-223	- Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.
Densidad aparente de los agregados	I.N.V. E-217	- Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto
Gravedad específica de la mezcla	I.N.V. E-733	- Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.
	I.N.V. E-735	- Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas.
Diseño de mezcla	I.N.V. E-748	- Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleado el aparato Marshall.
Susceptibilidad al agua	I.N.V. E-725	- Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta.
Deformación permanente	I.N.V. E-756	- Procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. MATERIALES UTILIZADOS

Como se comentó, los materiales utilizados para el diseño de la granulometría y de las mezclas fueron tomados de una planta de producción instalada en el municipio de Villeta, Cundinamarca.

4.1.1. Asfalto

El asfalto utilizado en la planta de origen de los materiales es suministrado por Ecopetrol y cumple con los requisitos de calidad establecidos en la especificación (INVIAS, 2013) para asfaltos de penetración 60-70.

Tabla 11. Características del asfalto utilizado

Característica	Unidad	Norma Ensayo INVIAS	Especificación Asfalto 60-70		Asfalto utilizado (oct/2017)
			mín.	máx.	
<i>Asfalto original</i>					
Penetración (25°C, 100g, 5s)	0.1 mm	E-706	60	70	63
Punto de ablandamiento	°C	E-712	48	54	50.2
Índice de penetración	-	E-724	-1.2	+0.6	-0.6
Viscosidad absoluta (60°C)	P	E-716 o E-717	1,500	-	2,465 2,290
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	cm	E-702	100	-	> 130
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99.29
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	0
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709	230	-	296
<i>Asfalto residual (luego de la prueba en película delgada rotatoria INV E-720)</i>					
Pérdida de masa por calentamiento (163°C, 75min)	%	E-720	-	0.8	0.24
Penetración del residuo, en % de la penetración original	%	E-706	50	-	57.1
Incremento en el punto de ablandamiento	°C	E-712	-	9	6.2
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60 °C) del asfalto residual y del original	-	E-716 o E-717	-	4	3.5

En la producción de la planta, al cemento asfáltico de penetración 60-70 se le incorpora 0.1 % de aditivo para mejorar la adhesividad árido-ligante. En esa misma condición es utilizado para el experimento.

4.1.2. Agregados Individuales

La procedencia de cada uno de los agregados minerales utilizados es comentada enseguida:

- **Agregado grueso**

Agregado resultante de la trituración de grava extraída de la cantera Salitre Blanco (Cundinamarca) y del río Guayuriba (Meta).

- **Agregado fino**
Las dos arenas utilizadas provienen de la trituración de la grava extraída del río Guayuriba (Meta).
- **Llenante mineral**
Proveniente de procesos de trituración y clasificación de agregados pétreos, recuperado por el filtro de mangas de la planta.

La Tabla 12 contiene las características de calidad de los agregados utilizados para el desarrollo del presente proyecto y su comparativo con respecto a los requerimientos mínimos de especificación (INVIAS, 2013).

Tabla 12. Características de calidad de los agregados individuales

Característica		NT1	NT2	NT3	Grava 1"	Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena (1)	Arena (2)
Dureza - Agregado grueso									
Desgaste Los Ángeles (Seco, 500r)	% máx.	25	25	25	23				
Micro Deval	% máx.	-	25	20	19	12			
10% de Finos (Húmedo/seco)	%, mín.	-	-	75	93	85			
Durabilidad									
Pérdidas ensayo de solidez (MgSO ₄)	% máx.	18	18	18	4.3				
Limpieza - Agregado grueso									
Impurezas en agregado grueso	% máx.	0.5	0.5	0.5	0.29	0.36			
Limpieza - Gradación combinada									
Índice de plasticidad	% mín.	N.P.			N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
Equivalente de arena	% mín.	50	50	50			50	66	
Geometría - Agregado grueso									
Partículas fracturadas (5:1, 1 cara)	% mín.	75	75	85	93	95			
Partículas fracturadas (5:1, 2 caras)	% mín.	-	60	70	88	94			
Geometría - Agregado fino									
Angularidad agregado fino	% mín.	45	45	45				45	46
Adhesividad									
Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia de agua hirviendo		Reportar			8.1 (MDC-25), 7.1 (MDC-19)				

(1) Arena manufacturada; (2) arena de trituración.

En su condición de acopio o almacenamiento, los agregados individuales empleados tienen la distribución de tamaños de la Tabla 13. Dichos agregados cuentan con las características de gravedad específica, absorción y masas unitarias relacionadas en la Tabla 14.

Tabla 13. Granulometría de los agregados individuales originales

Tamaño		Porcentaje que pasa					
(mm)	(U.S.)	Grava 1"	Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arenas 1:1	Arena	Llenante
25	1 "	100					
19	3/4 "	75	100				
12.5	1/2 "	4.4	63	100			
9.5	3/8 "	1.4	27	86	100	100	
4.75	#4	0.70	1.4	14	87	93	

Tamaño		Porcentaje que pasa					
(mm)	(U.S.)	Grava 1"	Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arenas 1:1	Arena	Llenante
2.36	#8	0.64	0.62	1.8	67	78	
1.18	#16	0.55	0.44	1.0	52	63	
0.6	#30	0.47	0.39	0.76	35	45	
0.3	#50	0.39	0.34	0.66	21	21	
0.15	#100	0.29	0.30	0.56	13	8.3	100
0.075	#200	0.14	0.23	0.43	10	4.7	97

Tabla 14. Características de los agregados individuales originales

Agregado	Nombre	p200	Gsb	Gsa	% Abs.	LUW	RUW
CA1	Grava 1"	0.14	2.618	2.675	0.808	1404.1	1515.6
CA2	Grava 3/4"	0.23	2.599	2.670	1.023	1413.3	1514.6
CA3	Grava 1/2"	0.43	2.593	2.689	1.376	1374.9	1496.8
FA1	Arenas 1:1	9.54	2.594	2.684	1.286	1679.3	1853.7
FA2	Arena	4.70	2.576	2.681	1.513	1667.0	1821.2
MF	Llenante	100	2.634				

