

**PROTOCOLO DE ENSAYO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
CON VARIACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA**

**IVÁN GILBERTO CASTRO NOVA
TULIA ELENA QUINTERO GUERRERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2010

**PROTOCOLO DE ENSAYO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
CON VARIACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA**

**IVÁN GILBERTO CASTRO NOVA
TULIA ELENA QUINTERO GUERRERO**

**Monografía para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Ing. Civil, M.Sc., Doctor**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2010

*Este éxito está dedicado a mis padres:
Gilberto Castro Rojas y Rosa Margarita Nova Parra,
con sabiduría y cariño han sido la guía
en mi formación personal y académica.
Gracias a mi hermana Adriana Margarita Castro Nova
por ser esa compañía y motivación de superación.
Gracias a esa mujer que me acompañó durante mis estudios.*

Iván Gilberto Castro Nova

A Dios, por permitirme alcanzar esta meta.

*A mis padres, por su amor, apoyo comprensión
y esfuerzo en todo momento.*

*A mis hermanos, por su cariño, paciencia y
confianza en mí.*

A mi familia, amigos y compañeros.

Tulía Elena Quintero Guerrero

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiarnos en cada uno de los pasos que se dieron para alcanzar este punto, y por darnos la sabiduría necesaria para enfrentar con responsabilidad las dificultades.

Al Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por su paciencia y brindarnos su conocimiento y ayuda incondicional en todo momento.

A la ingeniera María Cristina Rivero Olarte por brindarnos su amistad su conocimiento y ayuda incondicional.

A Jairo, Germán y Jaime laboratoristas, quienes nos brindaron su ayuda y amistad, quienes hicieron agradables las jornadas en los laboratorios.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1 FORMULACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	22
1.1 COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA.....	22
1.1.1 Tipología de los Agregado Pétreos	23
1.1.2 Características de los Agregados	23
1.1.3 Clasificación de los agregados.....	23
1.1.3.1 Agregado Grueso.....	24
1.1.3.2 Agregado Fino.....	24
1.1.3.3 Llenante mineral o Filler	24
1.2 ESTRUCTURA DEL AGREGADO GRANULAR	24
1.2.1 Método Bailey	25
1.2.1.1 Análisis de la mezcla de diseño	26
1.3 CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE BITUMINOSO	28
1.4 FORMULACIÓN MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	30
1.4.1 Acondicionamiento de los materiales	30
1.4.2 Número de probetas.....	30
1.4.3 Cantidad de materiales	30
1.4.4 Preparación de los agregados	31
1.4.5 Elaboración de la mezcla asfáltica	31
1.4.6 Compactación de las mezclas.....	31
1.5 SELECCIÓN DE LA MEZCLA.....	32
1.5.1 Propiedades volumétricas	32
1.5.2 Determinación del contenido óptimo de asfalto.....	34
2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MEZCLA.....	35

2.1	RIGIDEZ.....	35
2.2	RESISTENCIA A LA FATIGA.....	36
2.3	DEFORMACIÓN PLÁSTICA	38
2.3.1	Tipos de deformaciones plásticas	38
2.3.2	Agentes que participan en la formación de deformaciones plásticas...39	
2.3.3	Ensayo para caracterizar las deformaciones plásticas.....	40
2.4	SENSIBILIDAD AL AGUA	41
3	METODOLOGÍA	42
3.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	44
3.2	TIPO DE MEZCLA	44
3.2.1	Selección y evaluación de las granulometrías	45
3.3	ELABORACIÓN DE PROBETAS.....	45
3.4	ENSAYOS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS	46
3.4.1	Gravedad específica Bulk	46
3.4.2	Gravedad máxima teórica	47
3.5	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS.....	48
3.6	VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS.....	49
3.6.1	Contenido de vacíos y vacíos llenos con asfalto	49
3.6.2	Contenido de vacíos en el agregado mineral	49
3.6.2.1	Calculo de VAM con la ecuación de V_a	50
3.6.2.2	Calculo de VAM con la ecuación de V_{FA}	52
3.6.2.3	VAM estimado.....	53
3.6.3	Contenido definitivo de asfalto	53
3.6.4	Contenido de vacíos determinado.....	53
3.7	SELECCIÓN FÓRMULA DE LA MEZCLA	53

3.8	ELABORACIÓN DE PROBETAS CON EL CONTENIDO DE ASFALTO SELECCIONADO	54
3.9	ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FÓRMULA SELECCIONADA.....	54
3.9.1	Ensayo de estabilidad y flujo.....	55
3.9.2	Fatiga de mezclas asfálticas	55
3.9.2.1	Predicción del módulo de rigidez dinámico de las mezclas mediante el modelo de Witczak.....	56
3.9.2.2	Cálculo del esfuerzo admisible a tensión	57
3.10	SELECCIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA FINAL	59
3.11	DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA.....	59
4	EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	60
4.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	60
4.2	TIPO DE MEZCLA	62
4.3	ELABORACIÓN DE PROBETAS.....	63
4.4	ENSAYOS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS	64
4.5	PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS.....	65
4.6	VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS.....	67
4.7	SELECCIÓN Y ELABORACIÓN DE LA FÓRMULA DE MEZCLA CON EL CONTENIDO DE ASFALTO SELECCIONADO.....	70
4.8	ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FÓRMULA SELECCIONADA.....	70
4.8.1	Ensayo de estabilidad y flujo.....	70
4.8.2	Fatiga de mezclas asfálticas	71
4.9	SELECCIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	72
4.10	DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA.....	74

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS.....	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Tamices de control para evaluación de mezclas (mm)	27
Tabla 1.2 Rangos recomendados para la evaluación de granulometrías	28
Tabla 1.3 Tipos de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente	29
Tabla 1.4 Especificaciones del cemento asfáltico.....	29
Tabla 3.1 Especificaciones técnicas agregado pétreo.	44
Tabla 3.2 Límites granulométricos para las diferentes mezclas	45
Tabla 3.3 Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente.....	54
Tabla 3.4 Criterios de comprobación de la fórmula de trabajo.....	55
Tabla 4-1 Características generales del cemento asfáltico C60-70 proveniente de Barrancabermeja	61
Tabla 4-2 Límites de la Franja Granulométrica con las granulometrías propuestas	62
Tabla 4-3 Coeficientes para la evaluación del empaquetamiento de los agregados	63
Tabla 4-4 Densidad Bulk y densidad máxima teórica de las probetas.....	64
Tabla 4-5 Propiedades volumétricas de las mezclas	66
Tabla 4-6 Parámetros volumétricos	66
Tabla 4-7 Evaluación de parámetros volumétricos	69
Tabla 4-8 Propiedades volumétricas de las fórmulas seleccionadas.....	70
Tabla 4-9 Resultados de Estabilidad y Flujo Marshall	71
Tabla 4-10 Módulo de rigidez dinámico para cada mezcla seleccionada	71
Tabla 4-11 Deformación admisible para un millón de repeticiones.....	72
Tabla 4-12 Sensibilidad al agua utilizando el ensayo de tracción indirecta	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1 Esquema división de la granulometría.....	26
Figura 2-1 Deformación plástica en la capa asfáltica.....	39
Figura 2-2 Wheel tracking test	40
Figura 3-1 Esquema de la metodología propuesta	43
Figura 3-2 Probetas preliminares.....	46
Figura 3-3 Relaciones volumétricas y gravimétricas.....	48
Figura 3-4 Relación entre %Va, %VFA y el límite de especificación para el rango de contenido de asfalto.....	49
Figura 3-5 Relación entre %VAM y el límite de especificación para el rango de contenido de asfalto.....	50
Figura 4-1 Agregados de la mezcla seleccionada	61
Figura 4-2 Primeras probetas elaboradas.....	63
Figura 4-3 Elaboración de briquetas	64
Figura 4-4 Ensayo Densidad Bulk y Gmm	65
Figura 4-5 Ensayo de sensibilidad al agua por tracción indirecta	74
Figura 4-6 Efecto del agua sobre las briquetas	76

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 4-1 Curvas Granulométricas.....	62
Gráfica 4-2 Variación de los Vacíos en función del contenido de Asfalto	67
Gráfica 4-3 Variación de Vacíos Llenos con asfalto en función del contenido de Bitumen.....	67
Gráfica 4-4 Variación de vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto	68
Gráfica 4-5 Variación de vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto	68
Gráfica 4-6 Variación de vacios en el agregado mineral en función del contenido de asfalto	69
Gráfica 4-7 Estabilidad y rigidez de las mezclas asfálticas.....	73
Gráfica 4-8 Comportamiento a la Fatiga de las mezclas asfálticas.....	73

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ESTIMACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LOS VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL	81
ANEXO B. PREDICCIÓN DE LA VISCOSIDAD A LA TEMPERATURA DESEADA	85
ANEXO C. FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	87

RESUMEN

TITULO: PROTOCOLO DE ENSAYO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON VARIACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA.

AUTOR: TULIA ELENA QUINTERO GUERRERO
IVÁN GILBERTO CASTRO NOVA****

PALABRAS CLAVES: MEZCLA ASFÁLTICA, MÉTODO BAILEY, PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS, RIGIDEZ, FATIGA, SENSIBILIDAD AL AGUA, ESTABILIDAD Y FLUJO.

CONTENIDO:

Por décadas el método Marshall ha ganado valiosa experiencia en el diseño de mezclas asfálticas. La metodología de diseño propone la elaboración de 15 probetas aproximadamente para determinar el contenido de asfalto óptimo para una sola franja granulométrica. Si el diseño no cumple con los requerimientos de estabilidad y flujo se hace necesario proponer un nuevo diseño con lo cual se incrementa el número de probetas para seleccionar una mezcla final.

Para proporcionar mayor eficiencia en el diseño de mezclas asfálticas utilizando la metodología Marshall, el presente proyecto de investigación describe un procedimiento que logra establecer inicialmente, seis diseños diferentes, en los cuales se seleccionan 3 franjas granulométricas y se varía para cada una de ellas 2 contenidos de asfalto. En esta fase se evalúan las propiedades volumétricas (VMA, VFA, Va) de cada uno de los diseños propuestos y se escogen los que cumplen con lo solicitado por las especificaciones. Con lo anterior se determina para cada granulometría el contenido de asfalto que me proporcione un porcentaje de vacíos con aire igual al 4% y se fabrican las probetas para evaluar estabilidad y flujo y revalidar las características volumétricas. A este grupo de probetas se les estimó la rigidez de la mezcla utilizando la predicción propuesta por Witczak para evaluar el módulo dinámico y el desempeño a fatiga de la mezcla a través de las fórmulas de Shell. A partir de los criterios anteriores se selecciona la mezcla que proporcione las mejores características según el criterio del diseñador. Por último se evalúa a través del ensayo de tracción indirecta la susceptibilidad al agua del diseño seleccionado para determinar la necesidad de productos que mejoren la adherencia asfalto-agregado.

*Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

SUMMARY

TITLE: TEST PROTOCOL FOR THE DESIGN OF THE ASPHALT MIXTURES WITH VARIATION OF PARTICLE SIZE.

AUTHORS: TULIA ELENA QUINTERO GUERRERO
IVÁN GILBERTO CASTRO NOVA****

KEYWORDS: ASPHALT MIXTURE, METHOD BAILET, VOLUMETRIC PROPERTIES, STIFFNESS, FATIGUE, WATER SENSITIVITY, STABILITY AND FLOW.

CONTENT:

For decades the Marshall method has gained valuable experience in the design of asphalt mixtures. The design methodology proposes the development of approximately 15 samples to determine the optimum asphalt content for single gradations. If the design doesn't meet the requirements of stability and flow is necessary to propose a new design which increases the number of samples to select a final mix.

To provide greater efficiency in the design of asphalt mixtures using the Marshall methodology, this research project describes a method that manages to establish initially, six different designs, in which selected three gradations and variations for each two asphalt content. In this phase the volumetric properties will be evaluated (VMA, VFA, VA) for each of the proposed design and are chosen to meet as requested by the specifications. With the above particle size is determined for each asphalt content that we provide a percentage of air voids equal to 4% and the samples are made to assess and validate flow stability and volumetric characteristics. This group of samples were estimated using the mixture stiffness prediction proposed by Witczak to evaluate the dynamic modulus and fatigue performance of the mixture right through the Shell formulas. Taking into account the above criteria the best mixing is selected analyzing its characteristics according to the criteria of the designer. Finally the water susceptibility of the selected design is evaluated to determine the need of products that improve the asphalt-aggregate adhesion.

*Dissertation

**School of Engineering Physics-Mechanical, Civil engineering School. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

INTRODUCCIÓN

Para un país es muy importante invertir en la adecuación de vías, las cuales generan desarrollo y progreso a la comunidad. El proceso de construcción, mantenimiento o rehabilitación de una vía implica costos, es muy importante aportar investigaciones y estudios que proporcionen datos importantes para la fabricación y diseño de mezclas asfálticas utilizadas en la elaboración de pavimentos más eficaces y de alta vida de servicio estimada.

Uno de los métodos de diseño de mezclas más utilizado en la actualidad es el método Marshall, el cual fue desarrollado por Bruce Marshall. Siendo US Army Corps Engineers quien depuró y adicionó ciertos aspectos a las propuestas de Marshall al punto de que el ensayo fue normalizado como ASTM D 1559. El método es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de estabilidad, fluencia, densidad y vacíos. Una de sus virtudes es la importancia que se le asigna a las propiedades densidad/vacíos de la mezcla asfáltica, esto garantiza que las proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de los rangos adecuados para asegurar una mezcla durable.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido de asfalto óptimo para una combinación específica de agregados. En este proyecto se propondrá un nuevo protocolo de ensayo para el diseño de mezclas asfálticas en donde no solo se varíe el porcentaje de asfalto sino que también se varíe la granulometría del agregado pétreo, donde se escogerán tres esqueletos granulares para realizar el diseño de la mezcla, los cuales se ajustaran según los criterios de empaquetamiento del agregado propuestos por el método Bailey, el cual ofrece un total de esqueleto granular fuerte para resistir la deformación permanente, también da lugar a un volumen adecuado de vacíos en el agregado mineral, lo que permite un mayor contenido de ligante y una mayor durabilidad de la mezcla.

Este documento describe la metodología de elaboración de mezclas asfálticas, para determinar los vacíos llenos con aire, vacíos llenos con asfalto y vacíos en el agregado mineral y la deformación. En el capítulo 1, se hace referencia a los materiales utilizados para la fabricación de mezclas asfálticas, su elaboración y análisis de diseño. El capítulo 2, se realiza una breve descripción de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. El capítulo 3, se detalla la metodología propuesta para realizar el diseño de la mezcla. El capítulo 4, se realiza un ejemplo detallado para validar la metodología y establecer los criterios para escoger la mezcla definitiva.

1 FORMULACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

La mezcla asfáltica es el producto de la unión entre agregados minerales pétreos encargado de proporcionar un cuerpo a la mezcla y el cemento asfáltico, que actúa como agente ligante, proporcionando una íntima unión y cohesión entre los agregados pétreos. Esta mezcla actúa como esqueleto de la estructura del pavimento aportando resistencia y rigidez. La función de la mezcla asfáltica es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica para los usuarios de las vías. Dependiendo de las proporciones de los agregados en la mezcla, las propiedades físicas y dinámicas se verán afectadas, de ahí la importancia de diseñar con una granulometría que cumpla las especificaciones.

