

**VARIABILIDAD DEL MÓDULO RESILIENTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA  
MDC-2 DENTRO DE LA VENTANA DE DISEÑO PROPUESTA POR  
M. WITCZAK**

**DAVID LÓPEZ RAMÍREZ**

**Trabajo de Grado para optar por el título de  
Especialista en Vías y Transporte**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE  
SEDE MANIZALES**

**Junio de 2008**

**VARIABILIDAD DEL MÓDULO RESILIENTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA  
MDC-2 DENTRO DE LA VENTANA DE DISEÑO PROPUESTA POR  
M. WITCZAK**

**DAVID LÓPEZ RAMÍREZ**

**Modalidad:  
Investigación Monográfica**

**Director:  
ING. OSCAR CORREA CALLE**

**Director Externo:  
ING. LUIS RICARDO VÁSQUEZ VARELA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE  
SEDE MANIZALES**

**Junio de 2008**



---

*A Dios y a mi familia por  
su amor y apoyo en esta  
etapa de mi vida*



---

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece en forma especial al Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela, Director Externo de este trabajo, por su valiosa asesoría y orientación durante su desarrollo.

A cuantos fueran participes en las diversas etapas de este trabajo, su colaboración ha sido de gran valor para mí.



---

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento del módulo resiliente de la mezcla asfáltica en caliente MDC-2 del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INV 450-02), a partir de la variación del contenido de asfalto dentro de la ventana de diseño de mezclas propuesta por M. W. Witczak.

En la ventana de diseño se consideran los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica: vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, vacíos llenos de asfalto y el volumen de asfalto mínimo de acuerdo con las recomendaciones establecidas en el manual MS-2 del Instituto Norteamericano del Asfalto.

El módulo resiliente de la mezcla asfáltica en caliente se mide mediante el ensayo de tensión indirecta para varias temperaturas que permiten evaluar la susceptibilidad térmica del material.

De forma general, se observa la existencia de un contenido de asfalto “óptimo” en términos del mayor módulo resiliente en condiciones isotermas.



---

## ABSTRACT

The aim of this paper is to analyze the behavior of the resilient modulus of a Hot Mix Asphalt (Instituto Nacional de Vías de Colombia, INV 450-02 – MDC-2 specification) with the change of binder content within the AC mix design window proposed by M. W. Witzczak.

In the design window the following mix volumetric parameters are considered: the volume of air voids, the voids in mineral aggregate, the voids that are filled with asphalt, and the minimum volume of binder in accordance with the recommendations set out in the MS-2 manual of the Asphalt Institute.

The resilient modulus of the HMA is measured by the indirect tension test in several temperatures to assess the thermal susceptibility of the material.

In general, there is an “optimal” asphalt content is in terms of the maximum resilient modulus in isothermal conditions.



## ÍNDICE

	PAG
INTRODUCCIÓN	1
1. DELIMITACIÓN DEL TEMA	2
1.1. Alcance	2
1.2. Limitantes	3
1.3. Recursos	3
2. PROBLEMA	5
2.1. Identificación	5
2.2. Título	5
2.3. Planteamiento	5
3. OBJETIVOS	6
3.1. General	6
3.2. Específicos	6
4. MARCO TEÓRICO	7
4.1. ANTECEDENTES	7
4.2. DEFINICIONES CONCEPTUALES	7
4.3. PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS	8
4.3.1. Definiciones	8
4.3.2. Gravedad específica bulk del agregado	12
4.3.3. Gravedad específica efectiva del agregado	12
4.3.4. Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica	13
4.3.5. Absorción del asfalto	14
4.3.6. Contenido de asfalto efectivo	15
4.3.7. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral	15
4.3.8. Porcentaje de vacíos de aire	16



---

4.3.9. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto	17
4.4. MEZCLAS ASFÁLTICAS	18
4.4.1. Componentes de una mezcla asfáltica	19
a. Agregados	19
b. Asfalto	20
c. Vacíos de aire	20
4.4.2. Diseño de mezclas asfálticas	21
4.4.3. Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño	22
a. Pocos vacíos y baja estabilidad	23
b. Pocos vacíos y estabilidad satisfactoria	23
c. Vacíos satisfactorios y baja estabilidad	24
d. Muchos vacíos y estabilidad satisfactoria	24
e. Muchos vacíos y baja estabilidad	25
4.4.4. Selección del diseño final	25
4.4.4.1. Evaluación de la curva de Vacíos en el agregado mineral (VMA)	26
4.4.4.2. Efecto del nivel de compactación	28
4.4.4.3. Efecto de los vacíos de aire	30
4.4.4.4. Efecto de los vacíos llenos de asfalto (VFA – Voids Filled with Asphalt)	31
4.7. CONCEPTO DE VENTANA DE DISEÑO	32
4.6. EL MÓDULO RESILIENTE	33
4.6.1. Ensayo de Tensión Indirecta	35
4.6.2. Equipo UTM (Universal Testing Machine) en ensayo de Tensión Indirecta	36
5. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MEZCLAS	38
5.1. OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES	38
5.2. ENSAYOS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	39



---

5.3. DISEÑO MARSHALL	40
5.3.1. Fórmula de trabajo	40
5.3.2. Peso específico y absorción de agregados	42
5.3.3. Gravedad Específica del Asfalto (Gb)	42
5.3.4. Gravedad Específica Bulk del agregado (Gsb)	42
5.3.5. Gravedad Específica Máxima de la mezcla (Gmm)	43
5.3.6. Gravedad Específica Efectiva del agregado (Gse)	43
5.3.7. Asfalto absorbido	43
5.3.8. Corrección a los valores de la gravedad específica efectiva del agregado y asfalto absorbido	44
5.3.9. Gravedad Específica Bulk y Peso Unitario de la Mezcla Compactada	45
5.3.10. Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto según Método Marshall	47
5.3.11. Posibles daños generados por la elección de la mezcla de diseño	53
5.3.12. Posibilidades de replanteo para la corrección del diseño	55
5.4. POSICIÓN DEL DISEÑO EN LA VENTANA DE DISEÑO PROPUESTA POR M. WITCZAK	57
5.5. MÓDULOS RESILIENTES PARA LAS BRIQUETAS DEL DISEÑO	63
5.6. MÓDULOS RESILIENTES PARA LAS BRIQUETAS CON CONTENIDO DEFINIDO POR MARSHALL Y SU RANGO DE VARIACIÓN	67
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS	78
1. Cronograma detallado de actividades	79
2. Presupuesto	80
3. Anexo fotográfico	82
4. Resultados de ensayos	86



---

## LISTA DE FIGURAS

	PAG
Figura 1. Ilustración de los parámetros de diseño volumétrico	9
Figura 2. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada	10
Figura 3. Relación entre VMA y límite de especificación para el rango de contenido de asfalto	28
Figura 4. Efecto de los esfuerzos de compactación Marshall en VMA y $V_a$	30
Figura 5. Representación de la Ventana de Diseño	33
Figura 6. Deformaciones unitarias bajo cargas repetidas	34
Figura 7. Efecto de los vacíos de aire en varias propiedades de las mezclas asfálticas (Crawford, 1992)	54
Figura 8. Efecto de los vacíos de aire en la durabilidad del pavimento (Crawford, 1992)	54

## LISTA DE GRÁFICOS

	PAG
Gráfico 1. Curva media de norma para trabajo	40
Gráfico 2. Comparación entre línea media INVIAS MDC-2 y línea de Máxima Densidad en el gráfico de Fuller (Superpave)	41
Gráfico 3. Comparación Peso Específico Bulk briquetas SSS y briquetas parafinadas	46
Gráfico 4. Gráfico Peso unitario vs. Contenido de asfalto	49
Gráfico 5. Gráfico Estabilidad vs. Contenido de asfalto	49
Gráfico 6. Gráfico Flujo vs. Contenido de asfalto	49
Gráfico 7. Gráfico Vacíos de aire vs. Contenido de asfalto	49
Gráfico 8. Gráfico Vacíos en agregado mineral vs. Cont. Asfalto	49
Gráfico 9. Gráfico Vacíos llenos de asfalto vs. Cont. Asfalto	49
Gráfico 10. Construcción de la Ventana de Diseño a partir de las especificaciones de vacíos	59



---

Gráfico 11. Ubicación del CA de 5.85% obtenido por Marshall en la Ventana de Diseño	60
Gráfico 12. Ubicación del contenido de asfalto de mejor aceptación a las Normas INVIAS dentro de la Ventana de Diseño	61
Gráfico 13. Rangos límites para CA 5.05% en la Ventana de Diseño	62
Gráfico 14. Variación de la temperatura para todas las briquetas del diseño	64
Gráfico 15. Variación del Módulo Resiliente para las briquetas promedio de cada contenido de asfalto	65
Gráfico 16. Variación del Módulo Resiliente con respecto al contenido de asfalto para una temperatura de 20°C	66
Gráfico 17. Variación del Módulo Resiliente con respecto al contenido de asfalto para una temperatura de 25°C	66
Gráfico 18. Variación del Módulo Resiliente con respecto al contenido de asfalto para una temperatura de 30°C	67
Gráfico 19. Variación de la temperatura para todas las briquetas con contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación	69
Gráfico 20. Variación del Módulo Resiliente para las briquetas promedio con contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación	70
Gráfico 21. Variación del Módulo Resiliente a 20°C para el contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación	71
Gráfico 22. Variación del Módulo Resiliente a 25°C para el contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación	71
Gráfico 23. Variación del Módulo Resiliente a 30°C para el contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación	72

### **LISTA DE CUADROS**

	PAG
Cuadro 1. Criterios Normas INVIAS	51
Cuadro 2. Factores contribuyentes en el daño de la mezcla	53
Cuadro 3. Criterio para %Vb min según el Dnom	58



## LISTA DE TABLAS

	PAG
Tabla 1. Resumen de los ensayos para la recolección de la información	39
Tabla 2. Gradación media para trabajo y cantidades requeridas de material granular para la elaboración de una briqueta	39
Tabla 3. Resultados peso específico y absorción agregados finos y gruesos	42
Tabla 4. Resultados Gravedad Específica Máxima (Ensayo RICE)	43
Tabla 5. Comparación entre los dos tipos de métodos para peso específico bulk	45
Tabla 6. Tabla de ecuaciones volumétricas, estabilidad y flujo de la mezcla para Diseño Marshall	48
Tabla 7. Aceptación de características según Norma INVIAS para un contenido de asfalto de 5.85%	52
Tabla 8. Aceptación de características según Norma INVIAS para un contenido de asfalto de 5.05%	52
Tabla 9. Datos para la ubicación del contenido de asfalto obtenido por Marshall dentro de la Ventana de Diseño	59
Tabla 10. Datos para la ubicación dentro de la Ventana de Diseño de un contenido de asfalto de 5.05%	61
Tabla 11. Datos de los límites del CA de 5.05% a partir de la Ventana de Diseño	62
Tabla 12. Comparación de los límites del CA de 5.05% según INVIAS y rangos de la Ventana de Diseño	62
Tabla 13. Módulos Resilientes de las briquetas del diseño	64
Tabla 14. Promedio Módulos Resilientes de las briquetas del diseño	77
Tabla 15. Módulos Resilientes de las briquetas con contenido óptimo de asfalto y rango de variación	68
Tabla 16. Promedio Módulos Resilientes de las briquetas con contenido óptimo de asfalto y rango de variación	69



---

## LISTA DE FOTOS

	PAG
Foto 1. Disposición de la briqueta en el marco de carga	37
Foto 2. Briqueta de control de temperatura	38

## LISTA DE ANEXOS FOTOGRÁFICOS

	PAG
Foto 1. Martillo mecánico para compactación de briquetas Marshall	82
Foto 2. Aparato Marshall para prueba de estabilidad y flujo	82
Foto 3. Tamices para la realización del análisis granulométrico	83
Foto 4. Material granular separado por tamaños	83
Foto 5. Montaje de la muestra en el ensayo de Densidad Máxima RICE	84
Foto 6. Extracción del aire de la muestra en el ensayo RICE	84
Foto 7. Briquetas de asfalto	85
Foto 8. Ejemplo de un resultado de Módulo Resiliente en pantalla de Computador	85



---

## INTRODUCCIÓN

La construcción de vías es uno de los elementos de más influencia en el desarrollo de un país. Por esta razón es necesario resaltar la importancia de las mezclas asfálticas dentro de la estructura de un pavimento, pues se espera obtener de ellas durabilidad, estabilidad y economía. El diseño de mezclas asfálticas para pavimentos es un tema que incluye la selección y la proporción adecuada de los materiales necesarios para alcanzar las propiedades deseadas en el pavimento una vez se ha terminado su construcción.

De acuerdo con el Manual del Instituto del Asfalto, el objetivo principal del diseño de una mezcla asfáltica es determinar el contenido de asfalto adecuado para proporcionar una mezcla asfáltica durable, con suficiente estabilidad, adecuada trabajabilidad y una cantidad suficiente de vacíos para evitar deficiencias en el comportamiento de la capa asfáltica.

Para evaluar las características volumétricas de la mezcla asfáltica se emplean diferentes parámetros como el volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA), los vacíos llenos de asfaltos (VFA) y el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica compactada ( $V_a$ ). Estos se determinan mediante pruebas como la gravedad específica del agregado mineral ( $G_{sb}$ ), la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada ( $G_{mb}$ ) y la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica ( $G_{mm}$ ).



---

## 1. DELIMITACIÓN DEL TEMA

### 1.1. ALCANCE

Este trabajo pretende determinar, para el rango del contenido de bitumen de una mezcla asfáltica en caliente tipo INVÍAS MDC-2, el cumplimiento de las especificaciones volumétricas al ubicarse dentro de la Ventana de Diseño propuesta por M. Witczak y la variación del Módulo Resiliente de la mezcla así diseñada.

La metodología Marshall se empleará para determinar el contenido de asfalto óptimo de una gradación tipo MDC-2 (Norma INVÍAS 450) realizando pruebas de peso específico y absorción de agregado grueso (I.N.V.E-223) y agregado fino (I.N.V.E-222), y empleando la información del ligante asfáltico proporcionada por el fabricante.