Gsb, Gsa: gravedades específicas bulk y aparente (I.N.V. E-222, I.N.V. E-223)
 LUW, RUW: masas unitarias suelta y apisonada (I.N.V. E-217)

4.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO BAILEY

4.2.1. Modificación de los Agregados Individuales

Tras haber determinado las características de los agregados en su estado original (de acopio o almacenamiento en planta), se efectuó una serie de iteraciones para establecer la combinación de ellos como parte de las mezclas, es decir, efectuar el diseño de la granulometría. Resultado de dicho ejercicio, se concluyó que en su estado original no se cumple con los parámetros Bailey, siendo entonces necesario modificar en laboratorio la granulometría de aquellos agregados individuales que hacen parte de las cuatro mezclas de prueba (grava de 1/2", arenas mezcladas 1:1 y arena lavada). Para tal fin, fue necesario separar mayores volúmenes de agregado (ver Fotografía 1) y combinarlos nuevamente para lograr las granulometrías de la Tabla 15.



Fotografía 1. Separación de agregados individuales en la serie de mallas

Como se observa en la Tabla 16, un mismo agregado individual debió ser modificado en su gradación en dos o tres formas para poder así lograr que las granulometrías combinadas de diseño se acercaran al valor promedio de los parámetros Bailey.

Tabla 15. Granulometría de los agregados individuales modificados

Tamaño		Porcentaje que pasa											
		CA3: Grava 1/2"				FA1: Arenas 1:1				FA2: Arena			
(mm)	(U.S.)	25-95	25-105	19-95	19-105	25-95	25-105	19-95	19-105	25-95	25-105	19-95	19-105
25	1 "												
19	3/4 "												
12.5	1/2 "	100	100										
9.5	3/8 "	80	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4.75	#4	35	30	60	60	87	87	87	87	93	93	93	93
2.36	#8	1.8	1.7	1.8	1.8	85	85	80	85	90	90	78	78
1.18	#16	1.2	0.9	1.0	1.0	52	52	52	52	70	70	63	63
0.6	#30	0.95	0.78	0.77	0.77	35	35	35	35	45	45	40	40
0.3	#50	0.79	0.62	0.63	0.63	21	21	21	21	21	21	21	21
0.15	#100	0.67	0.53	0.50	0.50	13	13	13	13	8.3	8.3	8.3	8.3
0.075	#200	0.51	0.41	0.39	0.39	10	10	10	10	4.7	4.7	4.7	4.7

Valores resaltados corresponden a los tamices modificados.

El cambio en la granulometría de algunos agregados individuales hizo necesario actualizar los ensayos de gravedad específica y masa unitaria, obteniéndose los resultados de la Tabla 16.

Tabla 16. Características de los agregados individuales modificados

Agregado	Nombre	Mezcla	p200	Gsb	Gsa	% Abs.	LUW	RUW
CA3	Grava 1/2"	25-95	0.51	2.583	2.683	1.452	1419.8	1555.3
		25-105	0.41	2.582	2.686	1.498	1412.8	1539.0
		19-95	0.39	2.593	2.689	1.376	1390.2	1509.0
		19-105	0.39	2.573	2.694	1.754	1390.2	1509.0
FA1	Arenas 1:1	25-95	9.96	2.600	2.694	1.348	1647.5	1826.0
		25-105	9.96	2.600	2.694	1.348	1647.5	1826.0
		19-95	10.1	2.606	2.691	1.204	1657.0	1833.3
		19-105	10.0	2.600	2.694	1.348	1647.5	1826.0
FA2	Arena	25-95	4.67	2.578	2.682	1.502	1658.1	1815.9
		25-105	4.67	2.578	2.682	1.502	1658.1	1815.9
		19-95	4.7	2.572	2.691	1.719	1658.9	1815.9
		19-105	4.7	2.572	2.691	1.719	1658.9	1815.9

Gsb, Gsa: gravedades específicas bulk y aparente (I.N.V. E-222, I.N.V. E-223)

LUW, RUW: masas unitarias suelta y apisonada (I.N.V. E-217)

4.2.2. Diseño de la Granulometría

Con las características de los agregados individuales establecidas, se aplicó la metodología descrita en el Numeral 2.4.3. La Tabla 17 muestra los porcentajes de los agregados individuales establecidos para las granulometrías de diseño, luego de iterar sus porcentajes en busca del valor medio del rango establecido para los parámetros Bailey (TRB, 2002).

Tabla 17. Porcentaje de los agregados individuales modificados sobre la mezcla

Mezcla	Agregado Individual (%)					
	CA1	CA2	CA3	FA1	FA2	MF
	Grava 1"	Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arenas 1:1	Arena	Llenante
25-95	24.7	0.0	43.4	21.0	8.8	2.1
25-105	28.4	0.0	43.8	18.9	6.4	2.5
19-95	0.0	38.3	14.2	37.5	9.4	0.6
19-105	0.0	36.9	23.3	30.4	8.0	1.3

Para facilidad de interpretación de los resultados, de aquí en más, las mezclas analizadas son denominadas en la siguiente manera:

- **MDC-25** : fórmula de trabajo de la planta de origen de los agregados utilizados, tamaño máximo 25 mm.
- **25-105** : mezcla de experimento, tamaño máximo 25 mm y 105 % de la masa unitaria suelta del agregado grueso.
- **25-95** : mezcla de experimento, tamaño máximo 25 mm y 95 % de la masa unitaria suelta del agregado grueso.
- **MDC-19** : fórmula de trabajo de la planta de origen de los agregados utilizados, tamaño máximo 19 mm.
- **19-105** : mezcla de experimento, tamaño máximo 19 mm y 105 % de la masa unitaria suelta del agregado grueso.
- **19-95** : mezcla de experimento, tamaño máximo 19 mm y 95 % de la masa unitaria suelta del agregado grueso.