Resistencia al deslizamiento, una buena uniformidad en la superficie del pavimento tanto longitudinal como transversal, un ruido moderado de rodadura, unas propiedades de reflexión luminosas adecuadas para la conducción nocturna y un desagüe superficial rápido, deben ser las características finales que debe tener la mezcla asfáltica una vez esté en servicio.

1.1 COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

Está constituido en gran parte por agregado mineral el cual es un material inerte de origen natural como gravas, arenas, cascajo, fragmentos rocosos o su respectiva combinación, éstos carecen de cohesión entre sí, el asfalto proporciona la adhesión necesaria para producir la mezcla asfáltica. El agregado mineral constituye entre el 90 y 95 por ciento del peso y entre 80 y 85 por ciento en volumen de la mezcla asfáltica, y contribuyen a la estabilidad mecánica, al soporte de la carga del tráfico y al mismo tiempo transmitir la carga a la sub-base a una unidad de presión considerablemente reducida.

1.1.1 Tipología de los Agregado Pétreos

Los agregados minerales son caracterizados respecto al origen de procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, de esta manera se encuentran cuatro tipos de agregados. Los agregados naturales que son utilizados después de su modificación de su distribución, agregados de trituración, aquellos provenientes de la pulverización de las rocas de las canteras, agregados artificiales como la escoria que son materiales del subproducto de la industria y agregados marginales que son materiales que no cumplen con alguna de las especificaciones para el diseño de mezclas asfálticas.

1.1.2 Características de los Agregados

Para el buen funcionamiento de la carpeta asfáltica, se deben tener en cuenta ciertas características físicas, como la forma y angulosidad, un agregado mineral deseable es aquel que cuenta con una alta proporción de partículas equidimensionales. También se debe tener en cuenta características mecánicas, como lo son la resistencia al desgaste ya que es un factor importante en la evolución del pavimento después de su puesta en servicio y la resistencia al pulimento que es la resistencia a perder aspereza en su textura superficial, agregados ásperos evitan el deslizamiento del pavimento. De igual forma, las características químicas como la adhesividad son importantes, una buena afinidad polar por el ligante impide el desplazamiento del ligante asfáltico de la superficie del agregado.

1.1.3 Clasificación de los agregados

Los agregados utilizados para pavimentación se clasifican según su tamaño en: agregado grueso, agregado fino y llenante mineral.

1.1.3.1 Agregado Grueso

Se considera agregado grueso todo material que sea retenido por el tamiz #4 (4.75 mm). Este agregado deberá ser limpio, resistente y durable, sin exceso de partículas planas, alargadas o desintegrables a demás estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan impedir la adhesión completa del asfalto.

1.1.3.2 Agregado Fino

Se considera material fino todo aquel que logre pasar el tamiz #4(4.75mm) y es retenido en el tamiz #200 (0.074mm). En este rango se encuentran las arenas gruesas y finas las cuales son separadas por el tamiz #10 (2mm). Está constituido por arena de trituración o una mezcla con arena natural, los granos del agregado fino deberán estar libres de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto.

1.1.3.3 Llenante mineral o Filler

Su principal característica es que pasa el tamiz #200 (0.074 mm). Siendo el polvo de roca más utilizado en las mezclas asfálticas realizadas en nuestra región, teniendo su origen durante el proceso de trituración del material granular de mayor tamaño. Aporta un incremento a la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, incrementa la durabilidad de la capa de rodadura evitando la acción del desplazamiento que ejerce el agua al asfalto, debido a que reduce los poros superficiales evitando el acceso del agua al interior.

1.2 ESTRUCTURA DEL AGREGADO GRANULAR

La granulometría es la característica física principal y fundamental de toda mezcla de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica de esta. Debe garantizar un buen acomodamiento del agregado en la mezcla, de

tal manera que proporcione un esqueleto granular fuerte capaz de resistir las cargas del tránsito y proporcionar estabilidad a la capa asfáltica.

1.2.1 Método Bailey

El método Bailey proporciona un conjunto de herramientas que permiten la evaluación de mezclas de agregados, ya que proporcionan una mejor comprensión de la relación entre la gradación de agregados y los vacíos en la mezcla. Este método ayuda a garantizar un acomodamiento total y una buena combinación del agregado dando resistencia a la deformación permanente y al mismo tiempo manteniendo las propiedades volumétricas, las cuales proporcionan resistencia a la fatiga.

La combinación final de agregado grueso y fino y sus correspondientes propiedades individuales determinan las características de la mezcla global, proporcionando un esqueleto mineral fuerte, lo cual brinda una alta estabilidad y un porcentaje de VAM adecuados para una buena durabilidad de la mezcla.

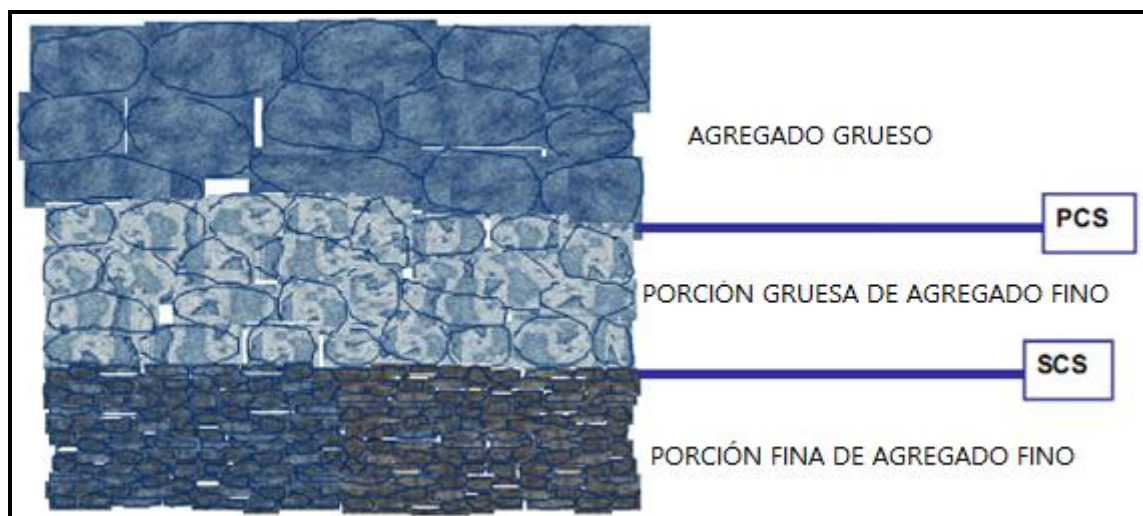
En el Método de Bailey, la definición de agregado grueso y fino es más específica, con el fin de evaluar el acomodamiento total proporcionado por la combinación de los agregados, en mezclas de diferentes tamaños. La definición de grueso y fino depende del tamaño máximo nominal de las partículas en la mezcla.

- **Agregado grueso:** son las partículas grandes de agregado que cuando se colocan en una unidad de volumen generan espacios vacíos.
- **Agregado Fino:** son aquellas partículas de agregado que pueden llenar los espacios vacíos creados por el agregado grueso en la mezcla.

1.2.1.1 Análisis de la mezcla de diseño

La mezcla combinada se divide en tres partes distintas, y cada parte se evalúa individualmente. La parte gruesa de la mezcla combinada son aquellas partículas retenidas en el tamiz de control primario (PCS). El agregado fino se descompone y se evalúa como dos porciones, para determinar dónde dividir el total de multa, se multiplica el PCS por el mismo factor de 0,22, de esta manera se determina un tamiz de control secundario (SCS) el cual se convierte en la ruptura entre secundarios arena y arena fina. La arena fina es más evaluada por la determinación del tamiz de control superior (TCS), que se determina multiplicando el SCS por el factor 0,22. Un esquema de cómo la gradación se divide en tres partes se da en la Figura 1-1.

Figura 1-1 Esquema división de la granulometría



Fuente: Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design (Circular)

Los tamices de control para la evaluación del empaquetamiento de los agregados dependen del tamaño máximo nominal presente en cada mezcla. En la Tabla 1-1 se recomienda usar los siguientes tamices comerciales.

Tabla 1.1 Tamices de control para evaluación de mezclas (mm)

TMN	37.50	25.00	19.00	12.50	9.50	4.75
Mitad malla	19.00	12.50	9.50	**	4.75	2.36
PCS	9.50	4.75	4.75	2.36	2.36	1.18
SCS	2.36	1.18	1.18	0.60	0.60	0.30
TCS	0.60	0.30	0.30	0.15	0.15	0.08

Fuente: Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design (Circular)

El método Bailey define tres parámetros para evaluar la gradación de los agregados dentro de la mezcla:

Porcentaje de agregado grueso (índice de CA): evalúa la combinación de la parte gruesa de la gradación de agregado, en esta parte se define el tamiz de un medio. El CA es el principal factor de constructibilidad de la mezcla a medida que disminuye, la compactación de la multa aumenta.

$$CA = \frac{(\% \text{ que pasa la mitad de la malla} - \% \text{ que pasa PCS})}{(100\% - \% \text{ que pasa la mitad de la malla})}$$

Ecuación: 1

Porcentaje grueso de los agregados finos (proporción FAC): evalúa la fracción gruesa del agregado fino, si su valor está por debajo de los rangos establecidos en la Tabla 1-2 puede llevar a problemas de compactación, esta relación tiene un impacto considerable en el VMA debido a la mezcla de arena y la creación de vacíos en el agregado fino.

$$FAC = \frac{\% \text{ pasa SCS}}{\% \text{ pasa PCS}}$$

Ecuación: 2

Porcentaje fino de agregados finos (proporción FAF): se utiliza para evaluar las características de la combinación de la porción más pequeña de la mezcla de agregados, los VMA aumentarán con una disminución de este coeficiente.

$$FAF = \frac{\% \text{ pasa TCS}}{\% \text{ pasa SCS}}$$

Ecuación: 3

En la Tabla 1.2, se encuentran los rangos recomendados para realizar la evaluación de los agregados.

Tabla 1.2 Rangos recomendados para la evaluación de granulometrías

TMN (mm)	37.50	25.00	19.00	12.50	9.50	4.75
CA	0.80-0.95	0.70-0.85	0.60-0.65	0.50-0.65	0.40-0.55	0.30-0.45
FAC	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50
FAF	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50

Fuente: Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design (Circular)

1.3 CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE BITUMINOSO

El asfalto para pavimentos es una mezcla de hidrocarburos, que forma una solución coloidal, constituida por una fase continua denominada máltenos, esta fase se fracciona en parafinas, resinas y aceites, y por una fase designada como asfáltenos. Una vez extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo se produce un residuo sólido llamado el asfalto.

Debido a las características como poder de adherencia, ductilidad, poder aglomerante, agente estabilizante, agente impermeable y alta manejabilidad, el asfalto es utilizado tanto en la construcción de pavimentos como en el mantenimiento de estos.

En la Tabla 1.3, se observan los tipos de asfalto que se pueden utilizar dependiendo del nivel de tránsito y de la temperatura media de la región.

Tabla 1.3 Tipos de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente

Tipo de capa	NT1			NT2			NT3		
	TEMPERATURA MEDIA ANUAL PONDERADA DE LA REGIÓN (°C)								
	>24	15-24	<15	>24	15-24	<15	>24	15-24	<15
Rodadura e intermedia	60-70	60-70 u 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100	60-70 o Tipo III	60-70 o Tipo II	80-100 o Tipo II

Fuente: Mezclas asfálticas en caliente (Artículo 450-07)

En la Tabla 1.4, se registran las especificaciones y los rangos que debe cumplir el cemento asfáltico de acuerdo al grado de penetración.

Tabla 1.4 Especificaciones del cemento asfáltico

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	NORMA DE ENSAYO INV.	GRADO DE PENETRACIÓN			
			60-70		80-100	
			Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración (25°C, 100g, 5s)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	1	-1	1
Viscosidad absoluta (60°C)	P	E-716,17	1500	-	1000	-
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	E-702	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante copa abierta d Cleveland	°C	E-709	230	-	230	-
Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 75 minutos)	%	E-720	-	1	-	1
Penetración del residuo lego de la pérdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original	%	E-706	52	-	48	-
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E-720).	°C	E-712	-	5	-	5

Fuente: Mezclas asfálticas en caliente (Artículo 450-07)

1.4 FORMULACIÓN MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El método Marshall fue desarrollado y adaptado para diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso. Es muy utilizado porque emplea equipo portátil. El propósito es determinar el contenido de asfalto óptimo para una combinación específica de agregados, a demás nos proporciona información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción de la mezcla.

A continuación se detalla brevemente esta formulación

1.4.1 Acondicionamiento de los materiales

El material del que se dispone para la fabricación de las briquetas de concreto asfáltico es agregado pétreo procedente de trituración el cual cumple con las especificaciones, es acondicionado dentro de las franjas granulométricas establecidas de acuerdo al tipo de mezcla.

Se utiliza cemento asfáltico convencional o modificado que es calentado hasta una temperatura de mezcla, dependiendo del tipo de bitumen.

1.4.2 Número de probetas

El número de probetas para cada diseño, depende de los contenidos de asfalto que se deseen probar, y de las probetas fabricadas para cada porcentaje de asfalto.

1.4.3 Cantidad de materiales

Un diseño con dos contenidos de asfalto y tres granulometrías diferentes necesitará por lo menos 18 probetas. Para la elaboración de una probeta se necesita aproximadamente 1200 gramos de mezcla. Se requiere a demás una

cantidad extra de materiales para el análisis granulométrico y la determinación de las gravedades específicas.

1.4.4 Preparación de los agregados

El agregado es secado en el horno a una temperatura que oscile entre 105°C - 110°C, se separa por tamizado en los tamaños deseados, luego se toma la cantidad necesaria según el tipo de mezcla a diseñar, teniendo en cuenta que las porciones de agregado se encuentren dentro de las franjas granulométricas escogidas recomendadas por el Instituto Nacional de Vías.

1.4.5 Elaboración de la mezcla asfáltica

Para obtener probetas cilíndricas de 4" de diámetro y 2 ½" de altura se requiere aproximadamente 1200 gramos de mezcla entre cada fracción de agregado y cemento asfáltico. Se calienta los agregados a la temperatura indicada (superior en 20°C a la temperatura del asfalto), mezclándose rápidamente y abriéndose un cráter dentro del cual se vierte la cantidad adecuada de cemento asfáltico. La mezcla debe realizarse rápidamente con el fin de obtener la homogeneidad, garantizando el total recubrimiento de las partículas de agregado.

1.4.6 Compactación de las mezclas

Luego de mezclar los agregados se procede a introducir la mezcla en el molde de compactación el cual previamente debe haberse calentado y engrasado a una temperatura de 93.3°C-148.9°C por un período de 30 minutos para facilitar la extracción del espécimen, se introduce papel filtro en el fondo. Al introducir la mezcla dentro del molde se debe emparejar con una espátula aplicando 15 golpes alrededor del perímetro y 10 en su interior nivelando finalmente la superficie del material, se coloca otro papel filtro sobre la superficie de la mezcla y se aplican 50 o 75 golpes según se especifique por cada cara, de acuerdo con el tránsito de diseño, empleando para ello el martillo de compactación. Después de la

compactación, se retira la base y se deja enfriar la muestra al aire, para luego ser desmoldado.