La realización de estos ensayos permite determinar los parámetros volumétricos y construir la Ventana de Diseño que se emplea en la verificación del contenido de asfalto de la mezcla.

Se realizarán pruebas de tensión indirecta (ASTM D-4123) para las briquetas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto para la gradación de la curva media MDC-2 y para aquellas elaboradas con los márgenes de variación de contenido de asfalto del 0.3% establecidos en la norma INVÍAS 450. Asimismo, se realizará el mismo ensayo sobre las briquetas elaboradas en el diseño Marshall.



---

## 1.2. LIMITANTES

Uno de los factores principales que reducen la representatividad del resultado final de esta investigación es el número de ensayos de laboratorio que se pueden realizar. Los ensayos de laboratorio requieren de una gran dedicación de tiempo y esfuerzo. Y aquellos como los de tensión indirecta sobre briquetas de asfalto, son de un costo considerable.

Para el desarrollo del tema planteado se realizará un número suficiente de ensayos para la caracterización de una fuente de agregados del Departamento de Caldas.

## 1.3. RECURSOS

### ***Institucionales:***

Se cuenta con la participación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, al proporcionar sus instalaciones y equipos de laboratorio.

### ***Humanos:***

En primer orden para el desarrollo conceptual se cuenta con la asesoría permanente del Ing. Luís Ricardo Vásquez Varela como Director Externo.

En segunda medida se cuenta con la colaboración del Ing. Oscar Correa Calle como Director del trabajo.

Para la ejecución de los ensayos de laboratorio se cuenta con la asesoría y colaboración de las personas encargadas del laboratorio de materiales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Octavio Villegas Llano y Nelson de Jesús Aricapa.



---

**Económicos:**

La Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales contribuye con la realización de los ensayos de laboratorio. Al final del documento se presenta un cuadro resumen de los costos y una descripción de la forma en que se financiarán. (Anexo No. 2).

**Cronograma:**

El tiempo total para la realización y ejecución del proyecto es de siete meses, donde se considera un mes para la etapa de búsqueda de información y revisión bibliográfica, un mes para la etapa de realización de ensayos y recolección de datos y los restantes cinco meses para la etapa de desarrollo conceptual y redacción del trabajo final. Al final del documento se presenta un cuadro donde se puede apreciar cada una de las etapas y actividades planeadas, así como los tiempos y fechas programadas para las mismas. (Anexo No. 1).

**Bibliografía:**

Los libros y referencias empleados se pueden consultar al final del documento.



---

## **2. PROBLEMA**

### **2.1. IDENTIFICACIÓN**

Uno de los principales problemas en el desempeño de los pavimentos es la falta de resistencia a la deformación plástica, ésta tiene como consecuencia directa la formación de deterioros y ahuellamientos en las estructuras de las vías, lo cual reduce su vida de servicio. Una mezcla débil acumulará deformaciones pequeñas pero permanentes por cada vehículo que pase, formando un ahuellamiento caracterizado por el movimiento hacia abajo y lateral de la superficie del pavimento.

Por lo anterior, algunos pavimentos asfálticos presentan ahuellamiento o agrietamiento de forma prematura bajo condiciones normales de carga, clima, terreno o construcción. Estos pavimentos podrían tener un contenido de asfalto que se encuentran por fuera de los parámetros de diseño y construcción que define la Ventana de Diseño propuesta por M. Witczak, lo cual podría explicar los fenómenos descritos en los pavimentos.

### **2.2. TÍTULO**

Variabilidad del Módulo Resiliente de una Mezcla Asfáltica MDC-2 dentro de la Ventana de Diseño propuesta por M. Witczak.

### **2.3. PLANTEAMIENTO**

Se pretende, con un caso de aplicación al medio local, evaluar el efecto sobre el módulo resiliente de la posición dentro de la Ventana de Diseño del contenido de asfalto y de los márgenes de variación que permite el INVIAS.



---

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. GENERAL

- Establecer la variabilidad del módulo resiliente a 20°C de una mezcla asfáltica dentro de la Ventana de Diseño propuesta por M. Witczak según la metodología del Instituto del Asfalto.

#### 3.2. ESPECÍFICOS

- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente con granulometría de la línea media MDC-2 del INVIAS siguiendo la metodología Marshall.
- Identificar la posición del diseño en la ventana propuesta por M. Witczak empleando el contenido óptimo de asfalto y la tolerancia dada por la norma INVIAS.
- Fabricar una serie de probetas para un contenido óptimo de asfalto y con el rango de tolerancia de la norma.
- Establecer la variación del módulo resiliente de las probetas con diferentes contenidos de asfalto, a diferentes temperaturas, empleando el ensayo de tensión indirecta.
- Evaluar la variabilidad del módulo resiliente a 20°C dentro del rango de aceptación del contenido de asfalto.



---

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. ANTECEDENTES

Este trabajo surge luego de que en XVI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos se presentó el concepto de la Ventana de Diseño para mezclas asfálticas en la conferencia “Fundamentals of Asphalt Mix Design” ofrecida por el Dr. Mathew Witczak.

En general las consideraciones de diseño y construcción siempre se han mantenido separadas. Aunque se ha conocido de esta separación a lo largo de la historia de los pavimentos asfálticos, no se ha hecho un esfuerzo por adaptar los conceptos del método Marshall a las consideraciones de vacíos que difieren en ambos casos, y no se ha considerado un factor de peso en el deterioro de los pavimentos.

### 4.2. DEFINICIONES CONCEPTUALES

Para una mayor comprensión del problema a tratar se definirán los conceptos fundamentales enmarcados dentro de cuatro temas globales:

- Parámetros volumétricos
- Mezclas asfálticas
- Concepto de Ventana de Diseño
- El Módulo Resiliente



---

### 4.3. PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica es el de las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado o, de forma más simple, los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Este numeral describe el análisis volumétrico de la HMA (Hot Mix Asphalt), el cual juega un rol significativo en los procedimientos de diseño de mezclas

Las definiciones, conceptos y fórmulas que se presentan a continuación correspondientes al numeral de Parámetros Volumétricos, son traducción de una parte del Capítulo II del *Manual del Instituto del Asfalto*.

Las propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica compactada [vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenados con asfalto (VFA) y contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ )] proporcionan una indicación del comportamiento probable de la misma. Es necesario entender las definiciones y los procedimientos analíticos descritos en este numeral para poder tomar decisiones concernientes con el diseño de mezclas asfálticas. La información aplica tanto a mezclas elaboradas en laboratorio, como a probetas asfálticas extraídas en el campo.

#### 4.3.1. Definiciones

El agregado mineral es poroso y puede absorber agua y asfalto en un grado variable. El cociente de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado. Los tres métodos para medir la gravedad específica del agregado toman estas variaciones en consideración. Estos métodos son la gravedad específica bulk, la gravedad específica aparente y la gravedad específica efectiva:



a. *Gravedad específica bulk (Gsb)*. Relación entre la masa en el aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, y la masa en el aire de una unidad de volumen de agua destilada a la temperatura indicada. Figura 1.

b. *Gravedad específica efectiva (Gse)*. Relación entre la masa en el aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a la temperatura indicada, y la masa en el aire de una unidad de volumen de agua destilada a la temperatura indicada. Figura 1.

c. *Gravedad específica aparente (Gsa)*. Relación entre la masa en el aire de una unidad de volumen de un material impermeable, a una temperatura indicada, y la masa en el aire de una unidad de volumen de agua destilada a la temperatura indicada. Figura 1.

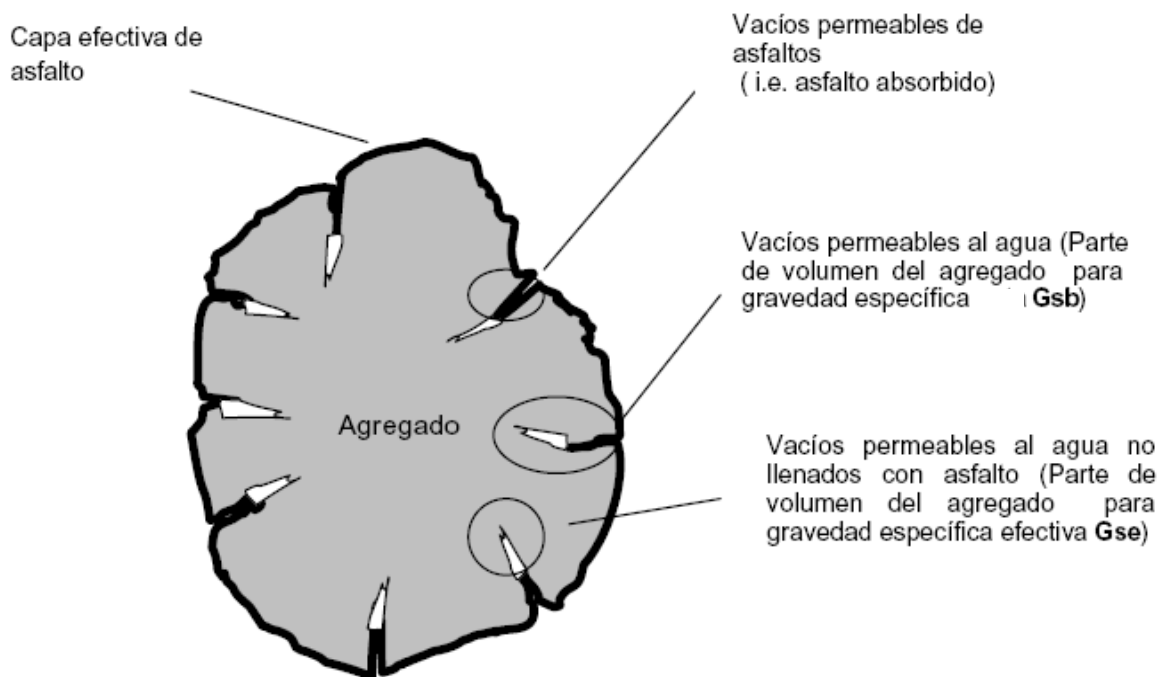


Figura 1. Ilustración de los parámetros de diseño volumétrico  
(Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2004)



d. *Vacíos en el agregado mineral (VMA – Voids in Mineral Aggregate)*. 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 muestra. Figura 2.

e. *Contenido de asfalto efectivo (Pbe)*. Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado.

f. *Vacíos de aire (Va)*. Volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactado, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado. Figura 2.

g. *Vacíos llenados con asfalto (VFA – Voids Filled with Asphalt)*. Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado que es ocupado por el asfalto efectivo. Se expresa como la relación  $(VMA - V_a)/VMA$ . Figura 2.

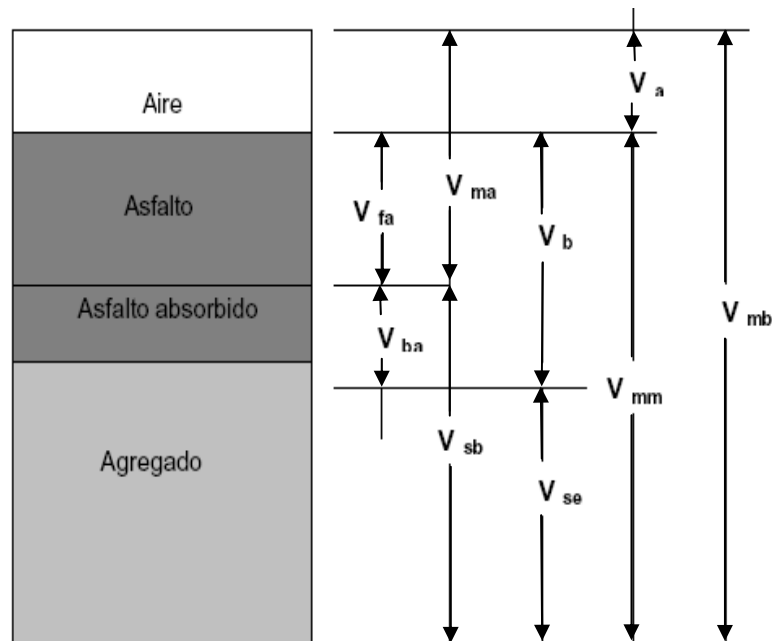


Figura 2. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada (Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2004)



Donde:

$V_{ma}$  = Volumen de vacíos en el agregado mineral.

$V_{mb}$  = Volumen total de la mezcla asfáltica.

$V_{mm}$  = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos de aire.

$V_{fa}$  = Volumen de vacíos llenos con asfalto.

$V_a$  = Volumen de vacíos de aire.

$V_b$  = Volumen de asfalto.

$V_{ba}$  = Volumen de asfalto absorbido.

$V_{sb}$  = Volumen de agregado mineral neto o bulk

$V_{se}$  = Volumen de agregado mineral específico

El procedimiento de diseño de mezclas calcula los valores de los VMA en términos de la gravedad específica neta de los agregados,  $G_{sb}$ .

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos de aire ( $V_a$ ) se expresan como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje de los VMA llenos con el asfalto efectivo.

El contenido de asfalto efectivo puede ser expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica o como un porcentaje de la masa del agregado de la mezcla asfáltica.

Debido a que los vacíos de aire ( $V_a$ ), los VMA y los VFA son volúmenes, una mezcla asfáltica debe ser diseñada o analizada sobre la base del volumen. Para propósitos de diseño, el análisis volumétrico puede ser fácilmente convertido a valores de masas.



### 4.3.2. Gravedad específica bulk del agregado

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y llenante con diferentes gravedades específicas, la gravedad específica bulk para el agregado total se calcula empleando la relación:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad \text{Fórmula 1}$$

Donde:

Gsb = gravedad específica bulk para el agregado total.

P1, P2, Pn = porcentajes individuales por masa de agregado.

G1, G2, Gn = gravedad específica neta individual del agregado.

La gravedad específica neta del llenante es difícil de determinar, aunque si es estimada el error es usualmente insignificante.

### 4.3.3. Gravedad específica efectiva del agregado

Cuando se basa en la gravedad específica máxima de una mezcla, Gmm, la gravedad específica efectiva del agregado, Gse, incluye todos los espacios vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto. La Gse se determina empleando la relación:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad \text{Fórmula 2}$$

Donde:

Gse = gravedad específica efectiva del agregado.



Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla sin vacíos de aire (Obtenida mediante el ensayo ASTM D2041 ó AASHTO T 209).

Pmm = porcentaje de masa total de la mezcla suelta = 100%

Pb = contenido de asfalto con el cual se determina la Gmm expresado como porcentaje del total de la masa de la mezcla.

Gb = gravedad específica del asfalto

El volumen de asfalto absorbido por los agregados es invariablemente menor que el volumen de agua absorbida. Por lo tanto, el valor de la gravedad específica efectiva de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva sale de estos límites, su valor es incorrecto. El cálculo de la gravedad específica máxima de la mezcla mediante el ensayo ASTM D 2041 ó AASHTO T 209 deberá repetirse para encontrar la causa del error.

#### **4.3.4. Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica**

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado se necesitará la gravedad específica máxima, Gmm, con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. La gravedad específica máxima puede determinarse, para cada contenido de asfalto, mediante el ensayo ASTM D 2041 ó ASSHTO T 209, y la precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño. Es preferible medir la gravedad específica máxima de la mezcla por duplicado o triplicado.

Después de calcular y promediar la gravedad específica efectiva del agregado para cada gravedad específica máxima de la mezcla medida, se puede obtener la gravedad específica máxima de la mezcla para cualquier contenido de asfalto con la siguiente ecuación, la cual supone que la gravedad específica efectiva del



agregado es constante pues la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido del mismo.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad \text{Fórmula 3}$$

Donde:

Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla (sin vacíos de aire).

Pmm = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100%

Ps = contenido de agregado expresado como porcentaje del total de la masa de la mezcla. Ps = 100 – Pb.

Pb = contenido de asfalto expresado como porcentaje del total de la masa de la mezcla.

Gse = gravedad específica efectiva del agregado.

Gb = gravedad específica del asfalto.

#### 4.3.5. Absorción del asfalto

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado y no como un porcentaje del total de la masa de la mezcla. La absorción del asfalto, Pba, se determina mediante la siguiente relación:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b \quad \text{Fórmula 4}$$

Donde:

Pba = asfalto absorbido expresado como porcentaje de la masa del agregado.

Gse = gravedad específica efectiva del agregado.

Gsb = gravedad específica bulk del agregado.

Gb = gravedad específica del asfalto.



#### 4.3.6. Contenido de asfalto efectivo

El contenido de asfalto efectivo,  $P_{be}$ , de una mezcla asfáltica es el volumen total de asfalto menos la cantidad de asfalto absorbido dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y gobierna el comportamiento de la mezcla asfáltica. Se determina con:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s \quad \text{Fórmula 5}$$

Donde:

$P_{be}$  = contenido de asfalto efectivo expresado como porcentaje de la masa total de la mezcla.

$P_b$  = contenido de asfalto expresado como porcentaje de la masa total de la mezcla.

$P_{ba}$  = asfalto absorbido expresado como porcentaje de la masa del agregado.

$P_s$  = contenido de agregado expresado como porcentaje total de la masa de la mezcla.

#### 4.3.7. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Como se había indicado, los vacíos en el agregado mineral, VMA, se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, el cual incluye los vacíos de aire ( $V_a$ ) y el contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ), expresado como un porcentaje del volumen total. Los VMA pueden calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresarse como un porcentaje del volumen mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, los VMA pueden estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.



Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica se tiene:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad \text{Fórmula 6}$$

Donde:

VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto).

Gsb = gravedad específica bulk del total de agregado.

Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (Obtenido del ensayo ASTM D 1188 ó D 2726 ó AASHTO T 166).

Ps = contenido de agregado expresado como porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje de la masa del agregado se tiene:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100 \quad \text{Fórmula 7}$$

Donde:

Pb = contenido de asfalto expresado como porcentaje de la masa del agregado.

#### 4.3.8. Porcentaje de vacíos de aire

Los vacíos de aire, Va, en la mezcla asfáltica compactada corresponden a los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse empleando la relación:



---

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad \text{Fórmula 8}$$

Donde:

Va = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

Gmb = gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada.

#### 4.3.9. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, sin incluir el asfalto absorbido, se determina mediante la relación:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA} \quad \text{Fórmula 9}$$

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto expresado como porcentaje de VMA.

VMA = vacíos en el agregado mineral expresado como porcentaje del volumen total.

Va = vacíos de aire en mezclas compactadas expresado como porcentaje del volumen total.



---

#### 4.4. MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una mezcla asfáltica se compone de una combinación de agregados mezclados uniformemente y recubiertos con cemento asfáltico.

La mezcla asfáltica está compuesta, en peso, por el peso de los agregados y del asfalto; y en volumen, por el volumen de los agregados, del asfalto y de los vacíos de aire.

Las mezclas asfálticas pueden ser en caliente o en frío, y para que tengan un buen desempeño, deben presentar las siguientes propiedades:

- *Estabilidad*: Es la capacidad de la mezcla de resistir las deformaciones impuestas por las cargas vehiculares.
- *Durabilidad*: Es la capacidad de la mezcla de resistir los efectos dañinos del aire, el agua, la temperatura y el tránsito.
- *Flexibilidad*: Es la capacidad de la mezcla de flexionarse levemente, sin agrietarse y acomodarse a los movimientos de la base o la subrasante.
- *Resistencia a la fatiga*: Es la capacidad de la mezcla de resistir la flexión repetida generada por el paso de los vehículos.
- *Resistencia al deslizamiento*: Es la capacidad de la mezcla para ofrecer resistencia al deslizamiento de las ruedas de los vehículos al frenar.
- *Permeabilidad*: Es la resistencia de la mezcla al paso del aire y del agua a través de la capa asfáltica.
- *Trabajabilidad*: Es la facilidad que ofrece la mezcla para ser extendida y compactada.



---

#### 4.4.1. COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas están compuestas por agregados, asfalto y vacíos de aire. La calidad de la mezcla asfáltica está directamente ligada con las propiedades y dosificación de los agregados y del cementante, como también a la cantidad de los vacíos de aire.

Las mezclas asfálticas constituyen la parte superior de los pavimentos flexibles y proporcionan un medio de distribución de carga y de impermeabilización que protege la estructura de pavimento de los efectos adversos del agua y de la acción del tránsito. Se emplean para la construcción de pavimentos nuevos, para incrementar la resistencia o mantener una calidad satisfactoria en la superficie de un pavimento existente, o para mejorar la resistencia al deslizamiento.

Se debe de conocer cierta información con respecto a las propiedades del cemento asfáltico y de los agregados, como parte del proceso de diseño para obtener buenos resultados de la mezcla asfáltica.

**a. Agregados.** Es una mezcla, natural o no, de piedra o gravas trituradas, escorias, arenas finas, arenas gruesas y llenante mineral. Puede contener todos o algunos de estos materiales. Los agregados deben ser limpios, duros y durables. Los agregados son los responsables de la capacidad de carga o resistencia de la mezcla y constituyen entre el 90% y 95% en peso de la mezcla y entre el 75% y 85% en volumen de la misma.

La idoneidad de los agregados para su empleo en mezclas asfálticas se determina por sus características de: granulometría, resistencia al desgaste, estabilidad, limpieza, fricción, propiedades de la superficie (rugosidad), forma de las partículas (trabajabilidad y compactabilidad), absorción y afinidad con el asfalto.



**b. Asfalto.** Es un material cementante de color café a negro, con consistencia sólida, semisólida o líquida, procedente de yacimientos o lagunas asfálticas o de la destilación del petróleo.

El asfalto es útil al ingeniero porque es un cementante altamente impermeable y durable. Es resistente a la acción de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. También es altamente viscoso a temperatura ambiente y puede licuarse aplicando calor, un disolvente o emulsificándolo en agua.

El uso del asfalto en vías puede tener dos campos de aplicación, el diseño de mezclas asfálticas y la elaboración y colocación de las mismas. Francis N. Hveem clasificó las propiedades de los materiales asfálticos de acuerdo con:

- La Consistencia (fluidez, viscosidad o plasticidad).
- La Durabilidad o resistencia al envejecimiento.
- La Velocidad de Curado.
- La Resistencia a la acción del agua.

Así mismo, el asfalto debe ser puro y se deben tener las precauciones de seguridad adecuadas para su manejo.

**c. Vacíos de aire.** Los vacíos de aire son importantes en el comportamiento de la mezcla ya que permiten absorber los cambios volumétricos producidos por el clima o el tránsito. Para mezclas asfálticas en caliente se recomienda un porcentaje entre 3% y 5% de vacíos y para mezclas en frío se sugiere un valor mayor. Un alto contenido de vacíos puede producir deformaciones permanentes y un bajo contenido de los mismos, exudación.



---

#### 4.4.2. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El diseño de una mezcla asfáltica consiste en establecer las proporciones óptimas de los agregados y el ligante que producirán una mezcla que pueda ser extendida y compactada en una superficie uniforme de textura adecuada, que sea resistente a la deformación, que soporte sin agrietarse las deflexiones elásticas repetidas del pavimento, y que sea impermeable al agua y durable.

La cantidad de asfalto está influenciada por la cantidad de arena y, en especial, del llenante (filler). Se ha encontrado que bajo condiciones normales y entre límites razonables, la adición del llenante reduce la cantidad de asfalto para la mezcla. El filler puede ser natural o de aporte, en este último caso puede ser cemento Pórtland, polvo calizo de trituración o cualquier material inerte. La adición de un llenante satisfactorio incrementa la estabilidad de la mezcla asfáltica. Cantidades excesivas de llenante pueden reducir la durabilidad de la mezcla asfáltica debido a la reducción de la película de asfalto sobre los agregados.

Los contenidos de llenante nunca deben exceder el 10% del peso total de los agregados en mezclas asfálticas y el 20% para mezclas de arena asfalto. Usualmente, consideraciones prácticas y ejecuciones óptimas indican cantidades de llenante del 5% para mezclas asfálticas y del 10% para mezclas de arena asfalto. Las mezclas deben diseñarse empleando un llenante comercial que cumpla con las especificaciones ASTM.

La granulometría está establecida por normas o especificaciones que determinan husos o bandas granulométricas, aunque el diseño está basado más en consideraciones volumétricas y en las características de compactación y empaquetamiento de los agregados.



---

Los métodos de diseño primordialmente son empíricos, entre los más conocidos se tienen el Marshall, Hveem, el derivado del SHRP, Superpave (EEUU); y el Duriez (Francia), entre otros.

#### **4.4.3. EVALUACIÓN Y AJUSTES DE UNA MEZCLA DE DISEÑO**

Los siguientes conceptos son una traducción del numeral 2.05 (Evaluation and adjustment of mix design) del Capítulo 2 del Manual del Instituto del Asfalto:

Cuando se elabora el diseño de una mezcla es frecuentemente necesario hacer varias combinaciones de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para el diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una gradación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la gradación de agregado dentro de los límites especificados puede ser reproducida en la planta mezcladora.

Cuando las mezclas de prueba no cumplen los criterios de diseño, con cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o rediseñar la mezcla. La manera más fácil de rediseñar una mezcla, para corregir una deficiencia, es cambiar la gradación de los agregados ajustando los porcentajes empleados. Este ajuste suele ser suficiente para cumplir con las especificaciones.

Existen lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba, aunque estas sugerencias no funcionan en todos los casos:



### **a. Pocos vacíos y baja estabilidad**

Los vacíos pueden incrementarse de diferentes formas. Una estrategia general para lograr vacíos suficientes en el agregado mineral (y en consecuencia, proveer espacio para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), es ajustar la graduación del agregado mediante la adición de más agregado grueso o fino.

Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal, y el exceso no es necesario para reemplazar el absorbido por el agregado, dicho contenido de asfalto debe reducirse con el fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA (Voids in Mineral Aggregate). Se debe recordar que al disminuir el porcentaje de asfalto se afectará la durabilidad del pavimento. Una reducción excesiva en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, tendrá que cambiarse el agregado.

También es posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o la reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. El contenido de vacíos puede mejorarse, sin sacrificar la estabilidad de la mezcla, con la incorporación de arena triturada.

### **b. Pocos vacíos y estabilidad satisfactoria**

Eventualmente, los bajos contenidos de vacíos pueden producir inestabilidad asociada con el flujo plástico después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito debido a la reorientación de las partículas y a la compactación adicional.

Los vacíos insuficientes pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; no obstante la estabilidad podría ser satisfactoria inicialmente para el tipo de tránsito especificado.



---

Asimismo, la degradación de un agregado pobre durante la producción de la mezcla o bajo la acción del tránsito puede ocasionar subsecuentemente la inestabilidad y el flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, las mezclas con pocos vacíos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados en el litoral anterior, sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria.

### **c. Vacíos satisfactorios y baja estabilidad**

La baja estabilidad, cuando los vacíos y la gradación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar acciones para mejorar la forma de las partículas de los agregados empleando material producto de trituración, incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o, posiblemente, aumentando el tamaño máximo del agregado. Las partículas de agregado con textura rugosa y superficies poco redondeadas presentan mayor estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

### **d. Muchos vacíos y estabilidad satisfactoria**

Los altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas de alta permeabilidad. Al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento se puede ocasionar el endurecimiento prematuro del asfalto, el desprendimiento del agregado o posible el desprendimiento del asfalto en el agregado. Aún cuando la estabilidad sea satisfactoria se deben realizar ajustes para reducir los vacíos. Se logran pequeñas reducciones mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una gradación que este cerca de la curva de máxima densidad.



---

### **e. Muchos vacíos y baja estabilidad**

Se deben tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, es evaluar la calidad de los materiales.

#### **4.4.4. SELECCIÓN DEL DISEÑO FINAL**

Los siguientes conceptos son una traducción del numeral 5.15 (Selection of final mix design) del Capítulo 2 del Manual del Instituto del Asfalto:

La selección del diseño final de la mezcla corresponde a la más económica y que cumple satisfactoriamente con todos los criterios establecidos. De cualquier forma, la mezcla no debe ser diseñada para optimizar una propiedad en particular.

Las mezclas con valores anormalmente altos de estabilidad son indeseables debido a que tienden a ser menos durables o pueden fracturarse prematuramente bajo altos volúmenes de tránsito. Esta situación es bastante crítica cuando los materiales de la base y el terreno natural son débiles y permiten deflexiones moderadas o relativamente altas con el tránsito.