La Figura 7 ilustra la granulometría de diseño las mezclas de tamaño máximo 25 mm (25-95 y 25-105), comparadas con las franjas para mezclas tipo MDC y MSC (INVIAS, 2013) y la fórmula de trabajo utilizada en la planta de origen (MDC-25).

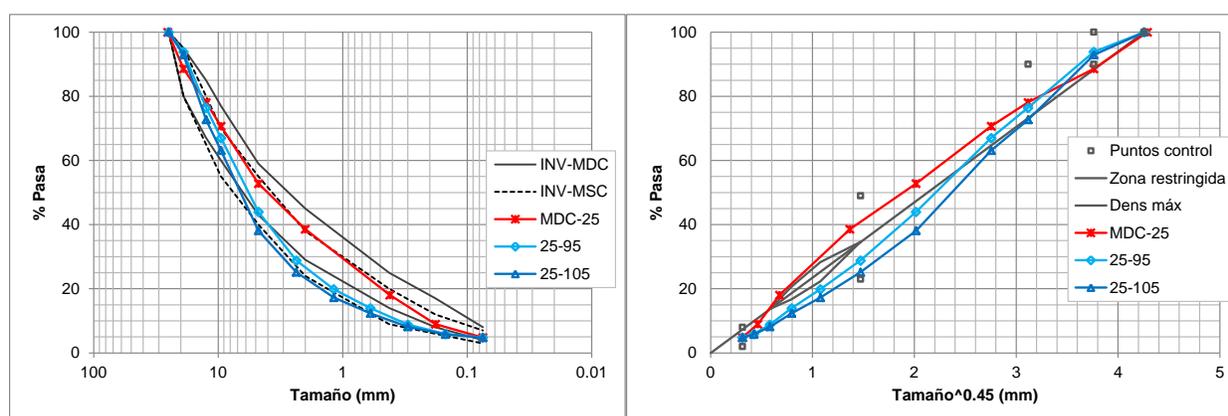


Figura 7. Gradaciones de diseño – Mezclas 25 mm

Preliminarmente, con respecto a los resultados de las mezclas 25 mm, conviene comentar:

- El 105 % de la masa unitaria suelta incrementa la curvatura de la granulometría.
- Las dos gradaciones de diseño se salen de la banda INVIAS para mezcla densa (MDC).

- Solo la mezcla 25-95 cumple como mezcla semidensa INVIAS (MSC).
- Las dos gradaciones cumplen criterios Superpave (franja restringida y puntos de control).

Por otra parte, en la Figura 8 pueden ser observadas las granulometrías de diseño para las mezclas de tamaño máximo 19 mm y su comparativo frente a la especificación INVIAS y a la fórmula de trabajo de la planta de origen de los agregados.

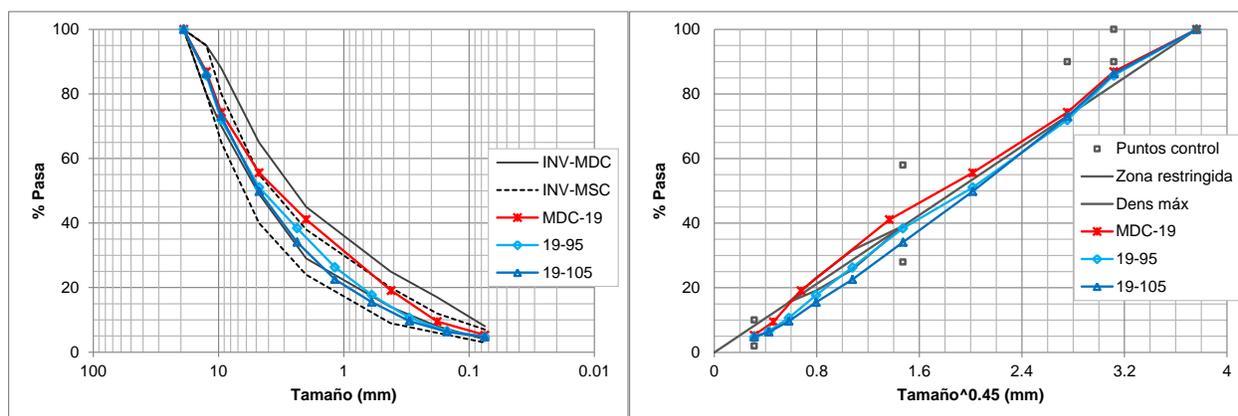


Figura 8. Gradaciones de diseño – Mezclas 19 mm

Con respecto a las gradaciones de diseño de las mezclas 19 mm:

- Un mayor porcentaje de la masa unitaria suelta incrementa la curvatura de la gradación combinada.
- Un 95 % de la masa unitaria suelta hace que la gradación se acerque a la línea de máxima densidad y pase por la franja restringida de Superpave.
- El 105 % de dicha masa aleja la granulometría de la línea de densidad máxima y de la franja restringida.
- Ninguna mezcla cumple puntos de control Superpave en la parte gruesa (12.5–9.5 mm).
- Solo la 19-95 cumple granulometría INVIAS como mezcla densa (MDC-19).
- La mezcla 19-105 no cumple como mezcla densa pero sí como semidensa (MSC-19).