1.5 SELECCIÓN DE LA MEZCLA

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado: vacíos de aire (V_a); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenos con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}) proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

1.5.1 Propiedades volumétricas

El fin de los análisis volumétricos es la estimación de contenido de asfalto de la mezcla objeto de diseño, lo cual involucra calcular:

Gravedad específica efectiva Bulk del agregado (G_{sb}): relación de la masa en estado seco (o el peso seco en el aire) de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables e impermeables, y la masa de volumen igual de agua.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}}$$

Ecuación: 4

Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}): relación entre la masa en estado seco (o peso en el aire) de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables no llenos con asfalto y los impermeables, o sea excluyendo los vacíos permeables al asfalto, y la masa de un igual volumen de agua.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Ecuación: 5

Asfalto absorbido (Pba): volumen de ligante asfáltico en una mezcla asfáltica que ha sido absorbido en los poros de las partículas de agregado.

$$P_{ba} = \frac{G_B (G_{se} - G_{sb})}{G_{sb} G_{se}} * 100$$

Ecuación: 6

Contenido de asfalto efectivo Pbe: contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas de agregado.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} P_s}{100}$$

Ecuación: 7

Vacíos en el agregado mineral VMA: volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} P_s}{G_{sb}}$$

Ecuación: 8

Vacíos de aire, Va: Volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas del agregado en una mezcla de pavimento compactado, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla.

$$V_a = \frac{G_{mm} G_{mb}}{G_{mm}} * 100$$

Ecuación: 9

Vacíos llenos con asfalto, VFA: porción del porcentaje de volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo, se expresa como la porción de $(VMA - V_a)$ entre VMA.

$$VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM} * 100$$

Ecuación: 10

Relación de polvo:

$$R.P. = \frac{P_{0.075}}{P_{b\epsilon}}$$

Ecuación: 11

1.5.2 Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto, primero se determina el contenido de asfalto para el cual el contenido de vacíos es de 4%. Luego, se evalúa todas las propiedades volumétricas calculadas y medidas (VFA y VMA) para este contenido de asfalto y se compara con los criterios de diseño. Si cumple con todos los criterios exigidos, este será el contenido de diseño de asfalto.

2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MEZCLA

La mezcla asfáltica presenta un comportamiento mecánico complejo, debido a las características visco-elásticas proporcionadas por el asfalto, como consecuencia de lo anterior la respuesta de la mezcla asfáltica cuando es sometida a la aplicación de un esfuerzo es influenciada por la temperatura, el nivel de la carga y la duración de dicha carga.

Con el objetivo de caracterizar el desempeño de la mezcla se describe a continuación dos modelos basados en la experiencia de laboratorios para la predicción del comportamiento mecánico y dos ensayos realizados en laboratorio.

2.1 RIGIDEZ

Se define como rigidez, la relación entre tensión y deformación a una temperatura y tiempo de carga dados, está en función de la granulometría del árido, rigidez del betón, grado de compactación, sensibilidad al agua y contenido de asfalto. La rigidez de las mezclas asfálticas se evalúa calculando el módulo de rigidez dinámico, ya que esta propiedad es importante para evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla, se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos.

Debido a que los objetivos de la investigación no alcanzan a realizar los ensayos para el cálculo de la rigidez, esta se estimó por fórmulas por medio del modelo de Witczak y Fonseca.

Ensayos aplicando carga axial, carga cortante son utilizados en laboratorio para el cálculo de la rigidez de las probetas, además, ensayo como el esfuerzo a tracción indirecta y tensión a la flexión también caracterizan la rigidez de las mezclas. En

estos ensayos se aplica la carga de varias maneras, por ejemplo, cargas repetidas, cargas dinámicas y cargas constantes que hacen fluir las probetas.

2.2 RESISTENCIA A LA FATIGA

Se entiende por resistencia a la fatiga la habilidad de la mezcla a flexionar repetidamente sin romperse.

Durante la vida en servicio del pavimento, pueden ocurrir dos tipos de falla en la estructura del firme, una falla funcional que hace que el vehículo no logre desplazarse de una manera segura ni cómoda y una falla estructural que está asociada con la pérdida de cohesión de algunas capas de pavimento haciendo que éste no soporte las cargas a las está sometido. La falla estructural se presenta cuando ocurre fatiga, es decir, cuando el pavimento es sometido a las sollicitaciones cíclicas generadas por las ruedas de los automóviles, sufriendo una serie de deformaciones en las capas de mezclas bituminosas que se transforman en esfuerzos de tracción. La acumulación de estas tensiones tangenciales puede dar origen y propagación de micro-fisuras que con el tiempo se vuelven fisuras que se propagan a lo largo de las caras de los áridos y provocan la reducción de la rigidez del pavimento.

Estos fenómenos que se producen en el pavimento durante su funcionamiento son modelados mediante ensayos de fatiga en el laboratorio en donde se predice el esfuerzo admisible a tracción de las mezclas asfálticas y se evalúa el esfuerzo admisible a tensión para cierto número de repeticiones de carga, dichos laboratorios han dado como resultado que la relación entre la deformación, producida por la sollicitación, y la vida en fatiga representada por el número de sollicitaciones está relacionadas por la siguiente expresión:

$$N = K_1 * \varepsilon^{K_2}$$

Ecuación: 12

Donde:

N : Representa el número de ciclos de carga hasta la fatiga del material al nivel de deformación ε

ε : Deformación unitaria de tracción [$\mu\text{m}/\text{m}$]

K_1, K_2 : Constantes que describen el comportamiento a fatiga del material

Estudios realizados para establecer qué parámetros de la mezcla que intervienen en la determinación de los valores K_1 y K_2 dan como resultado que estos valores son afectados principalmente por el modulo dinámico de la mezcla, el contenido de ligante, la viscosidad del ligante, la granulometría y naturaleza del agregado, el contenido de vacíos y la temperatura del pavimento.

El concepto de daño acumulado en cada punto a lo largo de la carretera, propuesto por Miner en 1945, se utiliza para predecir el fracturamiento por fatiga debido al paso de los vehículos, según este concepto, el número permisible de repeticiones de carga está relacionado con el valor de la deformación por tensión en la parte inferior de la capa asfáltica.

Ensayos como compresión simple sin soporte lateral, resistencia a la flexo-tracción en vigas se utilizan en el laboratorio con el fin de evaluar el comportamiento dinámico de las probetas. Las cargas son aplicadas en ciclos en compresión con una onda de tipo senoidal.

2.3 DEFORMACIÓN PLÁSTICA

La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas. Las deformaciones plásticas en capas de rodadura son aquellos canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento.

Las mezclas asfálticas no regresan a su forma original después muchas repeticiones de carga, ya que el material experimenta cambios termodinámicos irreversibles al adquirir mayor energía potencial elástica. Se visualiza cuando al escoger una sección transversal de la superficie de la vía, esta no va a ocupar su posición original (ver Figura 2.1). En una capa de concreto asfáltico, la deformación plástica representa la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento, y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas. Espesores delgados de pavimento, reducción volumétrica de material, altas temperaturas, son unas de las causas que producen las deformaciones plásticas en los firmes.

2.3.1 Tipos de deformaciones plásticas

Existen dos tipos de fallo en la estructura del pavimento por deformación plástica, fallo en la subrasante, ocurre a causa de excesivos esfuerzos repetidos en las capas inferiores, es decir, el pavimento no tiene suficiente fuerza para reducir el esfuerzo aplicado y fallo en la capa asfáltica producto de la escases de capacidad portante de cargas pesadas. En esta última falla, la mezcla asfáltica va acumulando deformaciones permanentes plásticas y va tender a formar una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla. Cabe citar

que en la primera falla mencionada las deformaciones ocurren en las capas inferiores. En la Figura 2-1 se muestra las deformaciones plásticas por fallas en la mezcla asfáltica.

Figura 2-1 Deformación plástica en la capa asfáltica



Fuente: Libro Alejandro Padilla Rodríguez

2.3.2 Agentes que participan en la formación de deformaciones plásticas

Numerosos agentes intervienen en la formación de roderas, desde los componentes de la mezcla asfáltica como el agregado y el bitumen hasta la naturaleza misma como lo es la temperatura del medio ambiente y el agua. La forma angular, grandes tamaños y textura rugosa de los agregados así como la granulometría densa son características deseables en los firmes ya que evitan la formación de deformaciones permanentes.

Las altas temperaturas, el agua y el bitumen son agentes que de igual manera interviene sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Ligantes duros, como asfalto con baja penetración o asfaltos consistentes, son recomendables utilizarlos en climas cálidos ya que tiende a un mejor comportamiento como sólido elástico a elevadas temperaturas. Finalmente otro agente que puede ser considerado en la fase inicial del diseño o como parte del proceso de evaluación de las mezclas es el agua, este agente puede aumentar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Cuando la estructura de pavimento se ve modificada debido al

ingreso a esta de humedad, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

2.3.3 Ensayo para caracterizar las deformaciones plásticas

Para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, se determina la resistencia y deformación empleando el aparato Marshall. Este ensayo tiene gran ventaja ya que su procedimiento está estandarizado. Además del ensayo con el aparato Marshall existe el ensayo Wheel tracking test, donde es sometida una probeta de la mezcla asfáltica al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. En la Figura 2-2 se visualiza el ensayo para determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica.

Figura 2-2 Wheel tracking test



Fuente: <http://www.mastrad.com/wt2.jpg>

2.4 SENSIBILIDAD AL AGUA

La influencia destructiva de la humedad ha sido reconocida por décadas. Durante este tiempo se han estudiado los mecanismos de la humedad que causan el deterioro del pavimento, los cuales son: presión de poros del agua en los huecos de la mezcla debido a las repeticiones de carga, diferencias térmicas que producen expansión-contracción por formación de hielo, ciclos de congelamiento-deshielo, de igual manera, como desprendimiento del asfalto por efecto del agua en la mezcla, a temperaturas entre moderadas y altas, interacción agua-vapor con el mástico asfalto-filler y las interfaces de los áridos más grandes son causas del deterioro. Las mezclas dañadas por efecto de la humedad pierden cohesión y reducen su vida útil acelerando el proceso de desfiguración del pavimento.

Siendo el agua uno de los agentes naturales más nocivos en el mantenimiento de la integridad en las propiedades físicas y mecánicas de los pavimentos durante su vida útil, se realiza el ensayo con la finalidad de abordar el efecto de la acción del agua en mezclas asfálticas sobre condiciones de humedad inducida. La sensibilidad se evalúa mediante el cociente entre la resistencia a tracción indirecta de probetas que han sido acondicionadas en agua y probetas no acondicionadas. La resistencia promedio a tracción indirecta de las probetas sometidas a curado húmedo deberá tener un valor mínimo según lo especifique la norma para diseño de pavimentos del valor promedio alcanzado por las probetas curadas en condición seca. Si no alcanza este valor, se deberá incrementar la adhesividad, empleando un aditivo mejorador de adherencia y/o un llenante mineral apropiado.

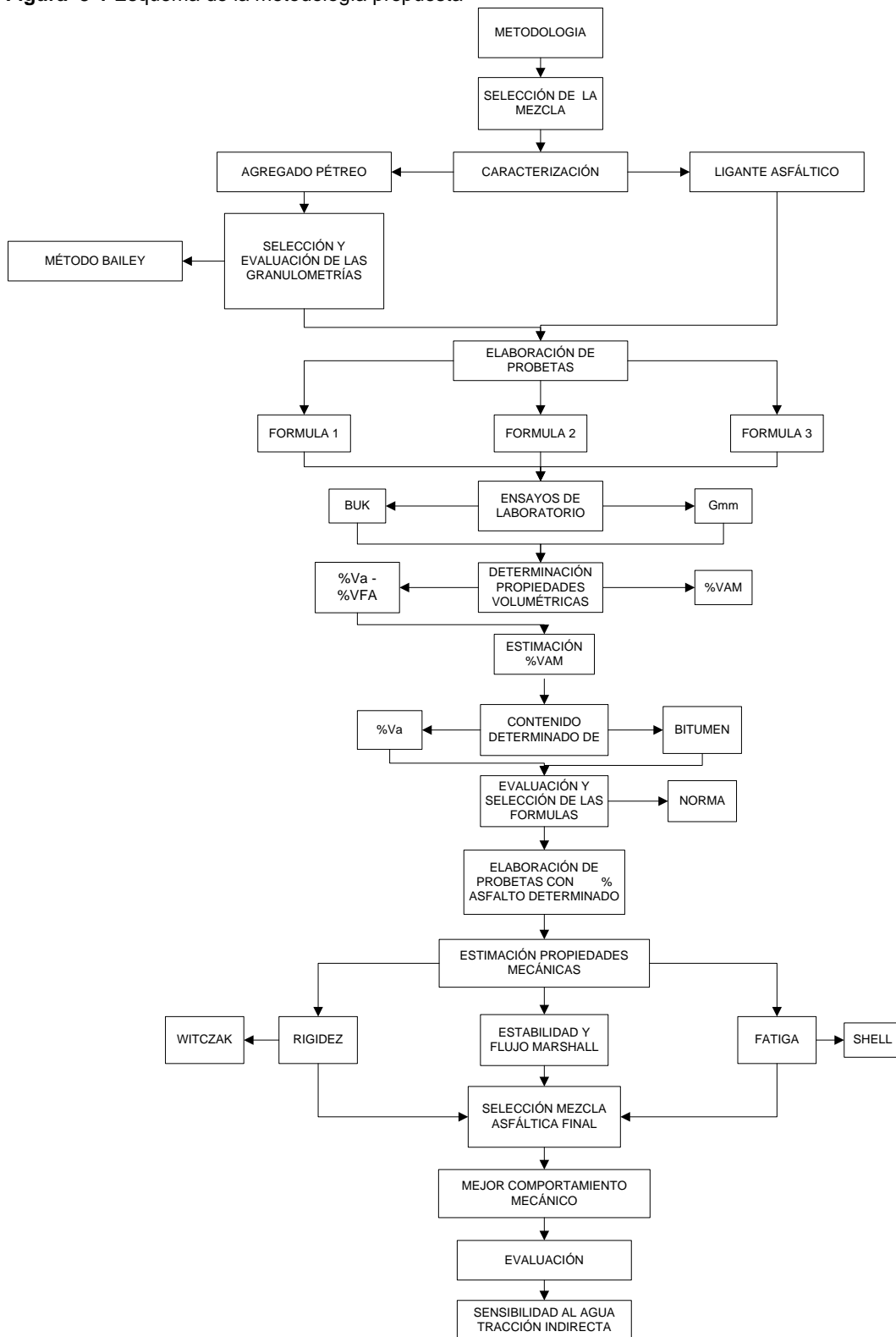
3 METODOLOGÍA

El método de formulación de mezclas bituminosas que se propone busca facilitar y optimizar la selección de la mezcla. Es importante cumplir con las especificaciones para la selección del agregado pétreo y el ligante asfáltico, una vez caracterizado el material se procede a seleccionar tres granulometrías con diferente comportamiento dentro de las franjas granulométricas de la mezcla seleccionada, a cada granulometría se le define la estructura del esqueleto granular evaluando el empaquetamiento de los agregados, utilizando los parámetros propuestos por el método Bailey. Luego se elaboran probetas con dos contenidos de asfalto para cada granulometría, (se fabrican dos briquetas por contenido de asfalto). Se les realizarán los ensayos correspondientes para el cálculo de las propiedades volumétricas con las cuales se halla la línea de tendencia de la variación de vacíos y vacíos llenos con asfalto, y se procede a estimar la curva de vacíos obtenida en el agregado mineral utilizando la información anterior.