La selección del contenido óptimo debe balancear todas las propiedades de la mezcla. Normalmente, los criterios de diseño de mezclas producirán un rango limitado de contenidos de asfalto aceptables que cumplan todos los lineamientos.

El contenido de asfalto puede ajustarse en este rango limitado para lograr propiedades de la mezcla que satisfagan los requerimientos de un proyecto en especial; algunas propiedades serán mas críticas que otras y dependerán de las circunstancias del diseño como puede ser el tránsito, la estructura, el clima, el



equipo de construcción y otros factores. Aún más, el proceso de balance no es el mismo para cada pavimento ni para cada diseño de mezcla.

Existen algunas consideraciones en el ajuste que deben ser evaluadas antes de establecer el contenido de asfalto final:

#### **4.4.4.1. Evaluación de la curva de Vacíos en el agregado mineral (VMA)**

En muchos casos, lo más difícil en el diseño de mezclas asfálticas es lograr un mínimo de vacíos en el agregado mineral. El éxito consiste en proporcionar suficiente espacio para el asfalto y permitir una adhesión adecuada para ligar las partículas de agregado cuando las temperaturas se incrementen y el asfalto se expanda.

Normalmente, la curva exhibe una forma de “U” alargada, decreciendo hasta un valor mínimo para después incrementarse con el aumento del contenido de asfalto, como se observa en la Figura 3-a.

La dependencia entre los VMA y el contenido de asfalto, parece ser una contradicción a la definición. Se podría esperar que el VMA se mantenga constante con la variación del contenido de asfalto, pensando que los vacíos de aire simplemente serán desplazados por el cemento asfáltico. En realidad, el volumen total cambia con el contenido del asfalto y la adopción de una unidad constante de volumen no es correcta. Con el incremento del asfalto la mezcla se vuelve más manejable y se puede compactar más fácilmente (mediante más peso se puede comprimir en un menor volumen). Por consiguiente, la densidad de la mezcla se incrementa cuando los VMA disminuyen.

En algún momento cuando el contenido de asfalto aumenta (el fondo de la curva en forma de U), los VMA empiezan a incrementarse porque el material



relativamente es más denso (agregado) es desplazado y empujado por el material menos denso (cemento asfáltico). Se recomienda evitar que los contenidos de asfalto en el lado “húmedo” o creciente de la curva VMA, así se cumplan el mínimo de vacíos de aire y el criterio de VMA correspondiente. Las mezclas con contenidos de asfalto en este rango tienen tendencia a expandirse o exhibir flujo plástico en campo. Cualquier compactación adicional por el tráfico causará la expansión del asfalto, la pérdida del contacto agregado-agregado y, eventualmente, el desgaste en las áreas de alto tráfico. Idealmente, se recomienda seleccionar el contenido de asfalto de diseño un poco a la izquierda del punto inferior de la curva VMA, siempre y cuando no se incumpla ninguno de los otros criterios de diseño.

En algunas mezclas el fondo de la curva VMA es muy plano, lo que significa que las mezclas compactadas no son tan sensibles al contenido del asfalto en este rango como algunos otros factores. En el rango normal de los contenidos de asfalto, la compatibilidad está más influenciada por las propiedades de los agregados. De cualquier forma, en algún punto la cantidad de asfalto será crítica para el comportamiento de la mezcla y el efecto del bitumen dominará drásticamente los incrementos de VMA.

Cuando el fondo de la curva VMA cae por debajo del nivel del criterio mínimo requerido para el tamaño del agregado máximo nominal de la mezcla (Figura 3-b); se deben realizar cambios en las fórmulas de trabajo. Específicamente, la granulometría del agregado debe modificarse para proporcionar los VMA adicionales. El contenido de asfalto no debe seleccionarse en los extremos del rango aceptable, así se satisfaga el criterio mínimo de los VMA. Sobre el lado izquierdo de la curva, la mezcla puede ser muy seca, propensa a la segregación, y podría tener un alto porcentaje de vacíos de aire. En el lado derecho se espera que sufra deformaciones.



Si el criterio mínimo de VMA está completamente por encima de todo el rango del contenido de asfalto (Figura 3-c), se justifica la reevaluación o el cambio en las fuentes del material.

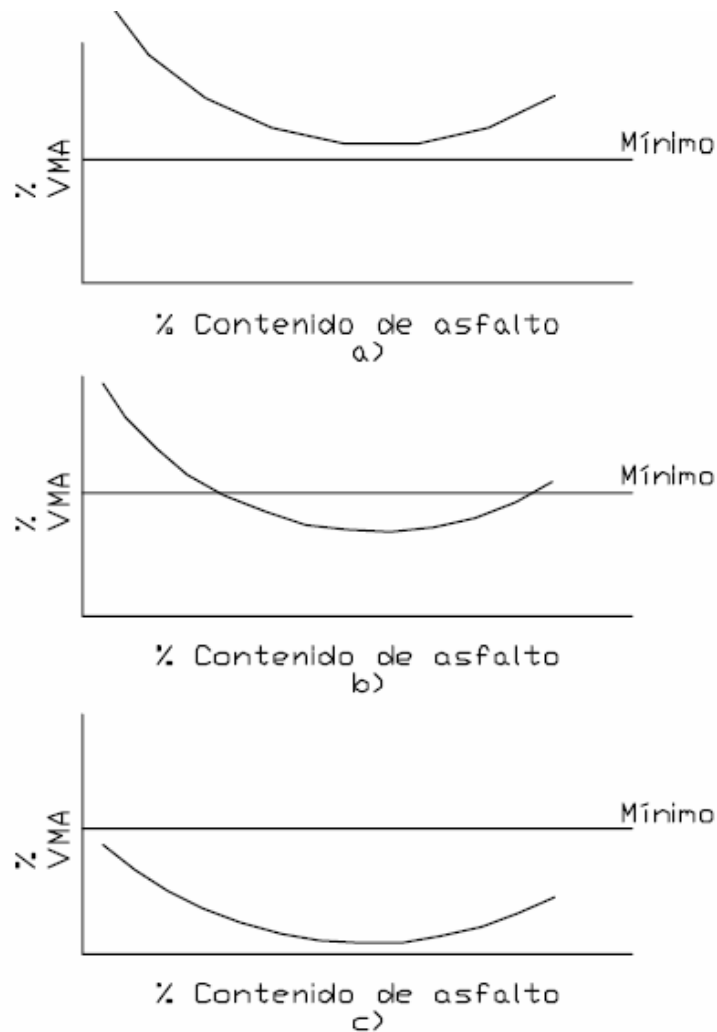


Figura 3. Relación entre VMA y límite de especificación para el rango de contenido de asfalto (Fuente: Manual del Instituto del Asfalto)

#### 4.4.4.2. Efecto del nivel de compactación

Para un mismo contenido de asfalto, los vacíos de aire ( $V_a$ ) y los vacíos en el agregado mineral (VMA) disminuyen a mayor esfuerzo de compactación.



Como se observa en la Figura 4-a el esfuerzo de compactación no sólo cambia las magnitudes de los valores, sino que el valor del contenido de asfalto varía para los VMA mínimos. Si una mezcla se diseña un poco a la izquierda del mínimo VMA para un nivel de compactación de 50 golpes ó 150 giros y en la realidad el pavimento sufre un tráfico pesado mayor al esperado (similar al nivel de diseño de 75 golpes ó 174 giros); entonces, el dicho contenido de asfalto ahora corresponde al lado derecho o “mojado” del punto mínimo de VMA para una mezcla diseñada empleando una compactación de 75 golpes ó 174 giros. Finalmente, el resultado será una mezcla susceptible a desgastarse.

Este escenario puede también presentarse en la dirección opuesta. Si una mezcla diseñada con un nivel de compactación de 75 golpes ó 174 giros (Figura 4-b) se emplea para un pavimento con un volumen de tránsito menor porcentaje final de vacíos de aire ( $V_a$ ) será considerablemente más alto de lo planeado. Esta condición puede llevar a una mezcla más abierta (permeable), permitiendo que el aire y el agua pasen a través de ella fácilmente. El resultado de esta situación es una mezcla que se endurece prematuramente, se vuelve frágil y quebradiza a una edad temprana o el agregado se desprende de la mezcla debido a la pérdida de adherencia del asfalto. Por esta razón, es importante que el esfuerzo de compactación empleado en el laboratorio simule el tránsito esperado para el pavimento. Asimismo, la mezcla debe construirse con el equipo de compactación adecuado, con el fin de producir una densidad inicial adecuada e indiferente a las condiciones climáticas.

Es importante anotar que el criterio de los VMA no cambia de acuerdo con el nivel de compactación. Los requerimientos de los VMA (mantener espacio para el asfalto y los vacíos de aire) son consistentes sin tomar en cuenta el nivel de tránsito para el cual se diseña la mezcla.

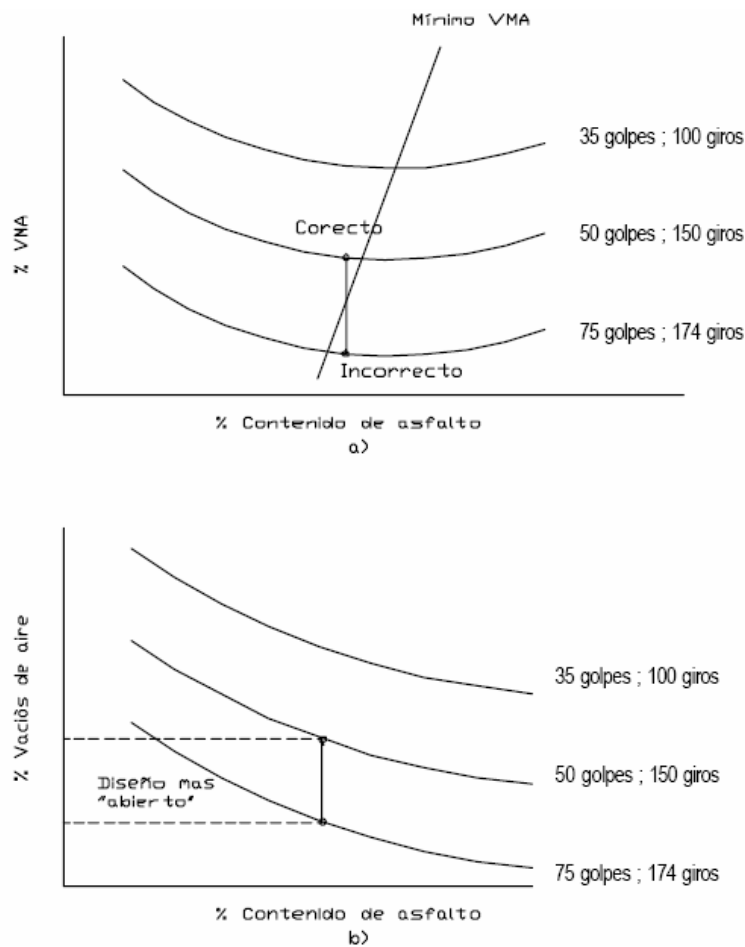


Figura 4. Efecto del esfuerzo de compactación Marshall en los VMA y los Va  
(Fuente: Manual del Instituto del Asfalto)

#### 4.4.4.3. Efecto de los vacíos de aire

Debe enfatizarse que el rango de diseño de los vacíos de aire (3% a 5 %) es el nivel deseado después de varios años de tránsito. Esta meta no varía con el tránsito ya que se supone que el esfuerzo de compactación de laboratorio es seleccionado para el volumen vehicular esperado. La obtención del rango de los vacíos de aire normalmente se logra si la mezcla se diseña con el esfuerzo de compactación apropiado. El porcentaje de los vacíos después de la construcción se encuentra entre el 6% y 8 % ya que se espera un poco de densificación con el tránsito.



El resultado de un cambio en cualquier factor o cualquier desvío en el procedimiento de diseño, generará una pérdida de desempeño o vida de servicio de la mezcla. Se han observado mezclas que finalmente se densifican con el 3 % de vacíos y puede esperarse que se desarrolle el ahuellamiento si se colocan en situaciones de tránsito pesado. Varios factores pueden contribuir a este problema, como un incremento arbitrario o accidental en el contenido del asfalto mezclado en la planta o un incremento en la cantidad de partículas finas que pasan el tamiz No. 200.

De forma similar, pueden ocurrir problemas si el contenido final de vacíos de aire está por encima del 5%, o si el pavimento se construye con más del 8% de vacíos de aire inicial. La fragilidad, el agrietamiento prematuro, el desgaste y el desprendimiento son algunas de las posibles patologías bajo estas condiciones.

El objetivo global es limitar los ajustes del diseño del contenido de asfalto a menos de 0.5% de vacíos de aire de la media del criterio de diseño (4%), especialmente en la parte baja del rango; y para verificar que la mezcla de la planta se parezca exactamente a la elaborada en el laboratorio.

#### **4.4.4.4. Efecto de los vacíos llenos de asfalto (VFA – Voids Filled with Asphalt)**

Aunque los VFA, los VMA y los  $V_a$ , están interrelacionadas entre sí y con dos de estos valores se puede obtener el tercero, se puede tomar el criterio VFA para el diseño de mezclas con VMA de marginales a aceptables. El efecto principal del criterio de VFA es que limita los niveles máximos de VMA y subsecuentemente, los niveles máximos de contenido de asfalto.

El VFA también restringe el contenido de aire permitido para mezclas cercanas al criterio mínimo de VMA. Las mezclas diseñadas para volúmenes de tráfico bajos,



no pasarán el criterio de VFA con un porcentaje de vacío relativamente alto (5%), aunque el criterio de vacíos de aire se cumpla. El propósito es evitar mezclas menos durables en situaciones de tránsito ligero.

Las mezclas diseñadas para tránsito pesado no pasarán el criterio VFA con un bajo porcentaje de vacíos (menor de 3.5%), aunque éstos se encuentran en el rango de aceptación, porque un bajo contenido de vacíos suele ser crítico en términos de deformación permanente. El criterio VFA ayuda a evitar mezclas que puedan ser susceptibles al ahuellamiento en situaciones de alto tráfico.