El cálculo de los parámetros de empaquetamiento del método Bailey, para las cuatro mezclas del experimento y las dos producidas en la planta de origen de los agregados, se encuentran en la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros Bailey para las gradaciones de diseño

Mezcla	Porcentaje que pasa					Parámetros		
	NMAS	HS	PCS	SCS	TCS	CA	FAc	FAf
MDC-25	88.6	70.7	52.8	28.0	13.6	0.61	0.53	0.48
25-95	93.8	67.0	44.0	19.9	8.8	0.70	0.45	0.44
25-105	92.9	63.3	38.3	17.4	8.2	0.68	0.45	0.47
Rangos NMAS= 19 mm (TRB, 2002)						0.6–0.75	0.35–0.5	0.35–0.5
MDC-19	86.9	61.5	46.1	21.6	8.3	0.40	0.47	0.38
19-95	85.7	60.9	38.4	17.8	6.5	0.58	0.46	0.36
19-105	86.3	58.1	34.1	15.5	6.2	0.58	0.45	0.40
Rangos NMAS= 12.5 mm (TRB, 2002)						0.5–0.65	0.35–0.5	0.35–0.5

Por último, con respecto a las granulometrías de diseño, se confirma que un mayor porcentaje de la masa unitaria suelta elegida (CUW) aumenta el contenido de gravas (ver Figura 9); teniendo en cuenta que el porcentaje de finos (polvo, p200 o pasa tamiz #200) es un parámetro de entrada en el método Bailey, dicho incremento de gravas disminuye el contenido de arena en la gradación combinada.

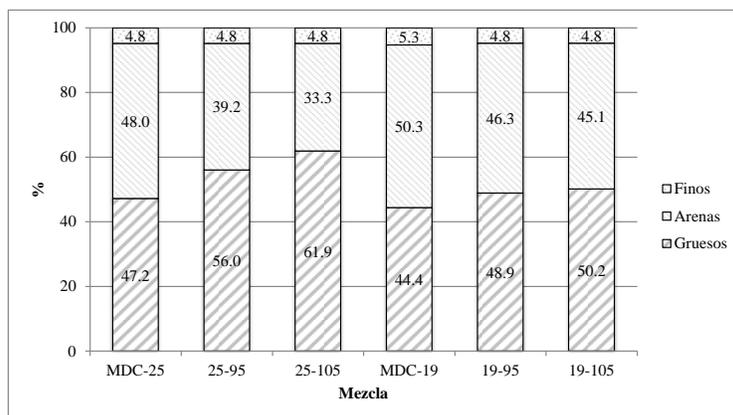


Figura 9. Porcentaje de grava, arena y fino en las mezclas

4.3. DISEÑO DE MEZCLAS

Tras haber establecido las gradaciones de diseño, se procedió al diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall, norma de ensayo I.N.V. E-748. El comportamiento de los parámetros volumétricos (vacíos totales: V_a , vacíos en los agregados minerales: VAM, vacíos llenos de asfalto: VFA) y de resistencia (estabilidad: E y flujo: f), en función del porcentaje de asfalto en la mezcla (P_b), se encuentran ilustrados en las Figuras 10 a 13.