Con base en estas gráficas se selecciona el contenido obtenido de asfalto para cada esqueleto granular y se elaboran probetas con este contenido, se verifica que las propiedades calculadas para el contenido de asfalto óptimo se encuentren dentro de los rangos establecidos por la norma, a las fórmulas que cumplan con dichos criterios se les realiza la caracterización mecánica realizando el ensayo de estabilidad y flujo, y aplicando fórmulas de predicción del módulo de rigidez dinámico a cada mezcla para hacer la evaluación de fátiga por deformación y esfuerzo utilizando los modelos de fracturamiento por fátiga propuestos por la Compañía Shell. La selección de la mezcla se realiza tomando como referencia las propiedades mecánicas evaluadas. A la mezcla seleccionada se le realiza un último ensayo que es sensibilidad al agua para verificar la necesidad de utilizar mejoradores de adherencia.

A continuación se detalla el método de formulación de mezclas bituminosas.

Figura 3-1 Esquema de la metodología propuesta



Fuente: Elaboración propia.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

El agregado pétreo utilizado para la elaboración de mezclas asfálticas debe cumplir con las siguientes especificaciones según el Instituto Nacional de Vías.

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas agregado pétreo.

ENSAYO	NORMA	
Análisis granulométrico de agregado grueso y fino	INV. E-213	-
Peso específico y absorción de agregado fino	INV. E-222	-
Peso específico y absorción agregado grueso	INV. E-223	-
Resistencia al desgaste de los agregados	INV. E-218	Máx 25%
Partículas Fracturas	INV. E-227	85/70
Índice de alargamiento y aplanamiento	INV. E-230	Máx 10%
Equivalente de arena	INV. E-133	Min. 50%

Fuente: Elaboración propia.

El asfalto deberá cumplir con las especificaciones en función de la mezcla a diseñar, se deberá tener en cuenta el nivel de tránsito y la temperatura media anual de la región según las Tabla 1.3 y Tabla 1.4.

3.2 TIPO DE MEZCLA

Se define el tipo de mezcla densa en caliente que se desea diseñar, según la especificación.

En la Tabla 3.2 se definen los tipos de mezcla asfálticas en caliente.

Tabla 3.2 Límites granulométricos para las diferentes mezclas

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm/U.S. Standard)									
		37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
		% PASA									
Densa	MDC-1		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-2			100	80-95	70-88	49-65	29-46	14-26	8-17	4-8
	MDC-3					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semidensa	MSC-1		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-2			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-0	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-1		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto módulo	MAM		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9

Fuente: Mezclas asfálticas en caliente (Artículo 450-07)

3.2.1 Selección y evaluación de las granulometrías

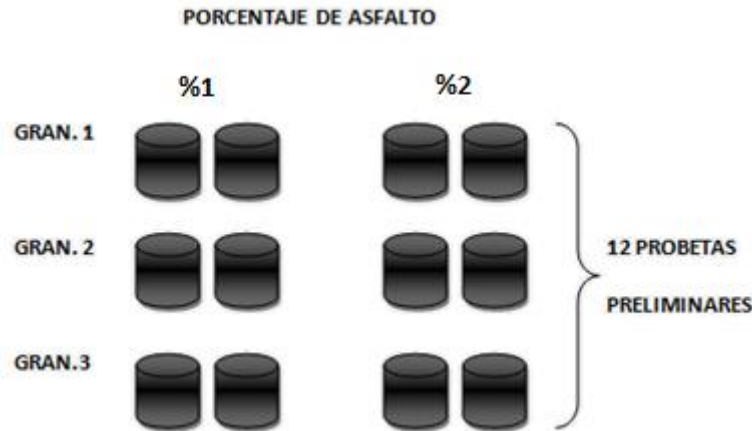
Se establecen tres granulometrías que se encuentren dentro de las franjas seleccionadas según el tipo de mezcla que se desee diseñar.

Se calculan los coeficientes propuestos por Bailey para evaluar el empaquetamiento de los agregados, calculando para cada granulometría CA, FAC, FAF. En la Tabla1.2, se recomiendan rangos para estos coeficientes, siendo una ayuda a la hora de seleccionar las granulometrías.

3.3 ELABORACIÓN DE PROBETAS

Para cada una de las granulometrías escogidas se elaboran probetas con dos porcentajes de asfalto, las probetas se elaboran teniendo en cuenta la formulación Marshall para mezclas asfálticas. En la Figura3-1, se esquematiza las probetas a realizar en la primera etapa.

Figura 3-2 Probetas preliminares



Fuente: Elaboración propia.

El diseño Marshall es un método ampliamente utilizado en el diseño de mezclas asfálticas en caliente, por experiencia se conoce el rango en el cual se encuentra el porcentaje óptimo de asfalto para cada mezcla. De esta manera se escogen los dos porcentajes de asfalto a utilizar para cada par de probetas.

3.4 ENSAYOS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS

Con el método de diseño Marshall las briquetas se someten a ensayos con el propósito de caracterizar las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas.

3.4.1 Gravedad específica Bulk

El peso específico Bulk o la densidad Bulk es la relación entre el peso de la briqueta en aire y el volumen de la masa compactada incluyendo los vacíos permeables.

El ensayo se realiza con base en la normatividad del Instituto Nacional de Vías Especificación 733 (I.N.V.E. E – 733 – 07).

$$Bulk (Gmb) = \frac{A}{B - C} * k$$

Ecuación: 13

Donde:

A: Peso de la probeta seca en el aire

B: Peso de la briqueta en aire saturada superficialmente seca

C: Peso de la briqueta en el agua

K: Es una constante que depende de la temperatura del agua a la cual se realizó el ensayo.

3.4.2 Gravedad máxima teórica

Se define como la relación entre una masa dada de mezcla sin compactar, sin tener en cuenta vacíos y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura.

Se realiza el ensayo con base en la normatividad del Instituto Nacional de Vías Especificación 735-07.

$$Gmm = \frac{A}{A + D - E}$$

Ecuación: 14

Donde:

A: Masa en el aire de la muestra seca, g

D: Masa del recipiente lleno con agua a 25° C, g

E : Masa del recipiente lleno con agua y muestra a 25° C, g

3.5 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS

A cada una de las probetas se les determinan las siguientes propiedades:

Contenido de vacíos de aire en la mezcla (V_a).

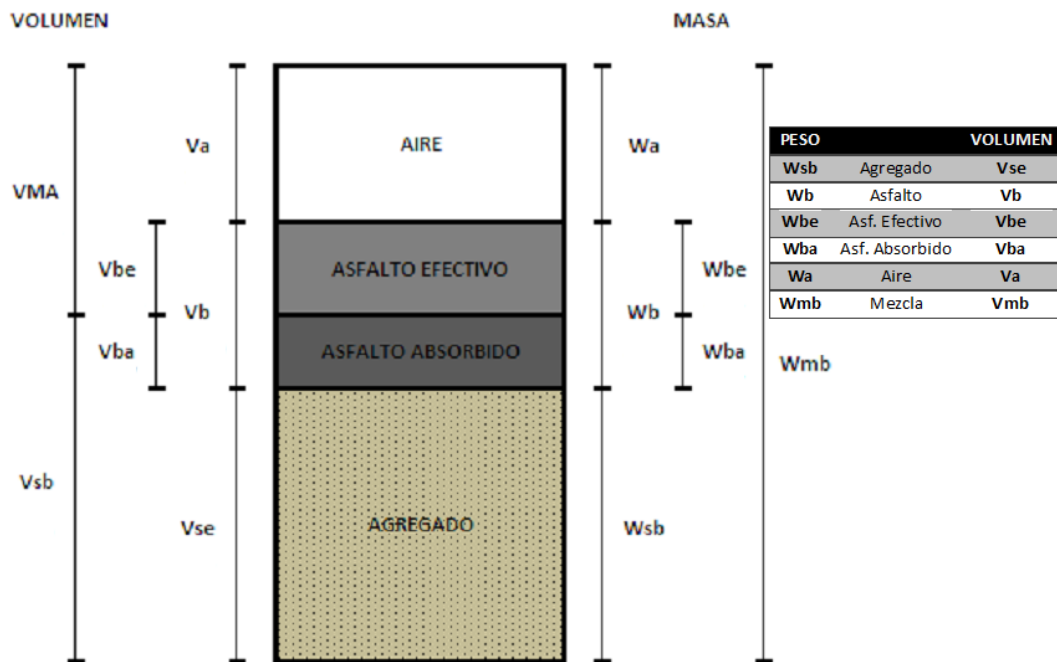
Contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM).

Contenido de vacíos llenos con asfalto (VFA).

Contenido de efectivo de asfalto en la mezcla.

Relación Filler/Asfalto Efectivo

Figura 3-3 Relaciones volumétricas y gravimétricas



Fuente: Elaboración propia.

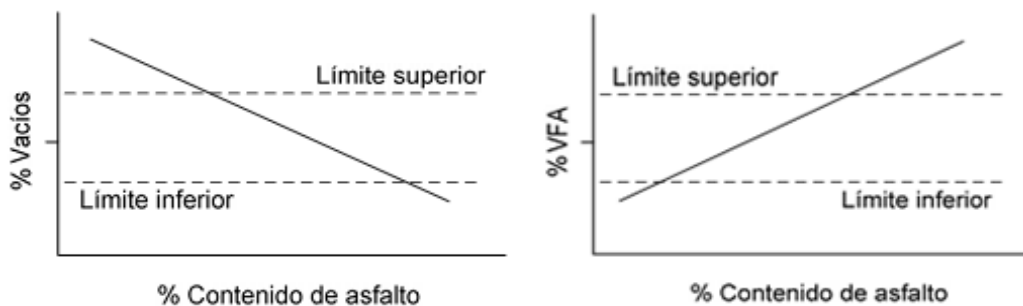
3.6 VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS

Las propiedades volumétricas varían en función del asfalto. Los vacíos con aire disminuyen al aumentar el contenido de asfalto, y los VFA aumentan, en la Figura 3-4 se observa este comportamiento, los VAM generalmente disminuyen hasta un valor mínimo, y luego aumentan con aumentos en el contenido de asfalto, ver Figura 3-5. Estas propiedades son muy importantes ya que proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

3.6.1 Contenido de vacíos y vacíos llenos con asfalto

Se considera que los vacíos con aire y vacíos llenos con asfalto varían linealmente en función del porcentaje de asfalto. Como se posee información de estas propiedades en dos diferentes contenidos de asfalto, se procede a graficar la línea de tendencia.

Figura 3-4 Relación entre %Va, %VFA y el límite de especificación para el rango de contenido de asfalto

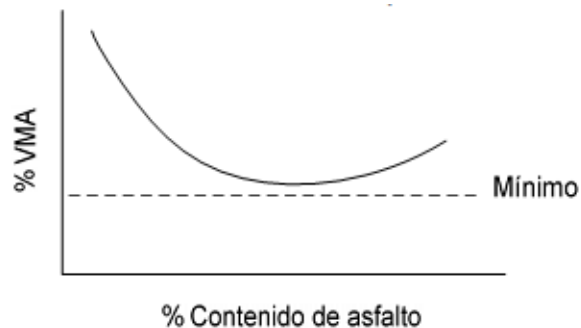


Fuente: (LÓPEZ RAMÍREZ, 2008)

3.6.2 Contenido de vacíos en el agregado mineral

Como la curva de VMA no tiene tendencia lineal, se estima siguiendo el método propuesto en la tesis Desarrollo de ayudas para la formulación de mezclas asfálticas.

Figura 3-5 Relación entre %VAM y el límite de especificación para el rango de contenido de asfalto



Fuente: (LÓPEZ RAMÍREZ, 2008)

Utilizando las relaciones volumétricas y gravimétricas de la mezcla compactada, se estimara la propiedad de vacios en el agregado mineral, utilizando la metodología descrita en los siguientes numerales, donde se describirá un ejemplo para una mayor comprensión.

3.6.2.1 Cálculo de VAM con la ecuación de V_a

Basados en la Figura 3-3, se procede a estimar el valor de los vacos en el agregado mineral, considerando las siguientes variables:

V_{ba}/V_{sb} = este valor se toma de las briquetas que contengan 5% de asfalto.

W_{sb} : se deja fija esta variable, 1Kg

W_b : se varía el contenido de asfalto de 0.2%

W_{mb} : se calcula el peso total de la mezcla con base en el % de asfalto.

% V_a : Se la calcula con la ecuación obtenida de la variación de vacíos.

Ejemplo: calcular los vacíos en el agregado mineral utilizando la ecuación de variación del % V_a , y en base a las relaciones volumétricas y gravimétricas, para la granulometría fina (2).

Datos:

$$G_{sb} = 2.62$$

$$G_b = 1.03$$

$$\text{Contenido de asfalto} = 5.2\%$$

$$W_{sb} = 1\text{Kg}$$

Como se tiene el porcentaje de asfalto presente en la mezcla y el peso total de agregados, se calcula el peso total de la mezcla (W_{mb}).

$$\% \text{Agregados} = 100\% - 5.2\% = 94.8\%$$

$$W_{mb} = \frac{100\%}{94.8\%} = 1.055\text{Kg}$$

$$W_b = 1.055 - 1 = 0.055\text{Kg}$$

Ahora se calculan los volúmenes correspondientes al agregado y al bitumen.

$$V_{sb} = \frac{W_{sb}}{G_{sb}} = \frac{1}{2.62} = 0.382 \text{ cm}^3$$

$$V_b = \frac{W_b}{G_b} = \frac{0.055}{1.03} = 0.053 \text{ cm}^3$$

Con la relación V_{ba}/V_{sb} se calcula V_{ba} :

$$V_{ba} = V_{sb} * \left(\frac{V_{ba}}{V_{sb}} \right) = 0.382 * 0.007 = 0.003 \text{ cm}^3$$

$$V_{be} = V_b - V_{ba} = 0.053 - 0.003 = 0.05 \text{ cm}^3$$

Ahora se halla el volumen de vacíos presente en la mezcla utilizando la ecuación de variación de vacíos llenos con aire

$$\%Va = -2.6468\%Asfalto + 17.616$$

$$\%Va_{(5.2\%asfalto)} = 3.851\%$$

Como se tiene todos los volúmenes que componen la mezcla se calcula Vmb , y VAM .

$$Vmb = \frac{Vsb + Vbe}{100 - \%Va} * 100$$

$$Vmb = \frac{0.382 + 0.5}{100 - 3.851} * 100 = 0.449 \text{ cm}^3$$

$$VAM = Vbe + \frac{(Vmb * \%Va)}{100} = 0.05 + \frac{(0.449 - 3.851)}{100} = 0.068 \text{ cm}^3$$

$$\%VAM = \frac{VAM}{VAM + Vsb} * 100 = \frac{0.068}{0.068 + 0.382} * 100 = 15.085 \%$$

3.6.2.2 Cálculo de VAM con la ecuación de VFA

Basados en el ejemplo anterior se procede a calcular los vacíos en el agregado mineral, esta vez utilizando la ecuación de variación de los vacíos llenos con asfalto.