El criterio VFA provee un factor de seguridad adicional en el diseño y construcción en términos de comportamiento ya que puedan ocurrir cambios entre la etapa de diseño y la construcción, y el incremento en el margen de error es aceptable.

#### **4.5. CONCEPTO DE VENTANA DE DISEÑO**

Consiste en el desarrollo gráfico de una ventana formada por la superposición de todas las especificaciones de criterios volumétricos. La ventana se presenta en un gráfico de volumen de bitumen efectivo ( $V_{beff}$ ) en las abscisas y el porcentaje de vacíos ( $V_a\%$ ) en las ordenadas.

En la construcción de la Ventana de Diseño se tienen en cuenta las siguientes especificaciones límite del Instituto del Asfalto:

- Porcentaje de vacíos máximo ( $V_{a_{max}}$ )
- Porcentaje de vacíos mínimo ( $V_{a_{min}}$ )
- Vacíos llenos con asfalto (VFB)
- Vacíos en el agregado mineral (VMA)
- Contenido de asfalto (AC)
- Volumen de bitumen efectivo mínimo ( $V_{beff_{min}}$ )

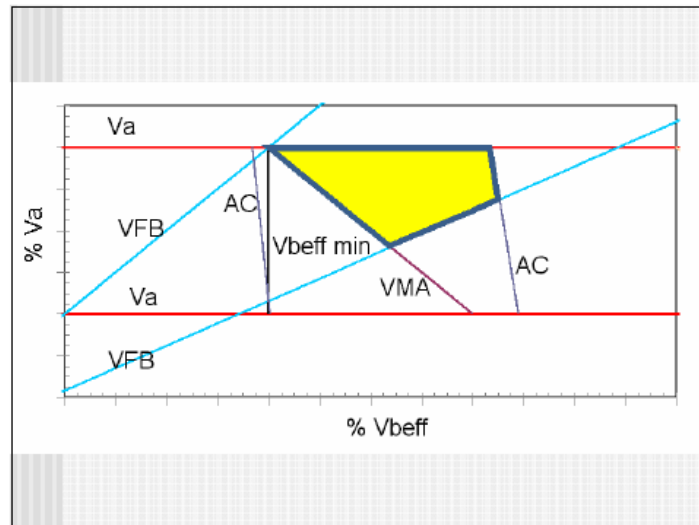


Figura 5. Representación de la Ventana de Diseño (Fuente: Witczak, 2007)

#### 4.6. EL MÓDULO RESILIENTE

El módulo resiliente es el módulo elástico a ser usado con la teoría elástica. Se conoce bien que la mayoría de los materiales del pavimento no son elásticos pues experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparado con la resistencia del material y se aplica un número grande de repeticiones, la deformación bajo cada aplicación de carga es casi completamente recuperable, proporcional a la carga y puede ser considerada como elástica.

En la Figura 7 se muestra la deformación de un espécimen bajo una prueba de carga repetida, en la etapa inicial de aplicaciones de carga hay una considerable deformación permanente tal como es indicado por la deformación unitaria plástica en la figura. Como el número de repeticiones aumenta, la deformación plástica debido a cada repetición de carga disminuye. Después de 100 a 200 repeticiones, la deformación es prácticamente toda recuperable, como es indicado por  $\epsilon_r$  en la figura.

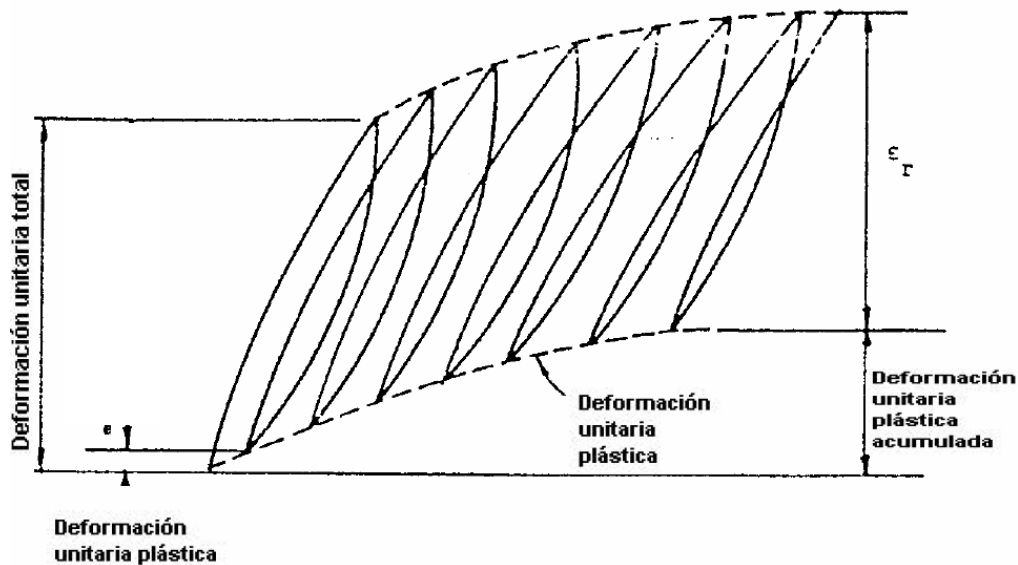


Figura 6. Deformaciones unitarias bajo cargas repetidas (Fuente: Huang, 1993)

El módulo resiliente de tensión se basa en la deformación recuperable bajo la acción repetida de cargas; y su expresión es la siguiente:

$$MR = \sigma/\varepsilon \quad \text{Fórmula 11}$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo aplicado y  $\varepsilon$  la deformación recuperable medida.

El tipo y duración de las cargas usadas en la prueba de esfuerzo repetido deben simular lo que realmente ocurre en el campo. Cuando la carga de la rueda está a una distancia considerable de un punto dado en el pavimento, el esfuerzo en ese punto es cero. Cuando la carga esta directamente sobre el punto dado, la tensión en el punto es máxima. Es por consiguiente razonable asumir que el pulso de esfuerzo pueda ser de forma sinusoidal o de forma triangular, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y la profundidad del punto debajo de la superficie del pavimento.



Debido a que la carga aplicada es normalmente pequeña, el ensayo de módulo resiliente es una prueba no destructiva y la misma muestra puede usarse para muchas pruebas bajo diferentes condiciones de carga y medioambientales.

Para carreteras pavimentadas con material asfáltico, la prueba de tensión indirecta es muy empleada para determinar el módulo resiliente. El ensayo de tensión indirecta involucra una carga de compresión de un espécimen cilíndrico a lo largo de su diámetro vertical. A las velocidades de tráfico típicas y temperaturas del pavimento, el asfalto se comporta casi elásticamente y su módulo de tensión indirecta es una medida de su resistencia a la flexión y de su habilidad carga-deformación.

La acumulación de deformación permanente probablemente es el inconveniente más grande de la prueba de tensión indirecta. Esto tiende a esconder la evidencia de daño de fatiga, y de acuerdo con la prueba, no caracteriza la conducta de fatiga directamente, esto es particularmente cierto para las temperaturas altas donde la conducta no lineal y viscoelástica del material es más pronunciada.

Cuando no se dispone del equipo adecuado para medir los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas se han empleado fórmulas o expresiones que usan la composición volumétrica de la mezcla y las características del asfalto para estimar un valor para el módulo de la mezcla. Conviene comentar que son expresiones desarrolladas en otros países con materiales cuya respuesta a las condiciones locales no es necesariamente igual a la obtenida en los sitios de la cual se obtuvo la información.

#### **4.6.1. Ensayo de Tensión Indirecta**

El ensayo de Tensión Indirecta se emplea para evaluar el comportamiento relativo de las mezclas asfálticas para el diseño de pavimentos obteniéndose el valor del



módulo resiliente, este se puede emplear para evaluar la calidad relativa de los materiales, así como generar datos de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos.

También puede emplearse para estudiar efectos de temperatura, tasa de carga, periodos de reposo, etc. Puesto que el procedimiento es no destructivo los ensayos pueden repetirse sobre un espécimen para evaluar su condición en lo que respecta a temperatura y humedad. Este ensayo para la caracterización y diseño de los pavimentos está regido por la norma I.N.V.E – 749 del INVIAS.

La realización de dicho ensayo consiste en aplicar una carga repetida a compresión sobre el espécimen a ensayar, que actúa de forma paralela y a lo largo del plano diametral vertical del espécimen. Esta configuración desarrolla unos esfuerzos a tensión relativamente uniformes que causan la falla a lo largo de dicho plano.

#### **4.6.2. Equipo UTM (Universal Testing Machine) en ensayo de Tensión Indirecta**

En el ensayo, una fuerza de carga diametral se aplica en forma de pulsos a un espécimen, midiéndose la deformación unitaria diametral horizontal resultante a 90° de la fuerza aplicada. Debido a que no se mide la deformación unitaria en el eje, se asume el valor de la relación de Poisson como una constante.

La secuencia del ensayo consiste en una aplicación de cinco pulsos de carga, durante los cuales el sistema automáticamente ajusta la magnitud de la fuerza para que la deformación unitaria horizontal diametral transitoria pico se alcance. Después son aplicados los cinco pulsos de carga del ensayo para la adquisición de datos.

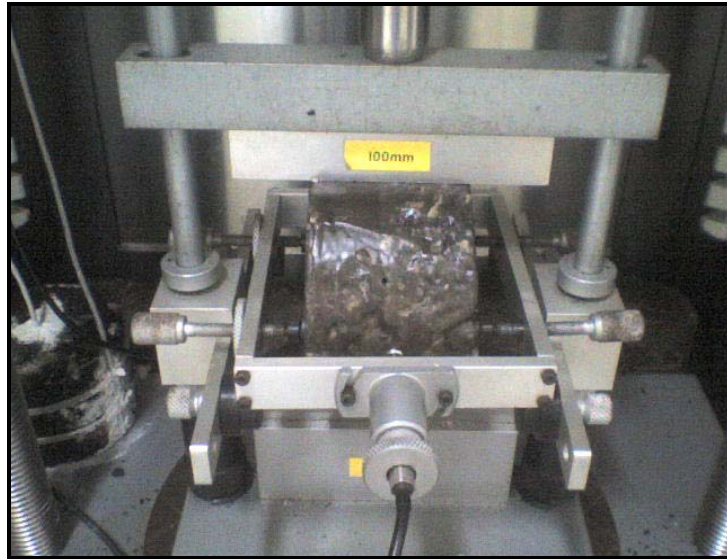


Foto 1. Disposición de la briqueta en el marco de carga. Foto de autor

En ensayo da los siguientes cálculos después de la aplicación de los cinco pulsos de carga.

- Módulo de rigidez del espécimen.
- Módulo de rigidez ajustado por temperatura y relación de área cargada.
- Tiempo de carga de pulso de fuerza, medido en fuerza cero.
- Tiempo de incremento del pulso de fuerza, medido desde la fuerza cero al pico.
- Fuerza de carga pico.
- Deformación unitaria diametral horizontal transitoria pico del espécimen.
- Factor del área de carga.

Además utilizando los datos de los cinco pulsos se calculan los valores de la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Para caracterizar completamente un material como el concreto asfáltico, se deben tener al menos tres temperaturas de ensayo, en este caso se utilizaron 20, 25 y 30°.



En el ensayo con temperatura controlada, las temperaturas de la superficie y del núcleo del espécimen, se estiman por transductores insertados en un espécimen de control localizado cerca del espécimen de ensayo.



*Foto 2. Briqueta de control de temperatura. Foto de autor*

## **5. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MEZCLAS**

### **5.1. OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES**

El material granular es obtenido de la fuente del Río Chambery y el asfalto de fuente Barrancabermeja. Estos materiales se obtuvieron gracias a la intermediación del Profesor Luís Carlos Vásquez Torres, Director Técnico de la Interventoría del Plan 2500 en el Departamento de Caldas que adelanta la Universidad Nacional.



## 5.2. ENSAYOS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

ENSAYOS	CANT.	NORMA	DURACIÓN	MATERIALES	CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS
Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos	1	I.N.V.E-213	24 horas	1000 gr agregados con tamaño < 4.75 mm 5000 gr agregados con tamaño ≥ 4.75 mm	AASHTO T27 ASTM C 136
Peso específico y absorción de agregado grueso	3	I.N.V.E-222	24 horas	1500 gr agregados con tamaño < 4.75 mm	AASHTO T84 ASTM C 128
Peso específico y absorción de agregado fino	3	I.N.V.E-223	24 horas	5000 gr agregados con tamaño ≥ 4.75 mm	AASHTO T85 ASTM C 127
Peso específico máximo mezcla suelta, Densidad Rice	3	I.N.V.E-735	12 horas	2500 gr mezcla agregados y asfalto	AASHTO T209 ASTM D 2041
Diseño Marshall (18 briquetas, estabilidad y flujo)	1	I.N.V.E-748	7 días		AASHTO T245 ASTM D 1559
Tensión indirecta en mezclas asfálticas (probetas de diseño Marshall)	18	ASTM D 4123	24 horas	23 Kg material granular 4 litros de asfalto	
Contenido de vacíos, peso específico y unitario de mezclas compactas (probetas Marshall)	18	I.N.V.E-734	1 hora		ASTM D 2726
Contenido de vacíos, peso específico y unitario de mezclas compactas (rangos específicos)	9	I.N.V.E-734	1 hora		ASTM D 2726
Tensión indirecta en mezclas asfálticas (en rangos específicos)	9	ASTM D 4123	24 horas	11 Kg material granular 2 litros de asfalto	

Tabla 1. Resumen de los ensayos para la recolección de la información

**Nota:** El material granular del ensayo granulométrico es empleado para completar la cantidad necesaria para realizar los 3 ensayos de peso específico de agregado grueso y los 3 ensayos de peso específico de agregado fino.



### 5.3. DISEÑO MARSHALL

#### 5.3.1. FÓRMULA DE TRABAJO

Se realizó como parámetro fijo para la gradación del material granular y la fórmula de trabajo la línea media del huso INVIAS para una mezcla MDC-2 (Artículo 450-02). Con estos datos se presenta la curva granulométrica para esta gradación particular y los pesos por tamiz para la elaboración de una briqueta de peso total 1200 gr.