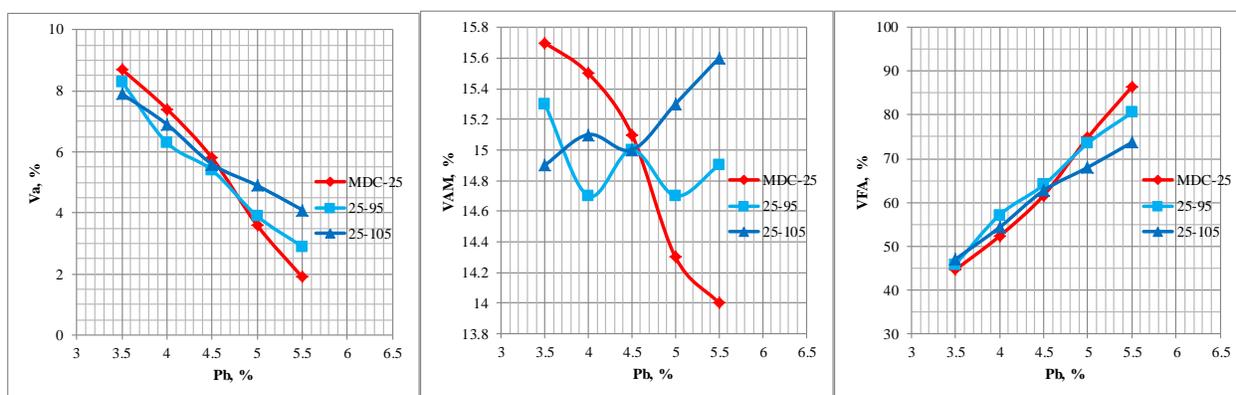


Figura 10. Comportamiento de los parámetros volumétricos – Mezclas 25 mm

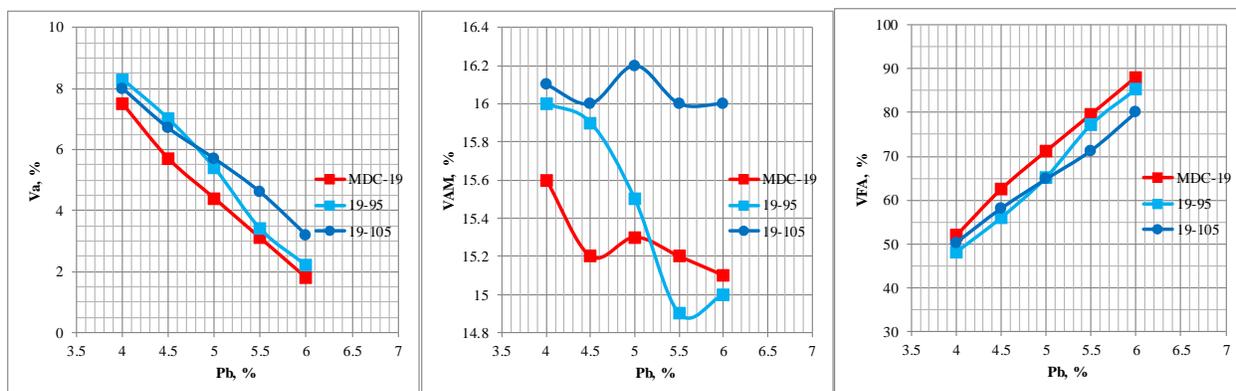


Figura 11. Comportamiento de los parámetros volumétricos – Mezclas 19 mm

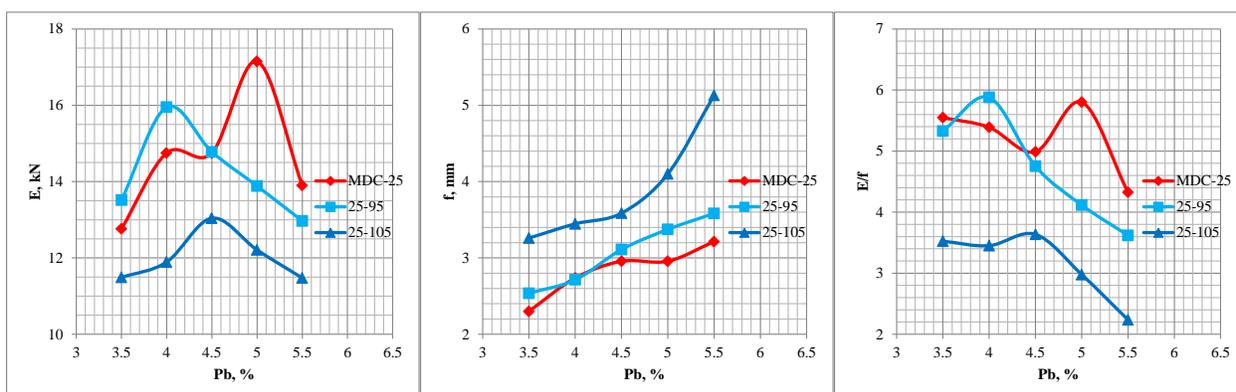


Figura 12. Comportamiento de los parámetros Marshall – Mezclas 25 mm

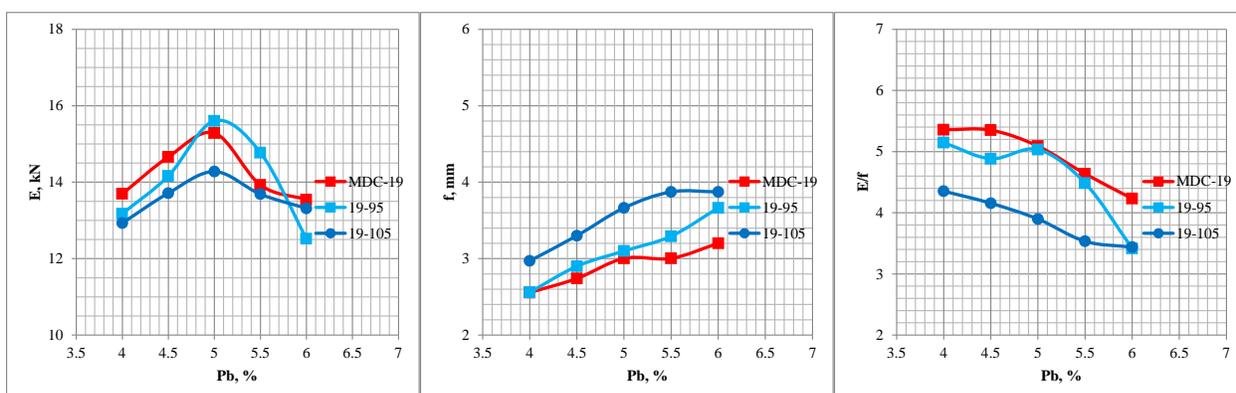


Figura 13. Comportamiento de los parámetros Marshall – Mezclas 19 mm

4.3.1. Selección del Óptimo de Asfalto

El porcentaje óptimo de ligante fue establecido para el contenido de vacíos promedio del rango establecido en la especificación para diseño de mezclas asfálticas ($V_a = 5\%$), buscando así evaluar las mezclas en condiciones similares. Para las seis mezclas analizadas –cuatro del experimento y dos de la planta de origen–, los parámetros de diseño en función del porcentaje óptimo de ligante (P_b), están resumidos en la Tabla 19.

Los siguientes numerales contienen análisis con respecto al comportamiento de los parámetros volumétricos y de estabilidad-flujo para el óptimo de ligante seleccionado.

Tabla 19. Parámetros del diseño de mezcla para el óptimo de asfalto

Mezcla	Parámetros Volumétricos						Parámetros Marshall			Densidad	
	Pb (%)	Va (%)	VAM (%)	VFA (%)	p200/Pbe	Ipa (μm)	E (kN)	f (mm)	E/f	Gmm	Gmb
MDC-25	4.7	5	14.7	67	1.14	8.2	16.3	2.95	5.5	2.457	2.335
25-95	4.6	5	14.8	66	1.13	10	14.8	3.15	4.7	2.455	2.329
25-105	4.9	5	15.2	67	1.07	11	12.5	3.9	3.2	2.452	2.33
MDC-19	4.8	5	15.2	68	1.19	8	15.1	2.9	5.2	2.451	2.33
19-95	5.1	5	15.2	68	1.06	9.5	15.4	3.15	4.9	2.454	2.331
19-105	5.3	5	16.2	69	1	11	14	3.8	3.7	2.442	2.318
Especificación*		4-6	> 14	65-75	0.8-1.2	> 7.5	> 9	2-3.5	3-6		

* Ver Tabla 5.

4.3.2. Efecto del Empaquetamiento sobre los Parámetros Volumétricos

Para el óptimo de asfalto, se tiene el comportamiento de los vacíos en los agregados minerales (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA) e índice de la película de asfalto (Ipa) de la Figura 14; con respecto a ello, algunos comentarios:

- Los VAM disminuyen con el incremento en el tamaño máximo (MS).
- Los VAM aumentan con el incremento en la masa unitaria suelta elegida (CUW).
- Los VFA no se ven sensiblemente afectados por el CUW.
- Mayor CUW conlleva mayor espesor promedio de la película de asfalto.