El cálculo de Wmb , Wb , Vsb , Vb , Vba , Vbe es igual que el descrito en el numeral anterior, para igual contenido de asfalto los valores son iguales, ahora se calcula el $\%VFA$, con la ecuación de variación de los vacíos.

$$\%VFA = 16.736\%Asfalto - 12.263$$

$$\%VFA_{(5.2\%asfalto)} = 74.736 \%$$

$$V_{vacios\ totales} = \frac{Vbe}{\%VFA} * 100 = \frac{0.05}{74.736} * 100 = 0.017 \text{ cm}^3$$

$$\%VAM = \frac{V_{be} + V_a}{V_{be} + V_a + V_{sb}} * 100 = \frac{0.05 + 0.017}{0.05 + 0.017 + 0.382} * 100 = 15.04\%$$

3.6.2.3 VAM estimado

Para estimar los valores de vacíos en el agregado mineral se utiliza el valor promedio de los calculados con la variación del %Va y %VFA, se elabora una tabla donde se varíe el contenido de asfalto. Para cada granulometría se calculará el valor de Vba/Vsb. Con los datos obtenidos se elabora la curva de %VAM vs. %asfalto.

$$\%VAM_{estimado} = \frac{\%VAM_{(Calculado\ con\ \%Va)} + \%VAM_{(Calculado\ con\ \%VFA)}}{2}$$

$$\%VAM_{estimado} = \frac{15.082 + 15.04}{2} = 15.062\%$$

3.6.3 Contenido definitivo de asfalto

Utilizando el contenido de vacíos deseado, se determina el contenido de asfalto definitivo, utilizando la ecuación de variación de los vacíos llenos con aire.

3.6.4 Contenido de vacíos determinado

Con el porcentaje de asfalto determinado en el numeral anterior y con las fórmulas de la mezcla, se calculan las propiedades, %VAM y % VFA.

3.7 SELECCIÓN FÓRMULA DE LA MEZCLA

Se verifica que el %VAM y %VFA calculados en el numeral anterior se encuentren dentro de los rangos establecidos para la mezcla seleccionada. Las mezclas que no cumplan con los criterios se descartan, las que cumplan pasan a una fase de verificación, donde se elaboran probetas con el contenido de asfalto obtenido.

Tabla 3.3 Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente

CARACTERÍSTICA		NORMA INV.	Categoría Tránsito			ALTO MÓDULO
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748	50	75	75	75
Vacíos con aire (Va), %	Rodadura	E-736	3-5	3-5	4-6	-
	Intermedia	o	4-8	4-8	4-7	4-6
	Base	E-799	-	5-9	5-8	-
Vacíos en agregado mineral (VAM), %	Mezclas 0	E-799	≥ 13	≥ 13	≥ 13	-
	Mezclas 1		≥ 14	≥ 14	≥ 14	≥ 14
	Mezclas 2		≥ 15	≥ 15	≥ 15	-
	Mezclas 3		≥ 16	≥ 16	≥ 16	-
% Vacíos llenos de asfalto (VFA), capas de rodadura e intermedia		E-799	65-80	65-78	65-75	63-75
Relación Llenante/Asfalto efectivo, en peso		E-799	0.8-1.2			1.2-1.4

Fuente: Mezclas asfálticas en caliente (Artículo 450-07)

3.8 ELABORACIÓN DE PROBETAS CON EL CONTENIDO DE ASFALTO SELECCIONADO

Se elaboran probetas para las granulometrías seleccionadas, con el porcentaje de asfalto obtenido de las fórmulas. A estas probetas se les realiza los ensayos correspondientes (Bulk y Gmm), para calcular sus propiedades volumétricas (%Va, %VFA y %VAM).

3.9 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FÓRMULA SELECCIONADA

Como se evalúan tres granulometrías simultáneamente, es necesario estimar las propiedades mecánicas de cada una de ellas, ya que de esta manera se podrá

conocer la respuesta mecánica de la capa de rodadura durante su vida en servicio. Se realiza el ensayo Marshall para caracterizar la deformación plástica, propiedades como rigidez y fatiga, se estiman utilizando fórmulas de modelos de laboratorio.

3.9.1 Ensayo de estabilidad y flujo

Con este ensayo se logra determinar la resistencia a la deformación plástica de las briquetas. Este ensayo se realiza con base en la normatividad del Instituto Nacional de Vías Especificación 748-07.

Debe cumplir con los criterios descritos en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Criterios de comprobación de la fórmula de trabajo

CARACTERÍSTICA	NORMA INV.	Categoría Tránsito			ALTO MÓDULO
		NT1	NT2	NT3	
Estabilidad mínima (Kg)	E-748	500	750	900	1500
Flujo (mm)	E-748	2-4	2-4	2-3.5	2-3
Relación Estabilidad/Flujo (Kg/mm)	-	200 a 400	300 a 500	300 a 600	-

Fuente: Mezclas asfálticas en caliente (Artículo 450-07)

3.9.2 Fatiga de mezclas asfálticas

Para la selección de la mezcla óptima es necesario caracterizar las propiedades mecánicas del diseño y de esta manera proporcionar una idea de la vida útil de la mezcla asfáltica y su desempeño a la deformación y esfuerzo. Para ello se propone:

3.9.2.1 Predicción del módulo de rigidez dinámico de las mezclas mediante el modelo de Witczak

Para calcular el módulo de rigidez mecánico de la mezcla se utilizará la ecuación del modelo de Witczak y Fonseca, los cuales propusieron un modelo empírico de predicción del módulo de la mezcla asfáltica. El modelo fue generado a partir de una gran cantidad de datos, aproximadamente 1429 puntos de 149 mezclas asfálticas diferentes. De esta manera se generó un modelo de acuerdo a la granulometría de la misma, características del ligante asfáltico y frecuencia de aplicación de carga, fue posible una buena aproximación del módulo de la mezcla asfáltica.

La ecuación de Witczak presenta la posibilidad para predecir el módulo dinámico de las mezclas asfálticas en un rango de temperaturas (-17.7 a 54.4°C), frecuencia de cargas (0.1 a 25 Hz) y condiciones de envejecimiento con información disponible de las especificaciones de los materiales o diseño volumétrico de la mezcla.

Partiendo de la ecuación de Witczak proveniente de varias curvas maestras que fueron desarrolladas por ensayos de laboratorio, se calcula el módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de su viscosidad, granulometría, porcentaje de vacíos, porcentaje de bitumen y la frecuencia de la carga.

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603310 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(n))}}$$

Ecuación: 15

Donde:

E^* : Modulo Dinámico, [psi]

n : Viscosidad del Asfalto¹, 10^6 [Poises]

f : Frecuencia de la carga, [Hz]

V_a : Contenido de vacios con aire, %

$V_{b\text{eff}}$: Contenido de bitumen efectivo, % en volumen

ρ_{34} : % Acumulado y retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$

ρ_{38} : % Acumulado y retenido en el tamiz $\frac{3}{8}$

ρ_4 : % Acumulado y retenido en el tamiz No. 4

ρ_{200} : % de Filler

3.9.2.2 Cálculo del esfuerzo admisible a tensión

Con el valor del módulo de rigidez como referencia, se calcula el esfuerzo y la deformación por fatiga para cada granulometría, estos dos valores son calculados con un número de repeticiones de falla en la capa de rodadura igual a 1'000 000. Utilizando el modelo de laboratorio propuesto por la Compañía Shell.

Se calcula el esfuerzo admisible para cada una de las mezclas, la que mejor se comporte será aquella que soporte mayor esfuerzo a tensión.

Ecuaciones según SHELL:

A esfuerzo controlado:

$$\varepsilon_t = [36.43PI - 1.82PI(V_b) + 9.71V_b - 24.04] * 10^{-6} \left(\frac{S_m}{5 * 10^9} \right)^{-0.28} \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{-0.2}$$

Ecuación: 16

A deformación controlada:

$$\varepsilon_t = [36.43PI - 1.82PI(V_b) + 9.71V_b - 24.04] * 10^{-6} \left(\frac{S_m}{5 * 10^{10}} \right)^{-0.36} \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{-0.2}$$

Ecuación: 17

Donde:

PI : Índice de Penetración del asfalto

V_b : Volumen de Bitumen

S_m : Módulo de rigidez de la mezcla [N/m^2]

N_f : Número de repeticiones

ε_t : Deformación

3.10 SELECCIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA FINAL

La selección de la mezcla asfáltica final se realiza tomando como referencia las propiedades mecánicas de la mezcla. Se selecciona aquella que tenga un mejor comportamiento.

3.11 DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA

Una vez seleccionada la mezcla asfáltica, se evalúa la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta, con el propósito de medir el efecto del agua sobre la resistencia de las mezclas asfálticas, y verificar la necesidad de utilizar mejoradores de adherencia.

4 EJEMPLO DE APLICACIÓN

A continuación se presenta un ejemplo de diseño de mezcla asfáltica en caliente utilizando la metodología de diseño propuesta. El desarrollo del ejemplo se ilustra siguiendo el mismo orden del Capítulo 3 en el cual se define el procedimiento a seguir para obtener las proporciones de los materiales que componen la mezcla asfáltica evaluando ciertos criterios de desempeño.

Para la ejecución del ejemplo se toma como referencia las normas del Instituto Nacional de Vías.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Se escogió una mezcla MDC-2 para ser utilizada como capa de rodadura, con un nivel de tránsito alto-NT3. El material pétreo es proviene de la cantera de Hidro-Sogamoso en el departamento de Santander, el cual cumple con las especificaciones de la normatividad del Instituto Nacional de Vías para el diseño de mezclas asfálticas. En la Figura 4-1 se observa los tamaños de agregado para la mezcla.

Figura 4-1 Agregados de la mezcla seleccionada



Fuente: Registro fotográfico Propio

El asfalto utilizado para este diseño proviene de la empresa Ecopetrol de la ciudad de Barrancabermeja, siendo este un asfalto convencional con penetración 60-70. En la Tabla 4.1, se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización del bitumen proporcionados por La empresa que facilitó el material. El ligante asfáltico puede ser empleado para la elaboración de briquetas de acuerdo con los lineamientos establecidos por las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS.

Tabla 4-1 Características generales del cemento asfáltico C60-70 proveniente de Barrancabermeja

ENSAYO	MÉTODO	UNIDAD	RESULTADO
Penetración	ASTM D-5	0.1 mm	65
Ductilidad a 25°C	ASTM D-113	cm	> 130
Punto de ablandamiento	ASTM D-95	°C	44.8
Punto de Chispa	ASTM D-92	°C	286
Viscosidad Dinámica a 60°C	ASTM D-4402	Poises	-
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D2042	%	99.6
Índice de Penetración	INV.E-724	-	-1.5
Gravedad Específica	ASTM D-70	-	1.03
Pérdida de Masa, RTFOT	ASTM D-2872	%	0.134

Fuente: Corasfaltos

4.2 TIPO DE MEZCLA

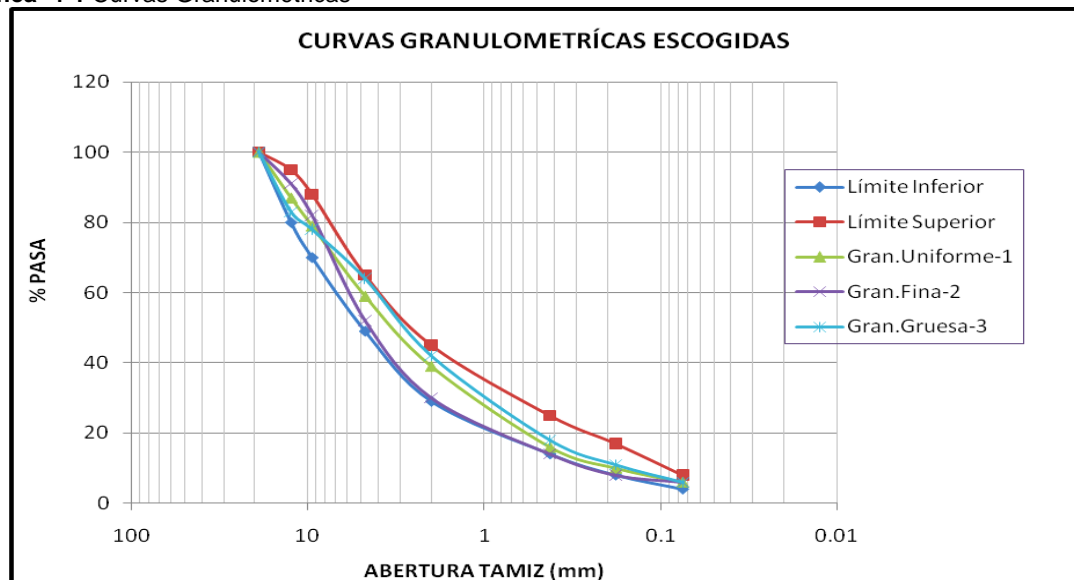
En la siguiente Tabla 4-2 se especifican las franjas granulométricas de la mezcla MDC-2 y las respectivas granulometrías escogidas para la fabricación de probetas.

Tabla 4-2 Límites de la Franja Granulométrica con las granulometrías propuestas

Tamiz	Tamaño (mm)	% Pasa				
		MDC-2		Granulometría Uniforme (1)	Granulometría Fina (2)	Granulometría Gruesa (3)
		C. Inferior	C. Superior			
3/4"	19	100	100	100	100	100
1/2"	12.5	80	95	87	91	83
3/8"	9.5	70	88	79	82	78
#4	4.75	49	65	59	52	64
#10	2	29	45	39	30	42
#40	0.425	14	25	16	14	18
#80	0.18	8	17	10	8	11
#200	0.075	4	8	6	6	6

Fuente: Mezclas asfálticas en caliente (Artículo 450-07)

Gráfica 4-1 Curvas Granulométricas



Fuente: Elaboración Propia

A cada una de las curvas granulométricas seleccionadas se les realizó la evaluación del empaquetamiento de los agregados, utilizando el método Bailey de acuerdo al tamaño máximo nominal de cada granulometría. A partir de lo anterior se determinaron los coeficientes mostrados en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Coeficientes para la evaluación del empaquetamiento de los agregados

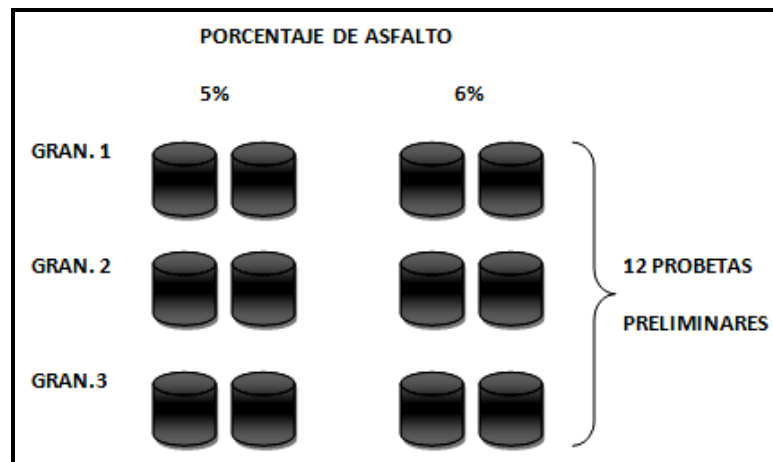
DISEÑO	TMN (mm)	CA	FAC	FAF
Granulometría Uniforme	19	0.434	0.468	0.464
Granulometría Fina	9.5	0.914	0.484	0.498
Granulometría Gruesa	19	0.636	0.482	0.478

Fuente: Elaboración propia

4.3 ELABORACIÓN DE PROBETAS

Por experiencia el porcentaje de asfalto óptimo para una mezcla MDC-2 se encuentra entre el 5% y 6% en peso, se decidió tomar estos valores para la elaboración de las probetas preliminares.