TAMIZ NO.	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA			% RET. ACUMUL.	% RETENIDO	Para una briqueta (gr)
		NORMA MIN	NORMA MAX	MEDIA TRABAJO			
3/4"	19,000	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0
1/2"	12,700	80,0	100,0	90,0	10,0	10,0	120
3/8"	9,510	70,0	88,0	79,0	21,0	11,0	132
4	4,750	49,0	65,0	57,0	43,0	22,0	264
10	2,000	29,0	45,0	37,0	63,0	20,0	240
40	0,425	14,0	25,0	19,5	80,5	17,5	210
80	0,190	8,0	17,0	12,5	87,5	7,0	84
200	0,075	4,0	8,0	6,0	94,0	6,5	78
Fondo		0,0	0,0	0,0	100,0	6,0	72
<b>Suma</b>						100,0	1200

Tabla 2. Gradación media para trabajo y cantidades requeridas de material granular para la elaboración de una briqueta

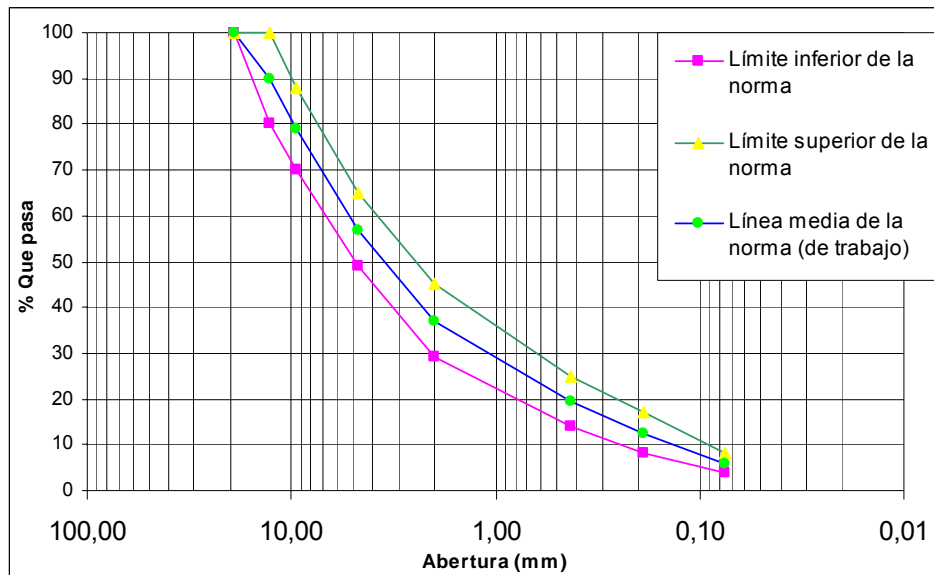


Gráfico 1. Curva media de norma para trabajo



Para ampliar el análisis de la gradación de trabajo se compara la línea media de la Norma INVIAS para una mezcla MDC-2 (gradación establecida para el diseño) con la línea de máxima densidad (gráfica de Fuller) establecida por Superpave, que emplea el exponente 0.45 en el eje de las abscisas (tamaños).

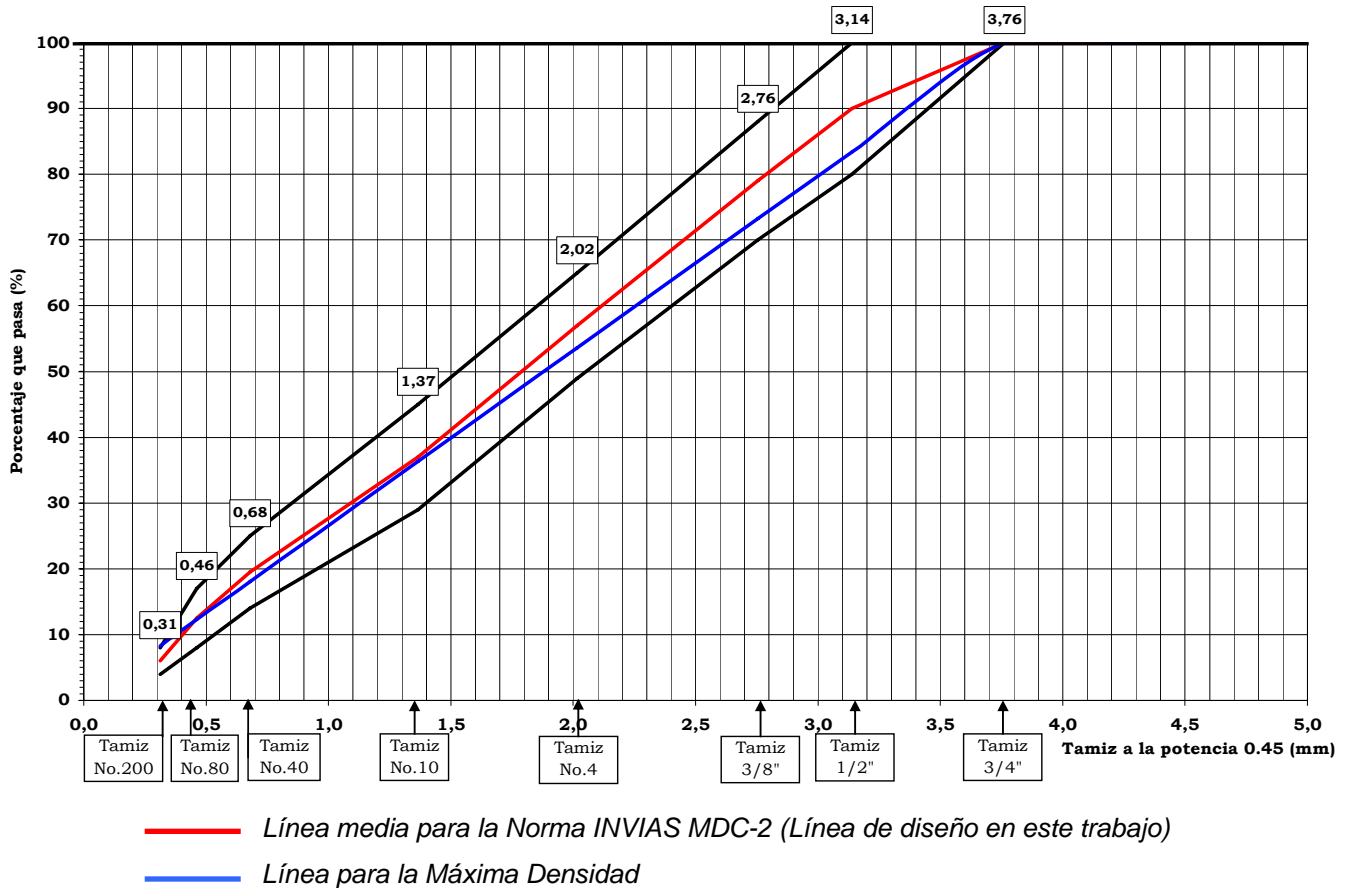


Gráfico 2. Comparación entre línea media INVIAS MDC-2 y línea de Máxima Densidad en el gráfico de Fuller (Superpave)

De este gráfico comparativo se observa que la línea de gradación en la Norma INVIAS para una MDC-2 presenta una forma muy parecida en la parte fina hasta el tamiz No.10 y luego se separa en los tamices siguientes. Según la metodología Superpave la cercanía de la línea de diseño a la línea de Máxima Densidad en esta zona indica mezclas que podrían poseer un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte (Instituto Mexicano del Transporte, 2004).



### 5.3.2. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS

Para determinar estas características se procedió a realizar este ensayo sobre dos muestras para los agregados finos, dos muestras para los agregados gruesos y cuatro muestras para el llenante mineral, obteniendo los siguientes resultados:

#### AGREGADOS GRUESOS

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Promedio
Densidad Aparente	2,823	2,804	-	-	2,814
Densidad S.S.S o efectiva	2,748	2,738	-	-	2,743
Densidad Bulk	2,706	2,702	-	-	2,704
Absorción	1,515	1,35	-	-	1,433

#### AGREGADOS FINOS

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Promedio
Densidad Aparente	2,731	2,738	-	-	2,735
Densidad S.S.S o efectiva	2,646	2,660	-	-	2,653
Densidad Bulk	2,596	2,614	-	-	2,605
Absorción	1,90	1,73	-	-	1,815

#### LLENANTE MINERAL

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Promedio
Peso Específico	2,74	2,78	2,80	2,80	2,78

Tabla 3. Resultados peso específico y absorción agregados finos y gruesos

### 5.3.3. GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL ASFALTO (Gb)

La gravedad específica del asfalto se tomará como 0.998 de acuerdo al valor para un asfalto típico de Barrancabermeja (ECOPETROL, 1994).

### 5.3.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DEL AGREGADO (Gsb)

De acuerdo a como se presento en el numeral 4.3.2:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad G_{sb} = \frac{1200}{\frac{516}{2.704} + \frac{612}{2.605} + \frac{72}{2.780}} = 2.6569$$



### 5.3.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA DE LA MEZCLA (Gmm)

Se procede a realizar el ensayo de Densidad Máxima RICE (Norma de ensayo I.N.V.E-735) sobre tres muestras con contenido de asfalto diferente, así:

Pb	Gmm
5,55	2,567
5,85	2,526
6,15	2,501

Tabla 4. Resultados Gravedad Específica Máxima (Ensayo RICE)

### 5.3.6. GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL AGREGADO (Gse)

De acuerdo a como se presento en el numeral 4.3.3: 
$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

$$G_{se} = \frac{100 - 5.55}{\frac{100}{2.567} - \frac{5.55}{0.998}} = 2.8283$$

$$G_{se} = \frac{100 - 5.85}{\frac{100}{2.526} - \frac{5.85}{0.998}} = 2.7916$$

$$G_{se} = \frac{100 - 6.15}{\frac{100}{2.501} - \frac{6.15}{0.998}} = 2.7748$$

$$G_{se} \text{ promedio} = 2.7982$$

### 5.3.7. ASFALTO ABSORBIDO

De acuerdo a como se presento en el numeral 4.3.5:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b$$

$$P_{ba} = 100 \times \frac{2.7982 - 2.6569}{2.6569 * 2.7982} \times 0.998 = 1.90\%$$



#### NOTA:

Considerando que el valor de la absorción de asfalto calculada en este numeral es mayor que la absorción de agua obtenida experimentalmente para las fracciones separadas (Tabla 3), se presentan dos posibles causas a este hecho:

- El valor de la gravedad específica de los agregados finos presenta una variación en la medida que el ensayo puede llegar a ser impreciso.
- La gravedad específica máxima de la mezcla obtenida con la realización del ensayo de Densidad Máxima RICE puede presentar valores diferentes al real, en la medida que no se haya realizado de forma idónea.

#### 5.3.8. CORRECCIÓN A LOS VALORES DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL AGREGADO Y ASFALTO ABSORBIDO

Debido a las razones antes enunciadas se realizará el recálculo de la Gravedad Específica Efectiva del Agregado empleando la fórmula que pondera las gravedades específicas de las fracciones del agregado, así:

$$G_{se} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_{se1}} + \frac{P_2}{G_{se2}} + \dots + \frac{P_N}{G_{seN}}} \quad G_{se} = \frac{1200}{\frac{516}{2.743} + \frac{612}{2.653} + \frac{72}{2.780}} = 2.6985$$

De igual forma al modificar este valor el porcentaje de asfalto absorbido varía así:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b$$
$$P_{ba} = 100 \times \frac{2.6985 - 2.6569}{2.6569 * 2.6985} \times 0.998 = 0.579\%$$



Diferencia entre los valores de la absorción:

$$1.90\% - 0.579\% = 1.321\%$$

### 5.3.9. GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DE LA MEZCLA COMPACTADA

Para este ensayo se empleará la norma INVE-734 que requiere briquetas parafinadas (para este caso denominado como tipo 2). No obstante como esfuerzo investigativo se realizará la medición empleando briquetas saturadas superficialmente secas, para efectos de comparación con el primer método.

A continuación se presenta la tabla 5 con los resultados encontrados para estos criterios.

#### GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK

No. Briqueta	% de asfalto	TIPO 1. SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA		TIPO 2. CON PARAFINA		Diferencia de 1 con respecto a 2
		Medidas	Promedio	Medidas	Promedio	
1	4,0	2,292	2,272	2,294	2,267	0,006
2		2,268		2,267		
3		2,257		2,239		
4	4,5	2,335	2,353	2,324	2,337	0,016
5		2,357		2,335		
6		2,368		2,353		
7	5,0	2,412	2,402	2,368	2,377	0,025
8		2,400		2,396		
9		2,394		2,368		
10	5,5	2,412	2,415	2,401	2,400	0,015
11		2,415		2,395		
12		2,417		2,404		
13	6,0	2,430	2,446	2,429	2,446	0,001
14		2,458		2,457		
15		2,451		2,451		
16	6,5	2,427	2,453	2,427	2,451	0,002
17		2,470		2,467		
18		2,462		2,460		

Tabla 5. Comparación entre los dos tipos de métodos para peso específico bulk

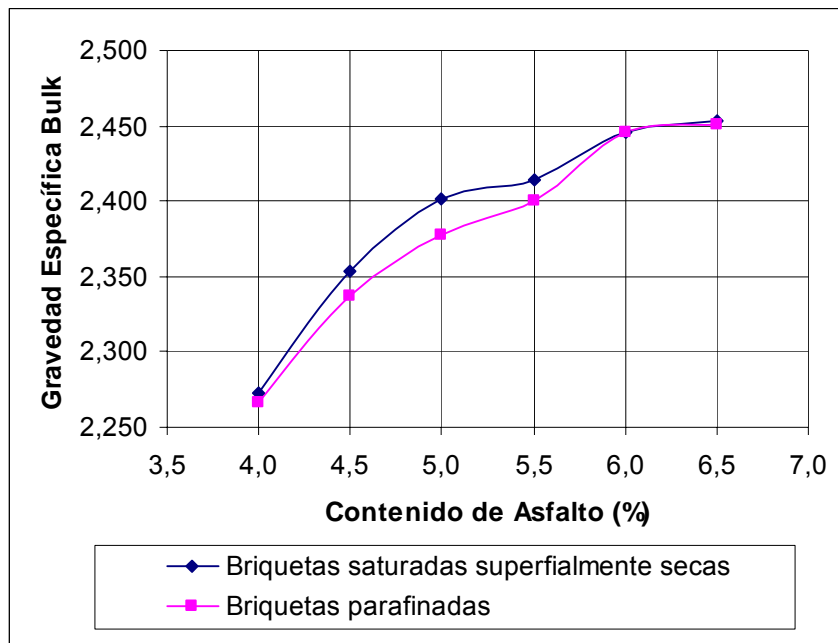


Gráfico 3. Comparación Peso Específico Bulk briquetas SSS y briquetas parafinadas

Como se observa en los resultados del peso específico bulk existe un incremento del valor encontrado con el método de la briqueleta saturada superficialmente seca en comparación del realizado por el método de la briqueleta parafinada. Este fenómeno se explica en razón de que la absorción de tanto los agregados finos como los gruesos es importante y con ello que al realizar la saturación los agregados gruesos tienden a incorporar en una mayor proporción el líquido en sus propias porosidades. Esto añadido a la posibilidad de que la briqueleta no sea completamente seca superficialmente, son algunos de los factores observados dentro del aumento de los valores en el primer método enunciado con respecto al método parafinado.