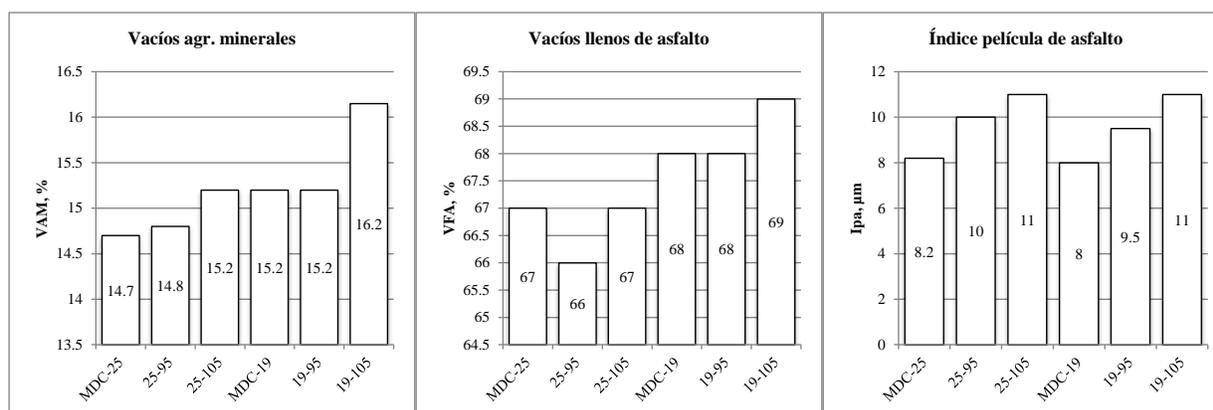


Figura 14. Parámetros volumétricos para el óptimo de asfalto

4.3.3. Efecto del Empaquetamiento sobre los Parámetros Marshall

Para el caso de los parámetros de resistencia y deformación en el ensayo Marshall (ver Figura 15), el comportamiento de los resultados indica lo siguiente:

- La estabilidad (E) disminuye con el aumento en la masa unitaria elegida (CUW).
- Un mayor CUW incrementa el flujo (f).

- El flujo en las mezclas con CUW= 105 es mayor que 3.5 mm, es decir que aquellas no cumplen para nivel de tráfico NT3.
- La relación estabilidad/flujo (E/f) disminuye con el aumento en el CUW.

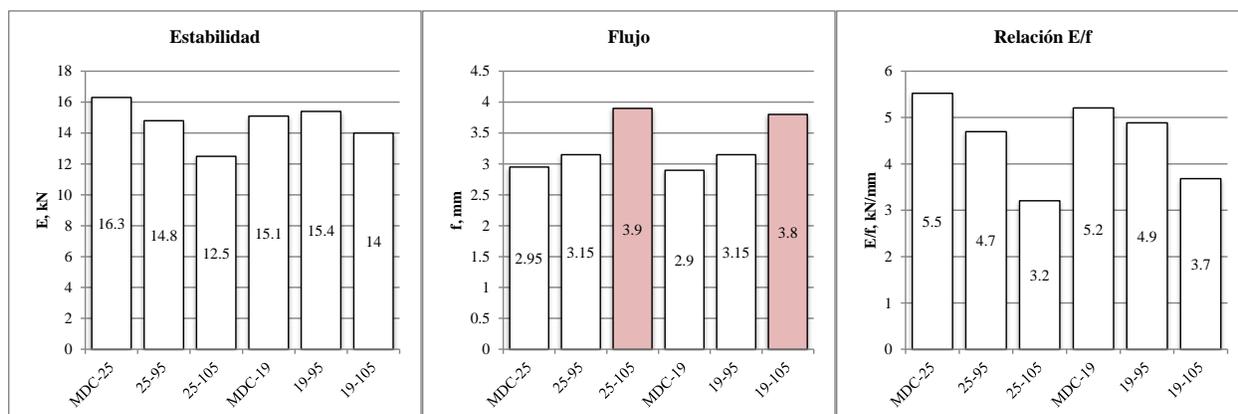


Figura 15. Parámetros Marshall para el óptimo de asfalto

4.3.4. Efecto del Empaquetamiento sobre la Densidad

Finalizando con el análisis del diseño de mezclas, se observó que la elección de una mayor masa unitaria (CUW) conlleva una disminución en la densidad máxima teórica de la mezcla (Rice) y que el comportamiento de la densidad Bulk no es concluyente. Ver Figura 16.

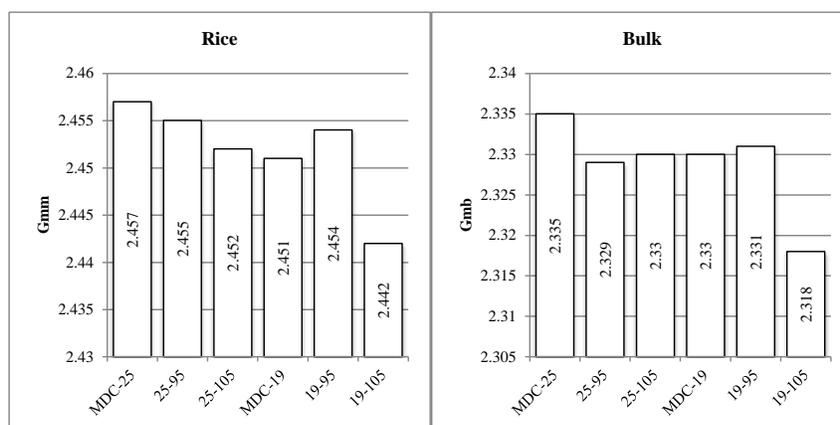


Figura 16. Densidades Rice y Bulk para el óptimo de asfalto

4.4. ADHERENCIA

El ensayo de adherencia fue ejecutado para las mezclas 25-105 y 19-105, obteniéndose relaciones de resistencia a la tensión (húmedo/seco) de 91 y 88 %, respectivamente, ambas mayores que el 80 % de especificación.