Figura 4-2 Primeras probetas elaboradas



Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento utilizado para la fabricación de las briquetas es el descrito en la norma I.N.V E-748-07. En la Figura 4-3 se ilustra la elaboración,

Figura 4-3 Elaboración de briquetas



Fuente: Registro fotográfico Propio

4.4 ENSAYOS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS

Se calculó las densidades Bulk y Gmm para cada granulometría con diferente porcentaje de asfalto. En la Tabla 4-4, se muestran los resultados de laboratorio.

Tabla 4-4 Densidad Bulk y densidad máxima teórica de las probetas

DISEÑO PRELIMINAR	BULK a 25°C (g/cm ³)		Gmm (g/cm ³)	
	5%	6%	5%	6%
Granulometría Uniforme	2.359	2.396	2.442	2.421
Granulometría Fina	2.335	2.379	2.442	2.421
Granulometría Gruesa	2.332	2.373	4.449	2.428

Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento utilizado para el cálculo de la densidad Bulk y la densidad máxima teórica de las briquetas es el descrito en la norma I.N.V E-733-07 y I.N.V E-735-0

Figura 4-4 Ensayo Densidad Bulk y Gmm



Fuente: Registro fotográfico Propio

4.5 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS

Después de calcular las densidades de las mezclas, se procede a determinar las relaciones volumétricas de cada una de las probetas.

Tabla 4-5 Propiedades volumétricas de las mezclas

ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE I.N.V.E-799 -07							
		Granulometría 1		Granulometría 2		Granulometría 3	
		5%	6%	5%	6%	5%	6%
% Asfalto en la mezcla	Pb=	5	6	5	6	5	6
% Agregado en la mezcla	Ps=	95	94	95	94	95	94
% Agregado retenido tamiz #4	P1=	41	41	48	48	36	36
% Agregado (Pasa #4-retenido #200)	P2=	53	53	46	46	58	58
% Agregado pasa tamiz #200	P3=	6	6	6	6	6	6
Gravedad específica del asfalto	Gb=	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
Gravedad específica del agregado grueso	G1=	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61
Gravedad específica del agregado fino	G2=	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
Gravedad específica del filler (pasa #200)	G3=	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
Gravedad específica Bulk del agregado	Gsb=	2.621	2.621	2.620	2.620	2.621	2.621
Gravedad máxima teórica	Gmm=	2.442	2.421	2.442	2.421	2.449	2.428
Gravedad específica Bulk del espécimen	Gmb=	2.359	2.396	2.335	2.379	2.332	2.373
Gravedad específica del agregado	Gse=	2.632	2.649	2.632	2.649	2.640	2.658
Asfalto absorbido	Pba=	0.170	0.428	0.180	0.438	0.289	0.551
Contenido asfalto efectivo	Pbe=	4.839	5.598	4.829	5.588	4.726	5.482
Vacios en el agregado mineral	VAM=	14.481	14.054	15.329	14.641	15.476	14.896
Vacios de aire	Va=	3.399	1.033	4.382	1.735	4.777	2.265
Vacios llenos de asfalto	VAF=	76.530	92.653	71.416	88.151	69.131	84.793
Relación polvo	R.P.	1.240	1.072	1.243	1.074	1.270	1.094

Fuente: Elaboración Propia

En resumen

Tabla 4-6 Parámetros volumétricos

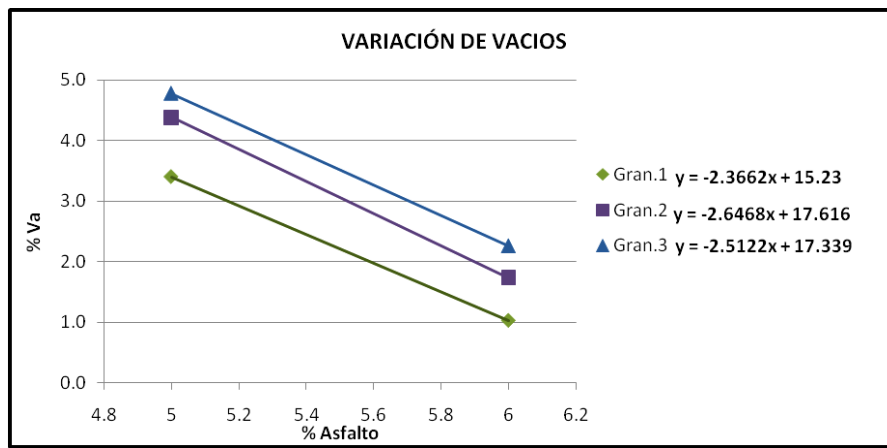
Mezcla / % Asfalto	%Va		%VFA		%VAM	
	5%	6%	5%	6%	5%	6%
Granulometría 1	3.399	1.033	76.53	92.653	14.481	14.054
Granulometría 2	4.382	1.375	71.416	88.151	15.329	14.641
Granulometría 3	4.777	2.265	69.131	71.416	15.476	14.896

Fuente: Elaboración Propia

4.6 VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS

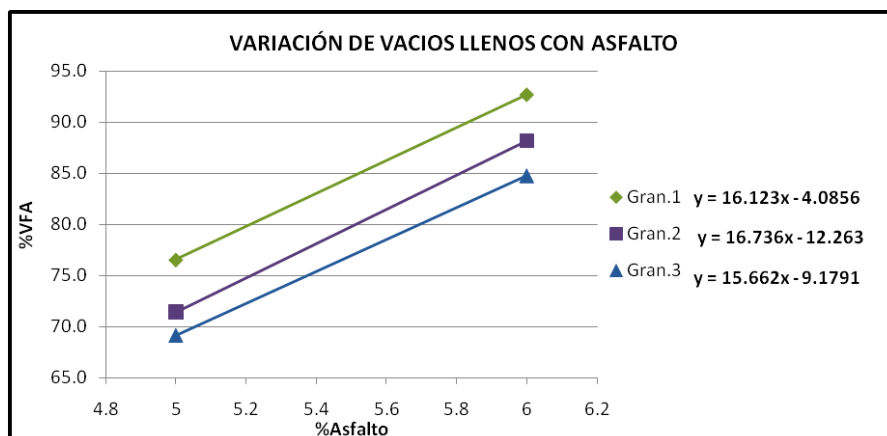
Con los valores obtenidos de las propiedades volumétricas con diferente porcentaje de asfalto, se graficó la variación de vacíos en función del asfalto de forma lineal.

Gráfica 4-2 Variación de los Vacíos en función del contenido de Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

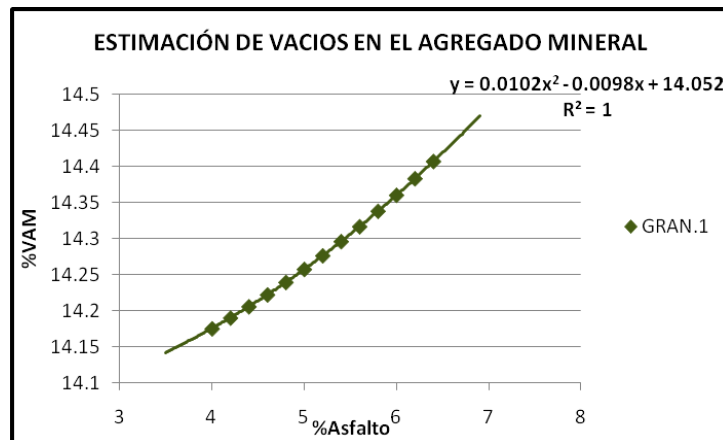
Gráfica 4-3 Variación de Vacíos llenos con asfalto en función del contenido de Bitumen



Fuente: Elaboración Propia

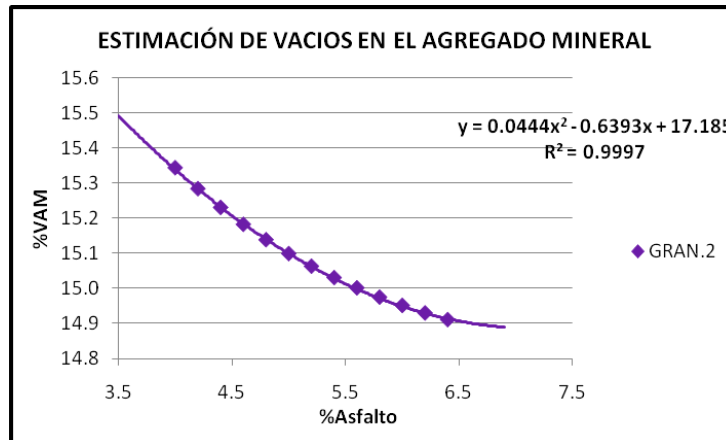
Por medio de las ecuaciones de la variación de vacíos, se predijo el comportamiento de los vacíos en el agregado mineral de cada mezcla propuesta. La predicción de la variación de vacíos en el agregado mineral se realizó con base en el proyecto de grado Desarrollo de ayudas para la formulación de mezclas asfálticas elaborado por Laura Mercedes Martín Garzón. Los cálculos números se encuentran en el Anexo A.

Gráfica 4-4 Variación de vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto



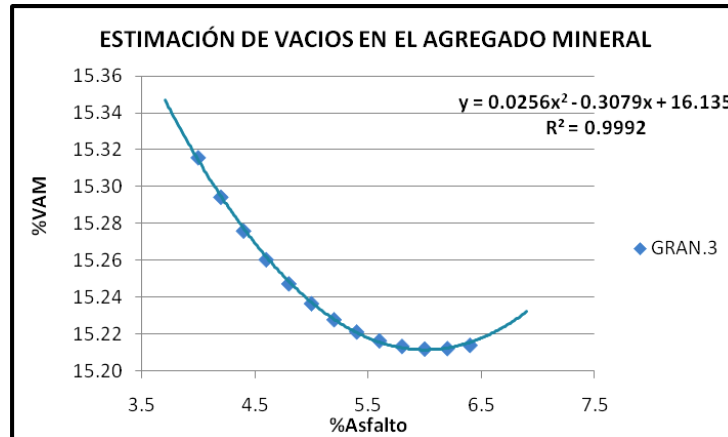
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4-5 Variación de vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4-6 Variación de vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto



Fuente: Elaboración Propia

- **Evaluación de criterios para un porcentaje de asfalto con un contenido de vacíos determinado**

Luego de obtener la variación de los parámetros volumétricos, se calculó el porcentaje de asfalto para 4% de vacíos en la Gráfica 4-2 para cada mezcla. Para cada formulación, con este porcentaje de asfalto obtenido se calculó los vacíos en el agregado mineral y los vacíos llenos con asfalto para ser evaluados según la Tabla 3-3.

Tabla 4-7 Evaluación de parámetros volumétricos

DISEÑOS	% Va	%Asfalto	%VFA	%VMA	Cumple
Granulometría Uniforme	4	4.75	72.49	14.24	No
Granulometría Fina	4	5.15	73.93	15.10	Si
Granulometría Gruesa	4	5.31	73.99	15.45	Si

Fuente: Elaboración Propia

4.7 SELECCIÓN Y ELABORACIÓN DE LA FÓRMULA DE MEZCLA CON EL CONTENIDO DE ASFALTO SELECCIONADO

Las fórmulas que cumplen con los criterios según la Tabla 3-3, son seleccionadas y elaboradas con el porcentaje de asfalto obtenido para un 4 % de vacíos. Para este ejemplo se seleccionó la mezcla de la granulometría fina y granulometría gruesa con un contenido de asfalto del 5.15 % y 5.31% respectivamente.

En la Tabla 4-9, se ilustra las propiedades volumétricas reales de las mezclas seleccionadas.

Tabla 4-8 Propiedades volumétricas de las fórmulas seleccionadas

DISEÑO	%Va	%VFA	%VMA
Granulometría Fina (2)	4.881	69.573	16.042
Granulometría Gruesa (3)	4.143	73.396	15.572

Fuente: Elaboración Propia

4.8 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FÓRMULA SELECCIONADA

Después de haber confirmado las propiedades volumétricas estimadas, se procede a realizar la caracterización mecánica de las mezclas para las granulometrías que cumplan con los criterios según la Tabla 3-3.

4.8.1 Ensayo de estabilidad y flujo

La Tabla 4-9, muestra los resultados obtenidos de los ensayos Marshall realizados a las probetas en el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 4-9 Resultados de Estabilidad y Flujo Marshall

DISEÑO	ESTABILIDAD (Kg)	FLUJO (mm)
GRAN. FINA	1150.45	1.27
GRAN. GRUESA	1067.79	4.38

Fuente: Elaboración Propia

4.8.2 Fatiga de mezclas asfálticas

Para el cálculo de la falla por fatiga de las mezclas asfálticas seleccionadas, se predice el módulo de rigidez dinámico en función del esqueleto granular, la frecuencia de carga, el contenido de vacíos y su viscosidad la cual es calculada a una temperatura de 20°C. El cálculo de la viscosidad se encuentra en el Anexo B.

En la Tabla 4-11, se muestra el módulo de rigidez dinámico, calculado por medio del modelo de Witzak.

Tabla 4-10 Módulo de rigidez dinámico para cada mezcla seleccionada

PARÁMETROS	GRAN. 2 FINA	GRAN. 3 GRUESA
n (poises)	557747.19	557747.19
f (Hz)	10	10
%Va	4.881	4.143
Vbeff (%vol)	11.161	11.43
P ₃₄	0	0
P ₃₈	18	22
P ₄	48	36
P ₂₀₀	6	6
E* (psi)	351145.69	415247.25
E* (Mpa)	2421.06	2863.03

Fuente: Elaboración Propia

Con la predicción del módulo de rigidez dinámico de cada mezcla y con las ecuaciones de SHELL, para fatiga por esfuerzo controlado y fatiga por deformación controlada, se calculó la deformación que se obtuvo para producir una falla con un millón de repeticiones.

En la Tabla 4-12, se muestran los resultados del esfuerzo admisible para cada formulación.