La correspondencia para los dos métodos de análisis se encuentra al realizar el ensayo sobre briqueletas con contenidos de asfaltos altos (considerando como alto 6 y 6.5%). Esto se fundamenta en que las briqueletas con estos contenidos de



asfalto crean una composición cerrada que dificulta el ingreso del agua en los agregados y en la mezcla en general.

### **5.3.10. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE ASFALTO SEGÚN MÉTODO MARSHALL**

El contenido de asfalto se obtendrá luego de realizar los diferentes gráficos derivados de las ecuaciones volumétricas de la mezcla y de evaluar para la máxima densidad, la máxima estabilidad y para un promedio de los vacíos de aire.

Los seis gráficos que se realizan para el análisis son:

- Peso unitario vs. Contenido de asfalto
- Estabilidad vs. Contenido de asfalto
- Vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto
- Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto
- Vacíos de aire vs. Contenido de asfalto
- Flujo vs. Contenido de asfalto

Estos se evaluarán para las tres condiciones de tráfico que se encuentran establecidas en la Norma Colombiana INVIAS (Artículo 450), para tráfico alto, medio y bajo, medidos en función de las repeticiones de ejes sencillos equivalentes de 8.2 toneladas.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las ecuaciones volumétricas para las 18 briquetas iniciales (briquetas de diseño Marshall) y para las 9 briquetas con contenido de asfalto en rangos definidos (marcadas con \*).



G.E. del asfalto	0,998
Asfalto absorbido	0,58%

G.E. bulk del agregado	2,6569
G.E. efectiva del agregado	2,6985

No. briqueeta	% de asfalto en el peso de la mezcla	Altura espécimen (cm)	Ecuaciones volumétricas de la mezcla										Estabilidad (lb)		Flujo 0,01 pig
			Volumen bulk (cm3)	G.E. bulk espécimen	G.E. máxima (mezcla suelta)	Peso unitario (pcf)	% Vacíos de aire	% VMA	% VFA	Medida	Ajustada				
1	4,00%	6,49	523,6	2,294								1169,8	1087,9	9,6	
2	4,00%	6,56	530,1	2,267								1014,4	943,4	9,3	
3	4,00%	6,56	530,5	2,239								651,9	580,2	9,5	
	Promedio			2,267	2,526	141,207	10,277	18,099	43,219				870,50	9,47	
4	4,50%	6,31	512,9	2,324								1066,2	1023,5	9,0	
5	4,50%	6,05	493,7	2,335								962,6	962,6	9,6	
6	4,50%	6,43	523,2	2,353								1532,3	1425	13,8	
	Promedio			2,337	2,506	145,609	6,742	15,985	57,826				1137,03	10,80	
7	5,00%	6,35	524,1	2,368								1490,8	1386,5	14,6	
8	5,00%	6,40	519,1	2,396								1791,2	1719,5	15,5	
9	5,00%	6,36	520,7	2,368								1635,8	1521,3	13,5	
	Promedio			2,377	2,487	148,101	4,395	14,995	70,689				1542,43	14,53	
10	5,50%	6,30	513,3	2,401								1687,6	1620,1	14,3	
11	5,50%	6,33	517,4	2,395								1635,8	1570,4	14,5	
12	5,50%	6,35	517,6	2,404								1915,5	1838,8	16,2	
	Promedio			2,400	2,467	149,513	2,726	14,636	81,376				1676,43	15,00	
4 *	5,55%	6,20	511,3	2,412								1687,6	1620,1	16,0	
5 *	5,55%	6,20	510,9	2,450								2309,0	2216,7	20,0	
6 *	5,55%	6,30	512,4	2,445								2391,9	2296,2	19,5	
	Promedio			2,436	2,567	151,735	5,116	13,413	61,857				2044,33	18,50	
1 *	5,85%	6,30	513,0	2,424								1532,3	1471,00	17,00	
2 *	5,85%	6,20	504,3	2,464								1615,1	1550,50	16,50	
3 *	5,85%	6,20	504,0	2,450								1708,3	1640,00	17,00	
	Promedio			2,446	2,526	152,379	3,167	13,322	76,227				1553,83	16,83	
13	6,00%	6,24	506,0	2,429								1791,2	1791,2	17,5	
14	6,00%	6,27	507,8	2,457								1998,3	1998,3	21,0	
15	6,00%	6,23	504,4	2,451								1874	1874	20,0	
	Promedio			2,446	2,448	152,358	0,103	13,472	99,237				1887,83	19,50	
7 *	6,15%	6,20	505,9	2,464								1687,6	1620,1	20,5	
8 *	6,15%	6,20	504,7	2,453								1770,5	1699,6	20,0	
9 *	6,15%	6,20	506,3	2,465								1584,0	1473,2	19,5	
	Promedio			2,461	2,501	153,292	1,613	13,080	87,671				1597,63	20,00	
16	6,50%	6,11	494,4	2,427								1480,5	1539,7	17,8	
17	6,50%	6,08	492,4	2,467								1584	1647,4	22,0	
18	6,50%	6,21	502,5	2,46								1459,8	1459,8	21,0	
	Promedio			2,451	2,429	152,711	-0,903	13,733	106,572				1548,97	20,27	

Tabla 6. Tabla de ecuaciones volumétricas, estabilidad y flujo de la mezcla para Diseño Marshall

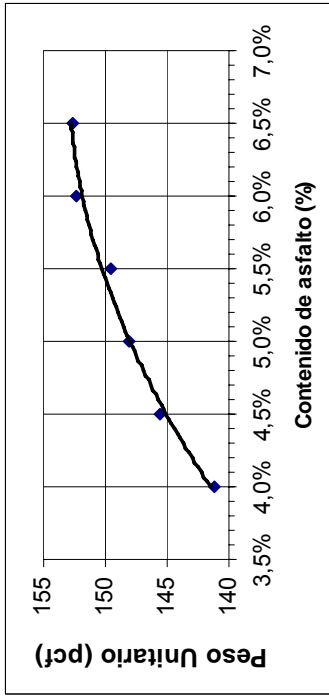


Gráfico 4. Gráfico Peso unitario vs. Contenido de asfalto

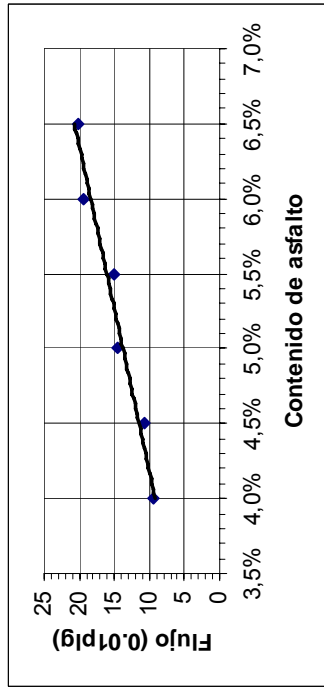


Gráfico 6. Gráfico Flujo vs. Contenido de asfalto

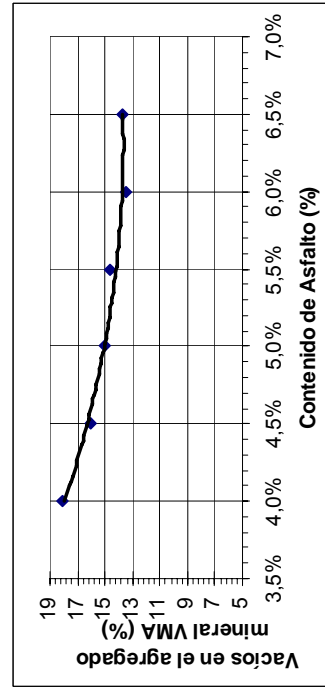


Gráfico 8. Gráfico Vacíos en agregado mineral vs. Cont. Asfalto

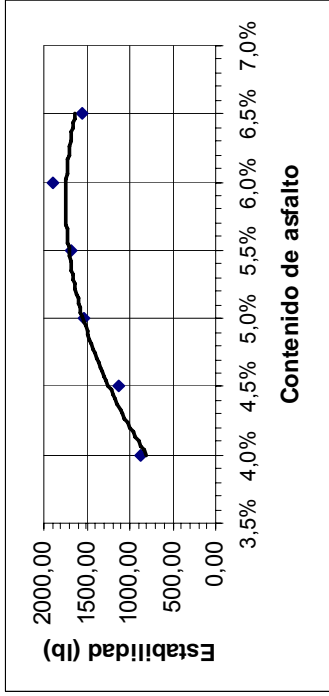


Gráfico 5. Gráfico Estabilidad vs. Contenido de asfalto

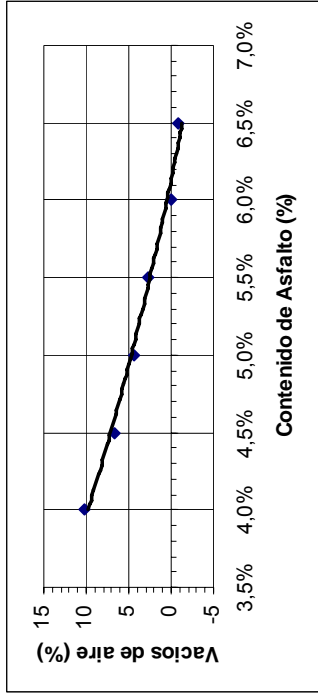


Gráfico 7. Gráfico Vacíos de aire vs. Contenido de asfalto

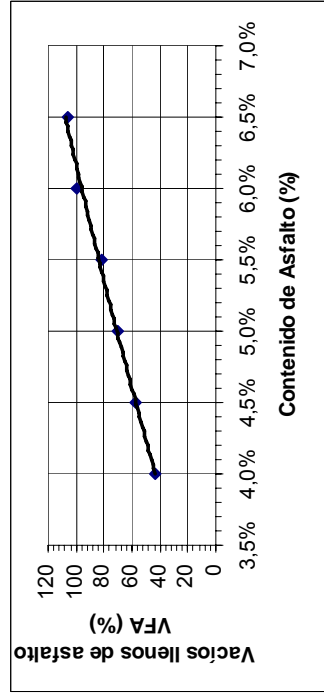


Gráfico 9. Gráfico Vacíos llenos de asfalto vs. Cont. Asfalto



De acuerdo con los comportamientos y tendencias generales que se han establecido para las curvas de las ecuaciones volumétricas y de la estabilidad y el flujo se procede a realizar las siguientes consideraciones:

- En los gráficos se nota que se cumple con el comportamiento de la estabilidad, ya que generalmente la estabilidad aumenta con el aumento del asfalto hasta un máximo valor, después del cual decrece.
- Para el flujo también se cumple con el comportamiento general en la medida que el flujo aumenta con el aumento del asfalto.
- De forma general la curva para peso unitario de la mezcla total es similar a la curva de estabilidad, excepto que el máximo peso unitario normalmente ocurre en un contenido de asfalto ligeramente mayor que el de máxima estabilidad. Según se observa en el gráfico este comportamiento aunque tiene cierta similitud al enunciado el peso unitario máximo se encuentra en un contenido de asfalto mayor que el determinado para la máxima estabilidad.
- La tendencia normal para el porcentaje de vacíos con aire es que éste decrece con el aumento del asfalto y finalmente se aproxima a un mínimo contenido de vacíos. En el caso estudiado el porcentaje decrece pero no se acerca a un mínimo sino que continúa decreciendo en forma proporcional.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral generalmente decrece hasta un mínimo y luego comienza a aumentar con el contenido de asfalto. Como se observa en el gráfico para este caso el porcentaje de vacíos decrece y tiende a estabilizarse luego del 5.7.