4.5. DEFORMACIÓN PERMANENTE

Con las fórmulas de trabajo definidas, se procedió a determinar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la norma de ensayo I.N.V. E-756, resultados presentados y comentados en el presente numeral.

4.5.1. Velocidad de Deformación

La Figura 17 muestra la velocidad de deformación en los intervalos de ensayo 30-45, 75-90 y 105-120 minutos. Al respecto, es importante destacar que la velocidad de deformación en las mezclas tamaño 19 mm es mayor que 20 $\mu\text{m}/\text{min}$, es decir que no cumplen especificación INVIAS 450-2013.

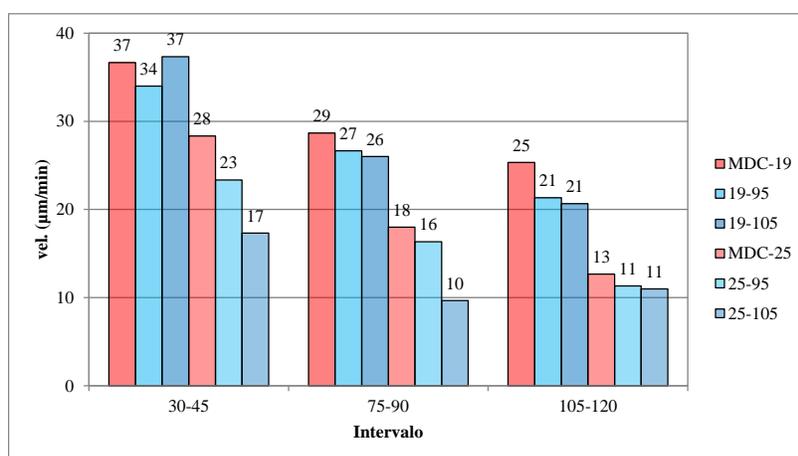


Figura 17. Velocidad de deformación en tres intervalos

En términos generales, el comportamiento de la Figura 18 permite concluir que la velocidad de deformación disminuye en función del tamaño máximo del agregado, al igual que en función de la masa unitaria elegida (CUW).

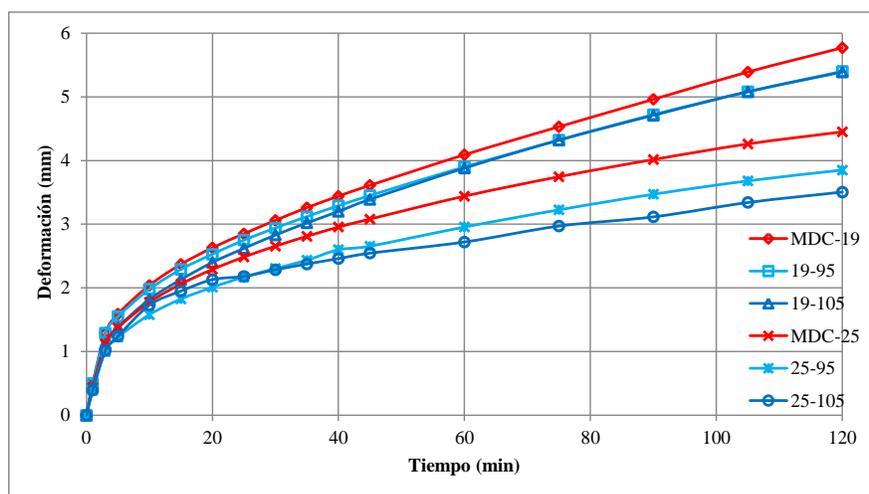


Figura 18. Velocidad de deformación durante el ensayo de pista

4.5.2. Deformación Total

Finalmente, en lo relacionado con el ensayo de deformación en pista, es claro que la mayor deformación total se presentó en la MDC-19 y la menor en la mezcla 25-105. Como se observa en la Figura 19, la deformación total disminuye con el aumento en la masa unitaria elegida y, en mayor proporción, con el aumento en el tamaño máximo del agregado.

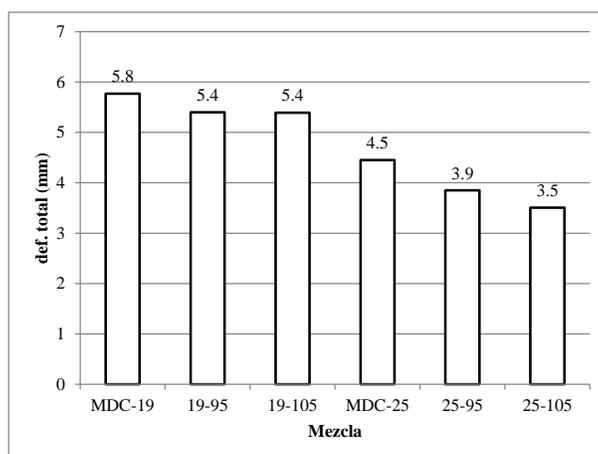


Figura 19. Deformación total en ensayo de pista

Aunque las mezclas 19-95 y 19-105 tienen deformación total igual, el análisis en los intervalos de tiempo 75-90 y 105-120 min. (Figura 17) muestra una tendencia más clara a la disminución de la velocidad de deformación en función del aumento en el CUW.