Tabla 4-11 Deformación admisible para un millón de repeticiones

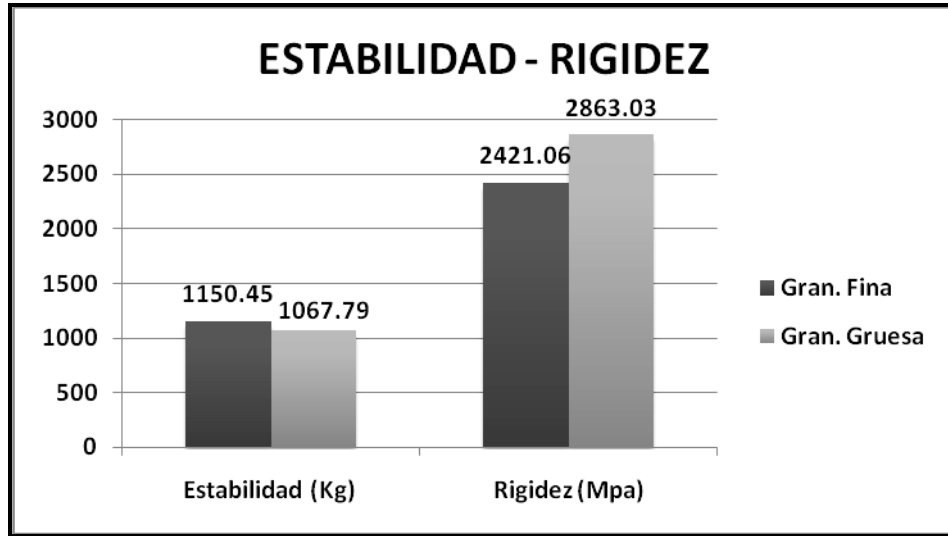
GRANULOMETRÍA 2	Fatiga SHELL Esfuerzo Controlado	$\epsilon_t,$ $N_f=1^6$	80.317E-06
	Fatiga SHELL Deformación Controlada	$\epsilon_t,$ $N_f=1^6$	194.99E-06
GRANULOMETRÍA 3	Fatiga SHELL Esfuerzo Controlado	$\epsilon_t,$ $N_f=1^6$	83.294E-06
	Fatiga SHELL Deformación Controlada	$\epsilon_t,$ $N_f=1^6$	199.52E-06

Fuente: Elaboración Propia

4.9 SELECCIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

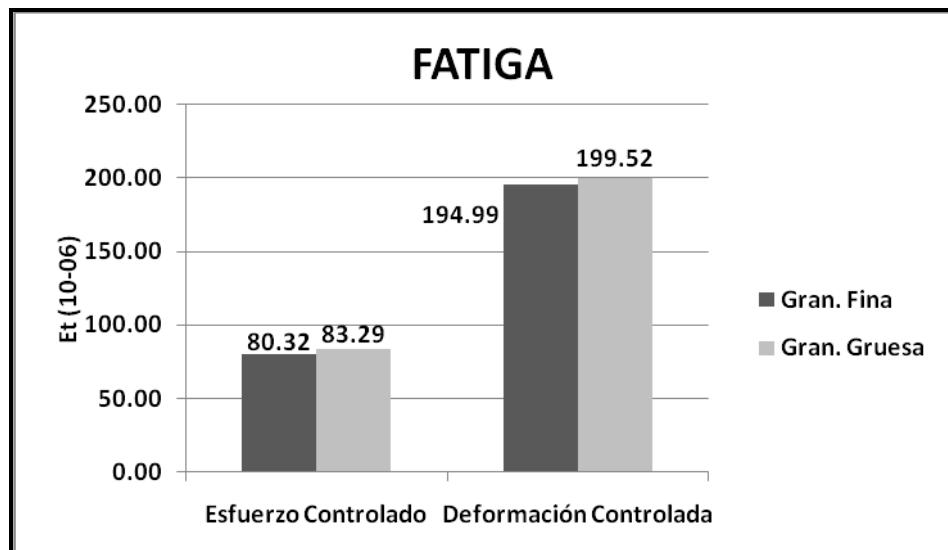
En las siguientes gráficas se muestra el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

Gráfica 4-7 Estabilidad y rigidez de las mezclas asfálticas



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4-8 Comportamiento a la Fatiga de las mezclas asfálticas



Fuente: Elaboración propia

Para la selección de la mezcla asfáltica final, se tiene como criterio el comportamiento mecánico. Se seleccionó la mezcla de granulometría 3 (gruesa),

ya que si se compara con la granulometría 2 (fina), la granulometría 3 presenta un mayor módulo de rigidez dinámico, lo cual hace que se reduzca a una menor magnitud los esfuerzos que llegan a las capas inferiores. Además, la granulometría tres presenta una mayor deformación para producir el fallo por fatiga.

4.10 DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA

Una vez seleccionada la mezcla asfáltica final se procede a realizar el ensayo de sensibilidad al agua por tracción indirecta con el fin de saber si la mezcla seleccionada requiera de mejoradores de adherencia

En Figura 4-5, se ilustra el ensayo, y su respectiva falla por tracción indirecta.

Figura 4-5 Ensayo de sensibilidad al agua por tracción indirecta



Fuente: Registro fotográfico Propio

A continuación se muestra la tabla con los resultados obtenidos del ensayo I.N.V.E-725-07.

Tabla 4-12 Sensibilidad al agua utilizando el ensayo de tracción indirecta

SUBGRUPO SATURADO				
Estabilidad	P (N)	t (mm)	d (mm)	Rt (Kpa)
148.00	5990.09	66.50	101.60	564.41
144.00	5764.90	64.60	101.60	559.17
156.00	6305.35	66.40	101.60	595.01
			Promedio=	572.87
SUBGRUPO SECO				
Estabilidad	P (N)	t (mm)	d (mm)	Rt (Kpa)
183	8242.00	66.83	101.60	772.77
188	8467.19	67.12	101.60	790.45
198	8917.57	65.79	101.60	849.32
			Promedio=	804.18
	RRT=	71.24	%	

Fuente: Elaboración Propia

La mezcla necesita un mejorador de adherencia ya que obtuvo una relación menor al 80%.

Figura 4-6 Efecto del agua sobre las briquetas



Fuente: Registro fotográfico Propio

En la Figura 4-6, se puede observar la falla en las briquetas ensayadas, en la imagen de la derecha se observa el daño que produjo el agua a la mezcla, ya que al infiltrarse dentro de ella ocasionó que los agregados se desprendieran del asfalto, lo cual ocasionó una disminución de resistencia con respecto a las briquetas que no estuvieron expuestas a ella, en la parte derecha de la figura se observa el área de falla de las probetas ensayadas en estado seco, se observa que las partículas de agregado se encuentran cubiertas de una película de asfalto.

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Se probó una metodología que permite una variación a la formulación Marshall, en la que se incluye la granulometría como una variable adicional.
- Se logró validar una metodología de diseño Marshall, con menor número de briquetas, ya que fueron evaluadas tres granulometrías con modificaciones en su esqueleto granular, donde se obtuvieron dos mezclas aptas para el diseño de pavimentos que cumplieran con los criterios volumétricos de diseño.
- Las fórmulas de variación de vacíos obtenidas y calculadas con los dos porcentajes de asfalto inicial, permiten estimar el contenido de asfalto óptimo en la mezcla, lo cual disminuye el número de probetas a fabricar, ya que solo se elaboran probetas con este contenido de asfalto. En consecuencia para realizar un diseño utilizando tres esqueletos granulares, se deberán realizar 18 briquetas como máximo.
- Es muy importante el buen cálculo de las densidades relativas (Bulk, Gmm y del material pétreo), las cuales proporcionan la información de vacíos, con las cuales se realiza la predicción de la curva de variación de los vacíos en el agregado mineral.
- La selección de la mezcla final se determinada teniendo en cuenta la resistencia de la mezcla asfáltica y las propiedades mecánicas de la mezcla calculadas utilizando formulas de laboratorio, lo cual proporciona una idea de su comportamiento real, de esta manera se escoge la mezcla que tenga mejor comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

ESTADO DEL ARTE (DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS).

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo1.pdf

GARNICA ANGUAS, Paul. DELGADO ALAMILLA, Horacio. GÓMEZ LÓPEZ, José Antonio. ROMERO, Sergio Alonso. ALARCÓN ORTA, Humberto Alonso. Aspectos del Diseño Volumétrico de mezclas Asfálticas. Publicación Técnica No 246, Sanfandila, México 2004.

ICONTEC. Normas Técnicas Colombianas [libro]. Bogotá, 2002.

LÓPEZ RAMÍREZ, David. Variabilidad del módulo resiliente de una mezcla asfáltica MDC-2 dentro de la ventana de diseño propuesta por M. Witczak [libro]. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2008.

MARTÍN GARZÓN, Laura Mercedes. Desarrollo de Ayudas para la Formulación de Mezclas Asfálticas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

MEDINA, Luis R. y otros. Cálculo de Leyes de Fatiga d Mezclas Bituminosas. AEPO S.A. España 2001.

**NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM
TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATIONAL RESEARCH COUNCIL.**
Guide for mechanistic-Empirical Desing of New and Rehabilitated Pavement Structures. University Avenue Champaing, Illinois. March 2004

PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Universidad Politécnica de Cataluña, España 2004.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design [Circular], Washington, U.S.A, October 2002

VIAS INSTITUTO NACIONAL DE. Especificaciones Generales de Construcción para Carreteras. Normas para ensayo de Laboratorio. 2007

ANEXOS


ANEXO A. ESTIMACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LOS VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL

Anexo A.1: Estimación de la variación de los vacíos en el agregado mineral para la granulometría uniforme.

ESTIMACION DE LA CURVA DE VARIACIÓN DE LOS VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (GRANULOMETRIA UNIFORME-1)																
													Formula			
% Asfalto	Agregado	Gsb	Gb	Wsb	Wmb	Wb	Vsb	Vb	Vba/Vsb	Vba	Vbe	%Va	Vol. Total	VAM	%VAF calculado	% VAM
4	96	2.621	1.03	1	1.042	0.042	0.382	0.040	0.007	0.003	0.038	5.766	0.445	0.063	59.564	14.260
4.2	95.8	2.621	1.03	1	1.044	0.044	0.382	0.043	0.007	0.003	0.040	5.293	0.445	0.063	62.886	14.261
4.4	95.6	2.621	1.03	1	1.046	0.046	0.382	0.045	0.007	0.003	0.042	4.820	0.445	0.063	66.211	14.264
4.6	95.4	2.621	1.03	1	1.048	0.048	0.382	0.047	0.007	0.003	0.044	4.346	0.445	0.063	69.538	14.268
4.8	95.2	2.621	1.03	1	1.050	0.050	0.382	0.049	0.007	0.003	0.046	3.873	0.445	0.064	72.867	14.275
5	95	2.621	1.03	1	1.053	0.053	0.382	0.051	0.007	0.003	0.048	3.400	0.445	0.064	76.196	14.283
5.2	94.8	2.621	1.03	1	1.055	0.055	0.382	0.053	0.007	0.003	0.051	2.927	0.445	0.064	79.523	14.293
5.4	94.6	2.621	1.03	1	1.057	0.057	0.382	0.055	0.007	0.003	0.053	2.454	0.445	0.064	82.847	14.304
5.6	94.4	2.621	1.03	1	1.059	0.059	0.382	0.058	0.007	0.003	0.055	1.980	0.445	0.064	86.168	14.318
5.8	94.2	2.621	1.03	1	1.062	0.062	0.382	0.060	0.007	0.003	0.057	1.507	0.445	0.064	89.484	14.333
6	94	2.621	1.03	1	1.064	0.064	0.382	0.062	0.007	0.003	0.059	1.034	0.445	0.064	92.794	14.349
6.2	93.8	2.621	1.03	1	1.066	0.066	0.382	0.064	0.007	0.003	0.062	0.561	0.446	0.064	96.097	14.368
6.4	93.6	2.621	1.03	1	1.068	0.068	0.382	0.066	0.007	0.003	0.064	0.088	0.446	0.064	99.391	14.387
													Formula			
% Asfalto	Agregado	Gsb	Gb	Wsb	Wmb	Wb	Vsb	Vb	Vba/Vsb	Vba	Vbe	%VAF	Va totales	Va	%Va calculado	% VAM
4	96	2.621	1.03	1	1.042	0.042	0.382	0.040	0.007	0.003	0.038	60.395	0.063	0.025	5.581	14.091
4.2	95.8	2.621	1.03	1	1.044	0.044	0.382	0.043	0.007	0.003	0.040	63.619	0.063	0.023	5.137	14.120
4.4	95.6	2.621	1.03	1	1.046	0.046	0.382	0.045	0.007	0.003	0.042	66.843	0.063	0.021	4.691	14.148
4.6	95.4	2.621	1.03	1	1.048	0.048	0.382	0.047	0.007	0.003	0.044	70.067	0.063	0.019	4.243	14.176
4.8	95.2	2.621	1.03	1	1.050	0.050	0.382	0.049	0.007	0.003	0.046	73.291	0.063	0.017	3.794	14.204
5	95	2.621	1.03	1	1.053	0.053	0.382	0.051	0.007	0.003	0.048	76.515	0.063	0.015	3.342	14.232
5.2	94.8	2.621	1.03	1	1.055	0.055	0.382	0.053	0.007	0.003	0.051	79.739	0.063	0.013	2.889	14.260
5.4	94.6	2.621	1.03	1	1.057	0.057	0.382	0.055	0.007	0.003	0.053	82.963	0.064	0.011	2.434	14.287
5.6	94.4	2.621	1.03	1	1.059	0.059	0.382	0.058	0.007	0.003	0.055	86.187	0.064	0.009	1.977	14.315
5.8	94.2	2.621	1.03	1	1.062	0.062	0.382	0.060	0.007	0.003	0.057	89.411	0.064	0.007	1.519	14.343
6	94	2.621	1.03	1	1.064	0.064	0.382	0.062	0.007	0.003	0.059	92.635	0.064	0.005	1.058	14.370
6.2	93.8	2.621	1.03	1	1.066	0.066	0.382	0.064	0.007	0.003	0.062	95.859	0.064	0.003	0.596	14.398
6.4	93.6	2.621	1.03	1	1.068	0.068	0.382	0.066	0.007	0.003	0.064	99.083	0.064	0.001	0.132	14.426

% Asfalto	% VAM promedio de 2
4	14.1754
4.2	14.19022
4.4	14.20582
4.6	14.22222
4.8	14.23942
5	14.25744
5.2	14.27627
5.4	14.29593
5.6	14.3164
5.8	14.3377
6	14.35982
6.2	14.38277
6.4	14.40653

ESTIMACIÓN DE VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL



$y = 0.0102x^2 - 0.0098x + 14.052$
 $R^2 = 1$

◆ GRAN.1

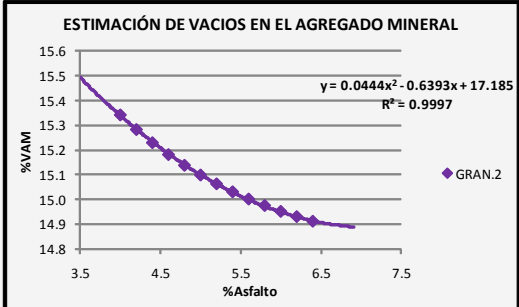
Anexo A.1: Estimación de la variación de los vacíos en el agregado mineral para la granulometría fina.

ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE VARIACIÓN DE LOS VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (GRANULOMETRÍA FINA-2)														Formula				
% Asfalto	Agregado	Gsb	Gb	Wsb	Wmb	Wb	Vsb	Vb	Vba/Vsb	Vba	Vbe	%Va	Vol. Total	VAM	%VAF calculado	% VAM		
4	96	2.620	1.03	1	1.042	0.042	0.382	0.040	0.007	0.003	0.038	7.026	0.451	0.069	54.325	15.382		
4.2	95.8	2.620	1.03	1	1.044	0.044	0.382	0.043	0.007	0.003	0.040	6.497	0.451	0.069	57.612	15.327		
4.4	95.6	2.620	1.03	1	1.046	0.046	0.382	0.045	0.007	0.003	0.042	5.968	0.450	0.069	60.930	15.274		
4.6	95.4	2.620	1.03	1	1.048	0.048	0.382	0.047	0.007	0.003	0.044	5.438	0.450	0.069	64.276	15.223		
4.8	95.2	2.620	1.03	1	1.050	0.050	0.382	0.049	0.007	0.003	0.046	4.909	0.450	0.068	67.649	15.175		
5	95	2.620	1.03	1	1.053	0.053	0.382	0.051	0.007	0.003	0.048	4.380	0.450	0.068	71.048	15.129		
5.2	94.8	2.620	1.03	1	1.055	0.055	0.382	0.053	0.007	0.003	0.050	3.851	0.449	0.068	74.472	15.085		
5.4	94.6	2.620	1.03	1	1.057	0.057	0.382	0.055	0.007	0.003	0.053	3.322	0.449	0.068	77.919	15.043		
5.6	94.4	2.620	1.03	1	1.059	0.059	0.382	0.058	0.007	0.003	0.055	2.792	0.449	0.067	81.388	15.003		
5.8	94.2	2.620	1.03	1	1.062	0.062	0.382	0.060	0.007	0.003	0.057	2.263	0.449	0.067	84.878	14.966		
6	94	2.620	1.03	1	1.064	0.064	0.382	0.062	0.007	0.003	0.059	1.734	0.449	0.067	88.387	14.931		
6.2	93.8	2.620	1.03	1	1.066	0.066	0.382	0.064	0.007	0.003	0.061	1.205	0.448	0.067	91.913	14.898		
6.4	93.6	2.620	1.03	1	1.068	0.068	0.382	0.066	0.007	0.003	0.064	0.676	0.448	0.067	95.456	14.867		

Formula																
% Asfalto	Agregado	Gsb	Gb	Wsb	Wmb	Wb	Vsb	Vb	Vba/Vsb	Vba	Vbe	%VAF	Va totales	Va	%Va calculado	% VAM
4	96	2.620	1.03	1	1.042	0.042	0.382	0.040	0.007	0.003	0.038	54.660	0.069	0.031	6.938	15.303
4.2	95.8	2.620	1.03	1	1.044	0.044	0.382	0.043	0.007	0.003	0.040	58.006	0.069	0.029	6.399	15.239
4.4	95.6	2.620	1.03	1	1.046	0.046	0.382	0.045	0.007	0.003	0.042	61.352	0.068	0.026	5.869	15.185
4.6	95.4	2.620	1.03	1	1.048	0.048	0.382	0.047	0.007	0.003	0.044	64.698	0.068	0.024	5.344	15.139
4.8	95.2	2.620	1.03	1	1.050	0.050	0.382	0.049	0.007	0.003	0.046	68.044	0.068	0.022	4.825	15.100
5	95	2.620	1.03	1	1.053	0.053	0.382	0.051	0.007	0.003	0.048	71.390	0.068	0.019	4.311	15.067
5.2	94.8	2.620	1.03	1	1.055	0.055	0.382	0.053	0.007	0.003	0.050	74.736	0.068	0.017	3.800	15.040
5.4	94.6	2.620	1.03	1	1.057	0.057	0.382	0.055	0.007	0.003	0.053	78.082	0.067	0.015	3.291	15.016
5.6	94.4	2.620	1.03	1	1.059	0.059	0.382	0.058	0.007	0.003	0.055	81.428	0.067	0.013	2.785	14.997
5.8	94.2	2.620	1.03	1	1.062	0.062	0.382	0.060	0.007	0.003	0.057	84.774	0.067	0.010	2.281	14.982
6	94	2.620	1.03	1	1.064	0.064	0.382	0.062	0.007	0.003	0.059	88.120	0.067	0.008	1.778	14.969
6.2	93.8	2.620	1.03	1	1.066	0.066	0.382	0.064	0.007	0.003	0.061	91.466	0.067	0.006	1.277	14.960
6.4	93.6	2.620	1.03	1	1.068	0.068	0.382	0.066	0.007	0.003	0.064	94.812	0.067	0.003	0.776	14.953

% Asfalto	% VAM promedio de 2
4	15.343
4.2	15.283
4.4	15.230
4.6	15.181
4.8	15.138
5	15.098
5.2	15.062
5.4	15.030
5.6	15.000
5.8	14.974
6	14.950
6.2	14.929
6.4	14.910

ESTIMACIÓN DE VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL



$y = 0.0444x^2 - 0.6393x + 17.185$
 $R^2 = 0.9997$

◆ GRAN.2

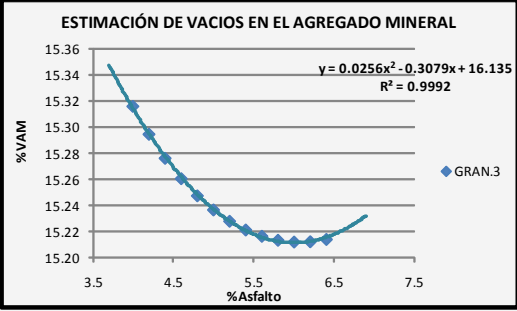
Anexo A.1: Estimación de la variación de los vacíos en el agregado mineral para la granulometría gruesa.

ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE VARIACIÓN DE LOS VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (GRANULOMETRÍA GRUESA-3)																
												Formula				
% Asfalto	% Agregado	Gsb	Gb	Wsb	Wmb	Wb	Vsb	Vb	Vba/Vsb	Vba	Vbe	%Va	Vol. Total	VAM	%VAF calculado	% VAM
4	96	2.621	1.03	1	1.042	0.042	0.382	0.040	0.010	0.004	0.037	7.282	0.451	0.069	52.730	15.405
4.2	95.8	2.621	1.03	1	1.044	0.044	0.382	0.043	0.010	0.004	0.039	6.780	0.451	0.069	55.902	15.374
4.4	95.6	2.621	1.03	1	1.046	0.046	0.382	0.045	0.010	0.004	0.041	6.277	0.451	0.069	59.093	15.345
4.6	95.4	2.621	1.03	1	1.048	0.048	0.382	0.047	0.010	0.004	0.043	5.775	0.451	0.069	62.301	15.318
4.8	95.2	2.621	1.03	1	1.050	0.050	0.382	0.049	0.010	0.004	0.045	5.272	0.450	0.069	65.524	15.293
5	95	2.621	1.03	1	1.053	0.053	0.382	0.051	0.010	0.004	0.047	4.770	0.450	0.069	68.763	15.270
5.2	94.8	2.621	1.03	1	1.055	0.055	0.382	0.053	0.010	0.004	0.049	4.268	0.450	0.069	72.014	15.249
5.4	94.6	2.621	1.03	1	1.057	0.057	0.382	0.055	0.010	0.004	0.052	3.765	0.450	0.069	75.278	15.230
5.6	94.4	2.621	1.03	1	1.059	0.059	0.382	0.058	0.010	0.004	0.054	3.263	0.450	0.068	78.553	15.213
5.8	94.2	2.621	1.03	1	1.062	0.062	0.382	0.060	0.010	0.004	0.056	2.760	0.450	0.068	81.838	15.199
6	94	2.621	1.03	1	1.064	0.064	0.382	0.062	0.010	0.004	0.058	2.258	0.450	0.068	85.131	15.186
6.2	93.8	2.621	1.03	1	1.066	0.066	0.382	0.064	0.010	0.004	0.060	1.756	0.450	0.068	88.431	15.174
6.4	93.6	2.621	1.03	1	1.068	0.068	0.382	0.066	0.010	0.004	0.063	1.253	0.450	0.068	91.736	15.165

												Formula				
% Asfalto	Agregado	Gsb	Gb	Wsb	Wmb	Wb	Vsb	Vb	Vba/Vsb	Vba	Vbe	%VAF	Va totales	Va	%Va calculado	% VAM
4	96	2.621	1.03	1	1.042	0.042	0.382	0.040	0.010	0.004	0.037	53.461	0.069	0.032	7.086	15.227
4.2	95.8	2.621	1.03	1	1.044	0.044	0.382	0.043	0.010	0.004	0.039	56.593	0.068	0.030	6.604	15.215
4.4	95.6	2.621	1.03	1	1.046	0.046	0.382	0.045	0.010	0.004	0.041	59.725	0.068	0.028	6.125	15.207
4.6	95.4	2.621	1.03	1	1.048	0.048	0.382	0.047	0.010	0.004	0.043	62.857	0.068	0.025	5.647	15.203
4.8	95.2	2.621	1.03	1	1.050	0.050	0.382	0.049	0.010	0.004	0.045	65.989	0.068	0.023	5.170	15.202
5	95	2.621	1.03	1	1.053	0.053	0.382	0.051	0.010	0.004	0.047	69.121	0.068	0.021	4.695	15.203
5.2	94.8	2.621	1.03	1	1.055	0.055	0.382	0.053	0.010	0.004	0.049	72.253	0.068	0.019	4.219	15.207
5.4	94.6	2.621	1.03	1	1.057	0.057	0.382	0.055	0.010	0.004	0.052	75.385	0.068	0.017	3.744	15.212
5.6	94.4	2.621	1.03	1	1.059	0.059	0.382	0.058	0.010	0.004	0.054	78.517	0.068	0.015	3.270	15.219
5.8	94.2	2.621	1.03	1	1.062	0.062	0.382	0.060	0.010	0.004	0.056	81.649	0.069	0.013	2.795	15.228
6	94	2.621	1.03	1	1.064	0.064	0.382	0.062	0.010	0.004	0.058	84.781	0.069	0.010	2.319	15.239
6.2	93.8	2.621	1.03	1	1.066	0.066	0.382	0.064	0.010	0.004	0.060	87.913	0.069	0.008	1.843	15.250
6.4	93.6	2.621	1.03	1	1.068	0.068	0.382	0.066	0.010	0.004	0.063	91.045	0.069	0.006	1.367	15.263

% Asfalto	% VAM promedio de 2
4	15.316
4.2	15.294
4.4	15.276
4.6	15.261
4.8	15.247
5	15.237
5.2	15.228
5.4	15.221
5.6	15.216
5.8	15.213
6	15.212
6.2	15.212
6.4	15.214

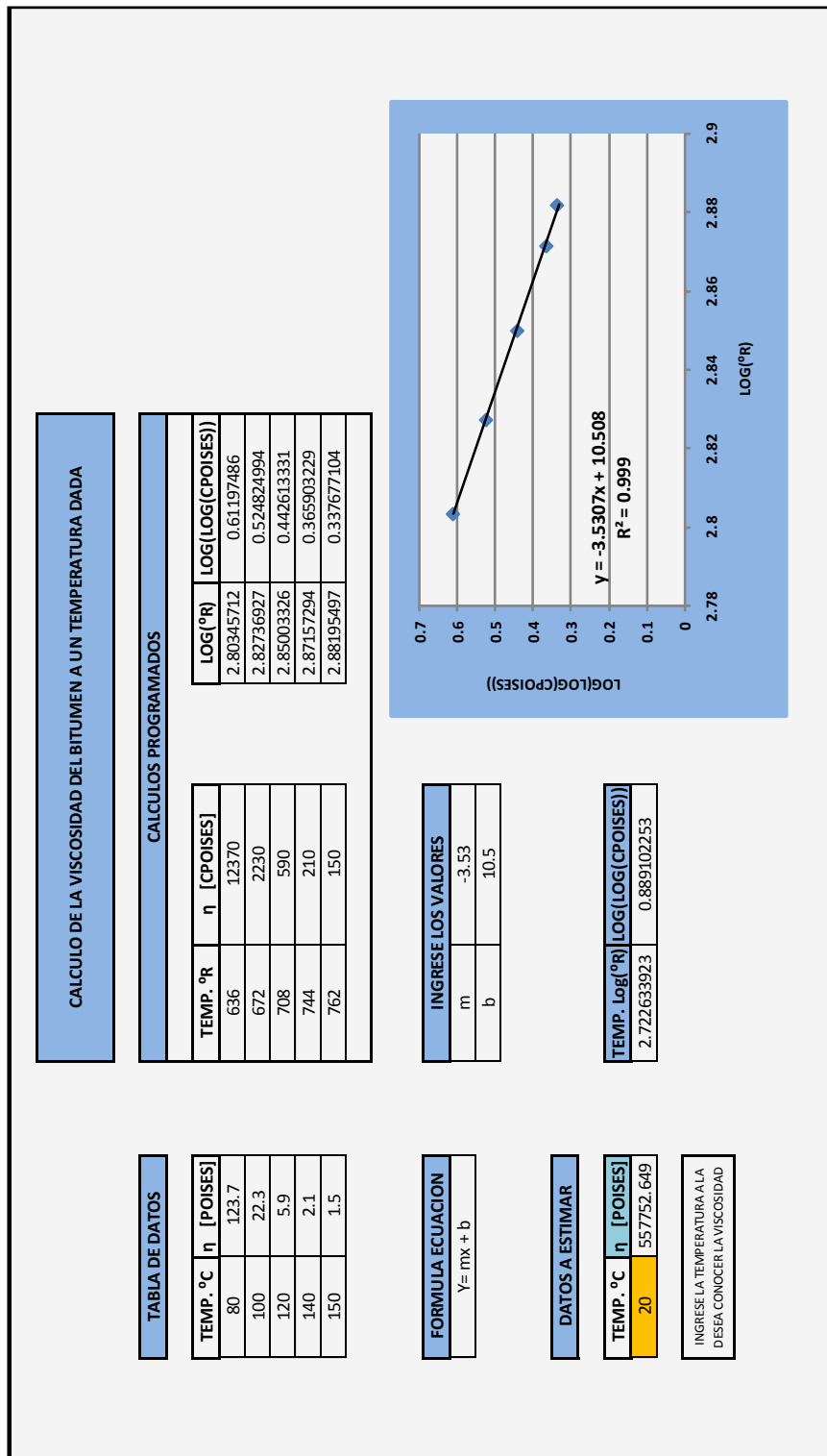
ESTIMACIÓN DE VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL



$y = 0.0256x^2 - 0.3079x + 16.135$
 $R^2 = 0.9992$

ANEXO B. PREDICCIÓN DE LA VISCOSIDAD A LA TEMPERATURA DESEADA

Método para predecir la viscosidad del asfalto a la temperatura deseada.



ANEXO C. FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Cálculo de deformaciones admisibles para cada una de las granulometrías.

	T °C	3.0	20.0	25.0	60.0	3.0	20.0	25.0	60.0	
	f[Hz]	10	10	10	10	5	5	5	5	
	η [POISES]	36622657.30	557747.19	198492.29	857.37	36622657.30	557747.19	198492.29	857.37	
	G-2	E* psi =	1095022.34	351145.69	249345.67	33597.13	965877.03	293221.22	205989.49	27438.60
		E* MPa =	7549.91	2421.06	1719.18	231.64	6659.49	2021.69	1420.25	189.18
	G-3	E* psi =	1309707.75	415247.24	293857.38	38810.12	1153796.07	346125.07	242298.94	31632.00
E* MPa =		9030.12	2863.03	2026.08	267.59	7955.14	2386.45	1670.59	218.09	
GRANULOMETRÍA G-2	Ec.Fatiga Inst.Asf.Esf. Controlado	εt, Nf=1`	8.154E-05	1.0954E-04	1.20E-04	2.01E-04	8.42E-05	1.15E-04	1.26E-04	2.12E-04
	Fatiga SHELL Esfuerzo Controlado	εt, Nf=1`	5.841E-05	8.0317E-05	8.84E-05	1.55E-04	6.05E-05	8.45E-05	9.33E-05	1.64E-04
	Fatiga SHELL Deformacion Controlada	εt, Nf=1`	1.295E-04	1.9499E-04	2.21E-04	4.54E-04	1.35E-04	2.08E-04	2.36E-04	4.88E-04
GRANULOMETRÍA G-3	Ec.Fatiga Inst.Asf.Esf. Controlado	εt, Nf=1`	8.927E-05	1.2027E-04	1.32E-04	2.22E-04	9.23E-05	1.26E-04	1.38E-04	2.35E-04
	Fatiga SHELL Esfuerzo Controlado	εt, Nf=1`	6.038E-05	8.3294E-05	9.18E-05	1.62E-04	6.26E-05	8.77E-05	9.69E-05	1.71E-04
	Fatiga SHELL Deformacion Controlada	εt, Nf=1`	1.319E-04	1.9952E-04	2.26E-04	4.68E-04	1.38E-04	2.13E-04	2.42E-04	5.04E-04