5. CONCLUSIONES

1. Considerando que la deformación total disminuye con el aumento en la masa unitaria elegida (CUW), resultado del experimento se comprobó que dicho parámetro tiene una relación directa con el grado de empaquetamiento de los agregados.
2. Los resultados del ensayo resistencia a la deformación plástica comprueban que la velocidad de deformación disminuye en función del CUW.
3. Tanto la velocidad de deformación como la deformación máxima fueron más bajas en las mezclas de 25 mm. Estos resultados indican que dicho tamaño máximo puede llegar a tener un mejor desempeño como capa de rodadura, aspecto que se opone a la práctica común, donde son las mezclas de 19 mm las utilizadas en superficie.
4. Se comprobó que un mayor CUW aumenta el porcentaje de gravas y disminuye el de arenas. Un mayor contenido de gravas, aquellas con mayor incidencia sobre la fricción entre partículas, resultó en una mejor resistencia a la deformación plástica.
5. Las cuatro mezclas de prueba, diseñadas por método Bailey y con el valor ideal de los tres parámetros del TRB, no se ajustan a las franjas granulométricas de la especificación INVIAS. Existe entonces una debilidad en la especificación al solicitar reporte de los parámetros Bailey, ya que al utilizar este en forma rigurosa se obtienen gradaciones ajenas a las franjas de mezcla densa o semidensa. Con base en ello se propone, para próximas actualizaciones del artículo 450: i) excluir el reporte de los parámetros Bailey o; ii) modificar las franjas granulométricas para que se ajusten a la metodología de dicho autor.
6. Además de satisfacer parámetros Bailey, las mezclas 25 mm satisfacen criterios del método Superpave para obtención de la granulometría. No sucede igual con las de 19 mm, dado que, con una masa elegida de 95 %, la gradación se acerca a la línea de máxima densidad y las dos combinaciones se salen de los puntos de control en la parte gruesa.
7. Buscando evaluar las mezclas en condiciones similares, en los seis casos se definió el óptimo de ligante para el mismo contenido de vacíos (5 %). Los parámetros volumétricos así obtenidos comprueban que, a mayor masa unitaria elegida, se incrementan los vacíos en los agregados minerales y, por ende, el contenido de ligante y el espesor promedio de la película de asfalto. En lo que tiene que ver con los parámetros Marshall, se observó disminución de la estabilidad, aumento en el flujo y disminución en la relación estabilidad/flujo, todo ello con el aumento en la masa unitaria elegida. Las mezclas diseñadas con el 105 % de la masa unitaria únicamente podrían ser utilizadas para niveles de tráfico NT1 y NT2 ($f > 3.5$ mm) de la especificación colombiana.
8. Las mezclas con CUW de 95 % mostraron mayores densidades, menores vacíos en los agregados minerales (VMA) y menores porcentajes óptimos de asfalto con respecto a las del 105 %, aspectos coherentes con la mayor proximidad de las primeras a la línea de máxima densidad. En términos relativos, se espera que la mezcla 19-95 (la más próxima a la línea de

máxima densidad), tenga menor durabilidad con respecto a la 19-105, dado que su menor contenido de ligante implica una menor resistencia al daño por humedad y posibilidad de exudación por insuficientes espacios para la acomodación del bitumen a altas temperaturas.

9. El incremento en la masa unitaria elegida (CUW) aumenta el contenido de gravas y disminuye el de arenas, lo cual conlleva a que la superficie específica disminuya con el aumento en el CUW, fundamentalmente por la menor superficie específica de las gravas. Sin embargo, menor superficie específica no implica menor contenido de asfalto, dado que mientras mayor es el CUW mayores son los VMA, requiriéndose mayor volumen de ligante para ocupar los espacios entre partículas.
10. Tras una variedad de iteraciones para establecer la combinación de los agregados se concluyó que, en su estado original, no se cumplía con los parámetros Bailey, siendo entonces necesario modificar en laboratorio la granulometría de algunos agregados individuales (grava de 1/2", arenas mezcladas y arena lavada). Un mismo agregado individual debió ser modificado en dos o tres formas para obtener combinaciones satisfactorias. En caso de no lograr cumplimiento de los rangos de los parámetros Bailey, es posible que se requiera modificación en los sistemas de trituración, aspecto incidente en los costos de explotación y producción.
11. Los resultados del experimento indican que, además de reportar sus parámetros, es beneficioso involucrar el CUW como indicador del grado de empaquetamiento. Lo anterior conlleva un cambio en la práctica ingenieril, en la cual, dicha combinación se logra iterando porcentajes individuales hasta encajar la gradación en la franja de la especificación.
12. En cuanto a las mezclas 19 mm, cuya velocidad de deformación es mayor que 20 $\mu\text{m}/\text{min}$, incumpliendo requisitos mínimos INVIAS 450–2013, es de aclarar que el ejercicio académico no exige el cumplimiento de especificación. En la práctica, con las características de calidad de los agregados comprobadas, dicho cumplimiento de especificación podría ser logrado con la mejora en la pasta o mastic, buscando optimizar la cohesión entre partículas y a altas temperaturas de servicio.
13. Para la puesta en práctica del método Bailey, se recomienda tener en cuenta las menores estabilidades y los más altos valores de flujo obtenidos en el presente experimento para las mezclas con masa unitaria elegida de 105 %. La selección de un mayor o menor valor podría ser función de la temperatura del ambiente y el nivel de tráfico del proyecto.
14. En futuras investigaciones, sería de mucha utilidad complementar el análisis evaluando el desempeño de diferentes granulometrías mediante ensayos de módulo resiliente y ley de fatiga.

BIBLIOGRAFÍA

- Asphalt Institute. (2007). The Asphalt Handbook. Estados Unidos.
- IMT. (2004). Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas. Mexico.
- INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Colombia.
- Monismith, C. L. (1994). Permanent Deformation Response of Asphalt – Aggregate Mixes. SHRP-A-415. Estados Unidos.
- NCAT. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. Estados Unidos.
- NCHRP. (2011). A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. Estados Unidos.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). Pavement Design and Materials. Estados Unidos.
- Rajib, B. M., & Tahar, E.-K. (2013). Pavement Engineering: Principles and Practice. Estados Unidos.
- TRB. (2002). Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design. Estados Unidos.

ANEXOS