Cabe aclarar que la teoría indica que el contenido de asfalto definido debe de cumplir con las condiciones límites dadas por las Normas Colombianas INVIAS. Estas especificaciones son las siguientes:

CARACTERISTICAS	TRANSITO DE DISEÑO (N) Ejes equivalentes de 80 kN		
	$>5 \times 10^6$	$5 \times 10^5 - 5 \times 10^6$	$<5 \times 10^5$
Compactación, golpes/cara	75	75	75
Estabilidad mínima kg	900	750	600
Flujo 0.01 in	8-14	8-16	8-16
Vacíos con aire:			
Capa de rodadura %	4-6	3-5	3-5
Base asfáltica %	4-8	4-8	4-8
Vacíos mínimos en agregados minerales:			
Gradación MDC-0 %	14	14	14
Gradación MDC-1 %	14	14	14
Gradación MDC-2 %	15	15	15
Gradación MDC-3 %	16	16	16
Vacíos llenos de asfalto %	65-75	65-78	65-80

Cuadro 1. Criterios Normas INVIAS (Tomada de Normas INVIAS Art. 450.4.2)

Considerando que el diseño se realiza para una base asfáltica MDC-2, el contenido de asfalto según el método Marshall para los diferentes tránsitos de diseño son los siguientes:

- Para Máxima estabilidad: 5.9% de asfalto
- Para Máximo Peso Unitario: 6.4% de asfalto
- Valor medio vacíos de aire: 5.15%

Promedio para las curvas analizadas: 5.82%  $\approx$  5.85%



Con este porcentaje de asfalto (5.85%) se evalúa para los criterios de las Normas INVIAS:

CARACTERÍSTICA	OBTENIDO	ACEPTACIÓN SEGÚN NIVEL DE TRÁFICO		
		PESADO	MEDIO	BAJO
Estabilidad mínima	800 Kg	×	✓	✓
Flujo (0.01 in)	17.5	×	×	×
VFA	90%	×	×	×
VMA mínimo	14%	×	×	×

Tabla 7. Aceptación de características según Norma INVIAS para un contenido de asfalto de 5.85%

Considerando que:

- *Tránsito pesado*:  $>5 \times 10^6$  repeticiones de ejes sencillos equivalentes de 8.2 ton
- *Tránsito medio*: entre  $5 \times 10^5$  y  $5 \times 10^6$  repeticiones de ejes sencillos equivalentes de 8.2 ton
- *Tránsito bajo*:  $<5 \times 10^5$  repeticiones de ejes sencillos equivalentes de 8.2 ton

Realizando variaciones del contenido de asfalto en busca de cumplir con las Normas INVIAS, se ha determinado como 5.05% aquel que cumple la mayoría de los criterios para el caso del tráfico pesado y medio, y cumple totalmente para el caso de tránsito bajo, así:

CARACTERÍSTICA	OBTENIDO	ACEPTACIÓN SEGÚN NIVEL DE TRÁFICO		
		PESADO	MEDIO	BAJO
Estabilidad mínima	720 Kg	×	×	✓
Flujo (0.01 in)	14	✓	✓	✓
VFA	72%	✓	✓	✓
VMA mínimo	15%	✓	✓	✓

Tabla 8. Aceptación de características según Norma INVIAS para un contenido de asfalto de 5.05%



Nótese en los gráficos de las ecuaciones volumétricas que ante cualquier incremento del contenido de asfalto para tratar de cumplir con el criterio de la estabilidad aunque sea para tránsito medio, genera que el flujo y los VMA se salgan de los límites permitidos.

De esto se observa que las características del diseño definitivamente no se cumplen para un tránsito pesado y medio, por lo cual este estudio se enfocará en el análisis del efecto producido para tránsitos bajos.

### 5.3.11. POSIBLES DAÑOS GENERADOS POR LA ELECCIÓN DE LA MEZCLA DE DISEÑO

De acuerdo con las características encontradas para la mezcla asfáltica y su porcentaje de asfalto de 5.85%, se encontraría totalmente fuera de lugar su aplicación para un tránsito pesado. En el caso de emplear este contenido de asfalto en una mezcla para tráfico medio y bajo se pueden apreciar los posibles daños de una mezcla con alto porcentaje de vacíos llenos de asfalto y bajo contenido de vacíos. Estos daños corresponden a los presentados en la segunda parte de la siguiente tabla:

Modos de Daño	Factores contribuyentes
Susceptibilidad a la humedad Ravelling Fractura termal Fractura por piel de cocodrilo Fractura por fatiga longitudinal Agrietamiento de bloque Envejecimiento	Bajo Vb (AC%) Alto Va% Bajo VFA
Rutting (Surcos) Shoving (Distorsiones)	Alto Vb (AC%) Bajo Va% (<4%) Alto Vfa

Cuadro 2. Factores contribuyentes en el daño de la mezcla (Fuente: Witczak, 2007)

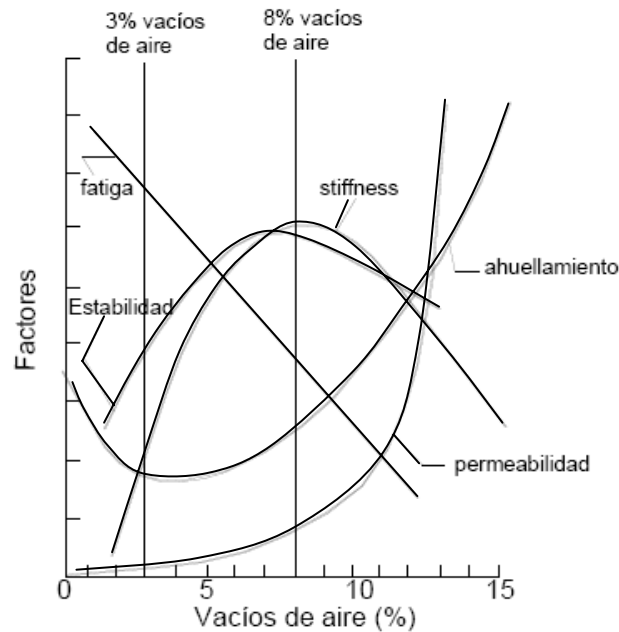


Figura 7. Efecto de los vacíos de aire en varias propiedades de las mezclas asfálticas (Crawford, 1992)

De acuerdo al gráfico anterior para el diseño obtenido por Marshall con contenido de asfalto de 5.85% se presentaría:

- Permeabilidad muy baja
- Resistencia al ahuellamiento bajo
- Rigidez (stiffness) baja
- Estabilidad baja
- Resistencia a la fatiga alta

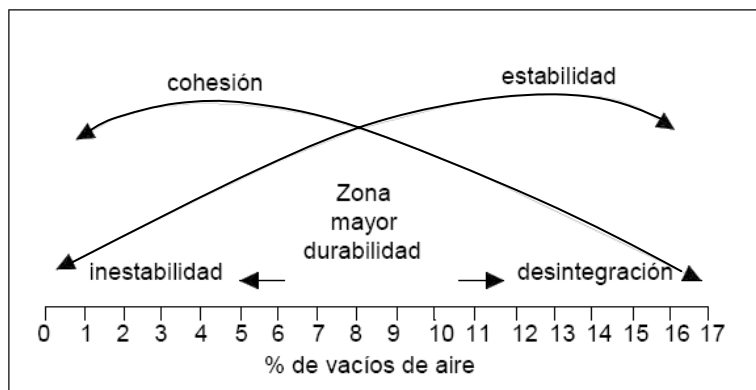


Figura 8. Efecto de los vacíos de aire en la durabilidad del pavimento (Crawford, 1992)



De acuerdo al gráfico para la durabilidad del pavimento el diseño realizado por Marshall se encuentra fuera de la zona de mayor durabilidad puesto que los bajos vacíos ocasionan una cohesión alta que con el tiempo se ve reflejada en inestabilidad de la mezcla de pavimento.

### **5.3.12. POSIBILIDADES DE REPLANTEO PARA LA CORRECCIÓN DEL DISEÑO**

Debido a que el contenido obtenido por Marshall (5.85%) para las condiciones iniciales del diseño no cumple con ninguna de las exigencias que debe cumplir una mezcla asfáltica MDC-2 para un nivel de tránsito alto, a este no se le evaluarán correcciones. Para el caso de aplicar este contenido de asfalto para un tránsito medio y bajo se podría atender a las recomendaciones proporcionadas por el Instituto del Asfalto y que fueron enunciadas en el numeral 4.3.3. “Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño”.

#### **Pocos vacíos y estabilidad satisfactoria**

Eventualmente, los bajos contenidos de vacíos pueden producir inestabilidad asociada con el flujo plástico después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito debido a la reorientación de las partículas y a la compactación adicional.

Los vacíos insuficientes pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; no obstante la estabilidad podría ser satisfactoria inicialmente para el tipo de tránsito especificado. Asimismo, la degradación de un agregado pobre durante la producción de la mezcla o bajo la acción del tránsito puede ocasionar subsecuentemente la inestabilidad y el flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, las mezclas con pocos vacíos tendrán que ajustarse por uno de los métodos enunciados en Pocos vacíos y baja estabilidad, sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria.



---

## **Pocos vacíos y baja estabilidad**

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la gradación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino.

Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento. Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse.

Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

## **SALVEDAD PARA LA CONTINUIDAD DEL TRABAJO**

En el caso del diseño obtenido por Marshall con contenido de asfalto de 5.85% si la mezcla fuese a ser analizada para un nivel de tránsito pesado debería ser replanteada totalmente desde un comienzo, pero como se ha establecido su análisis para un nivel de tránsito medio y bajo, se continuará con este diseño y aunque rigurosamente debería de ser corregido de acuerdo a las



recomendaciones antes planteadas, no se hará debido a restricciones de tiempo y recursos. Además se evaluará para el contenido de asfalto de 5.1% que cumple con la mayoría de las características determinadas por la Norma INVIAS para tránsito alto y medio, y las cumple totalmente para tránsito bajo.

#### **5.4. POSICIÓN DEL DISEÑO EN LA VENTANA DE DISEÑO PROPUESTA POR M. WITCZAK**

Para la construcción de la Ventana de Diseño es necesario tener presente las especificaciones típicas para la determinación del contenido de asfalto óptimo. En este caso la ventana se crea a partir de los siguientes aspectos:

Para las propiedades de la mezcla

- Estabilidad (Min)
- Flujo (Min – Max)
- Rigidez (Min) \*\*
- Estabilidad retenida (Min) \*\*

Para el volumen de la mezcla

- %Va (Min – Max)
- %Vma (Min)
- %Vfb (Min – Max)
- %Vb (Min) (Especificado por el Instituto del Asfalto)

Para las propiedades gravimétricas

- %AC (Min – Max)\*\*
- Proporción llenante/ligante (Min – Max)\*\*
- El conocimiento de  $G_s$  y  $G_{sb}$  permite la conversión de las propiedades gravimétricas a volumétricas

\*\*No es indispensable su conocimiento para la construcción de la Ventana



Para la Construcción de la Ventana de Diseño se emplearán los criterios que establece la Norma INVIAS para un tránsito bajo (Cuadro 1), ya que es aquel tránsito con el cual se logro cumplir con todos los criterios para esta Norma.

Como las Normas INVIAS no especifican el criterio del mínimo %Vb se empleará el establecido por el Instituto del Asfalto para un porcentaje de vacíos (Va) de 4%, el cual se basa en el diámetro nominal de la más grande partícula de agregado.

Dnom.	%Vb min
#4	13
1/2"	10
3/4"	9
1"	8
1 1/2"	7
2"	7

*Cuadro 3. Criterio para %Vb min según el Dnom (Fuente: Witczak, 2007)*

El Instituto del Asfalto agregó este criterio de Vb mínimo para asegurarse que suficiente asfalto siempre fuera adicionado a la mezcla para cubrir apropiadamente todas las partículas con el espesor de la película apropiado para resistir problemas de durabilidad comunes asociados con:

- Susceptibilidad a la humedad (Stripping).
- Ravelling.
- Excesivo envejecimiento.
- Resistencia de la mezcla a la fractura.

Empleando las especificaciones INVIAS para un tránsito bajo (que sería el rango para el que se logró cumplir totalmente las especificaciones para un contenido de asfalto) y empleando el criterio del Instituto del Asfalto para el %Vb min, se tiene el siguiente gráfico que reconstruye la Ventana de Diseño:

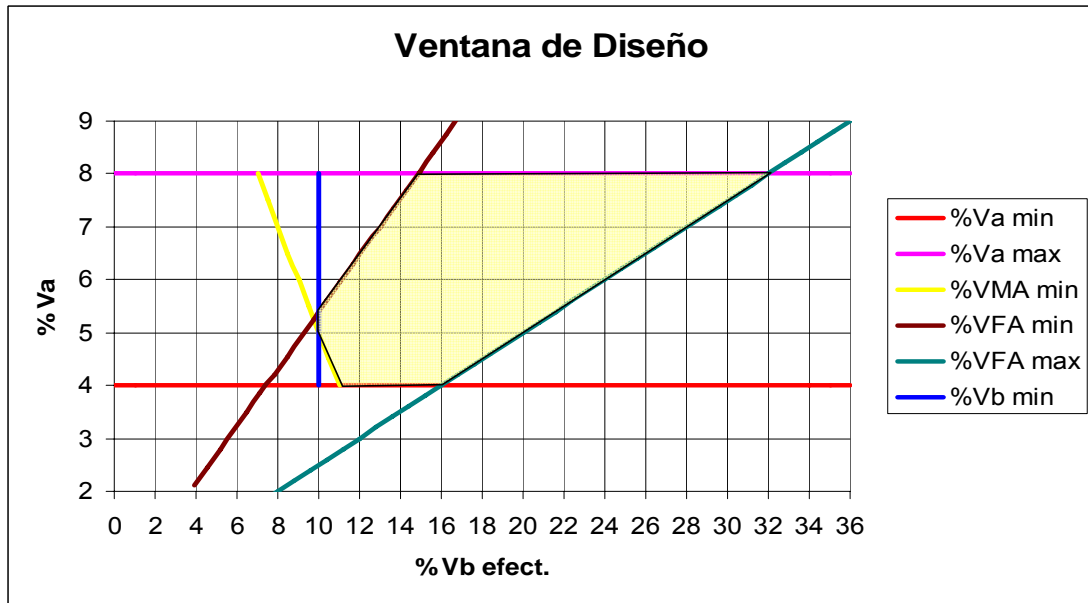


Gráfico 10. Construcción de la Ventana de Diseño a partir de las especificaciones de vacíos

Como la Ventana de Diseño se encuentra graficada en función de parámetros volumétricos se debe de convertir el contenido de asfalto (CA) que se encuentra en función del peso de la mezcla asfáltica a su correspondiente en volumen.

$$\%Vb_{eff} = \frac{G_{mb} * \left( P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s \right)}{G_b} \quad \text{Fórmula 10}$$

A continuación se presenta las características de vacíos y resultado del cálculo del porcentaje de volumen de asfalto efectivo para la ubicación del diseño Marshall (Contenido de asfalto de 5.85%) dentro de la ventana antes graficada.

Contenido de asfalto 5,85%	
% Va	3,17
% VMA	13,32
% Vbeff	13,00

Tabla 9. Datos para la ubicación del contenido de asfalto obtenido por Marshall dentro de la Ventana de Diseño



Con estas características de vacíos y conociendo el gráfico para el caso general de las especificaciones para tránsito bajo, se puede ubicar el punto que representa tal posición dentro de la Ventana.

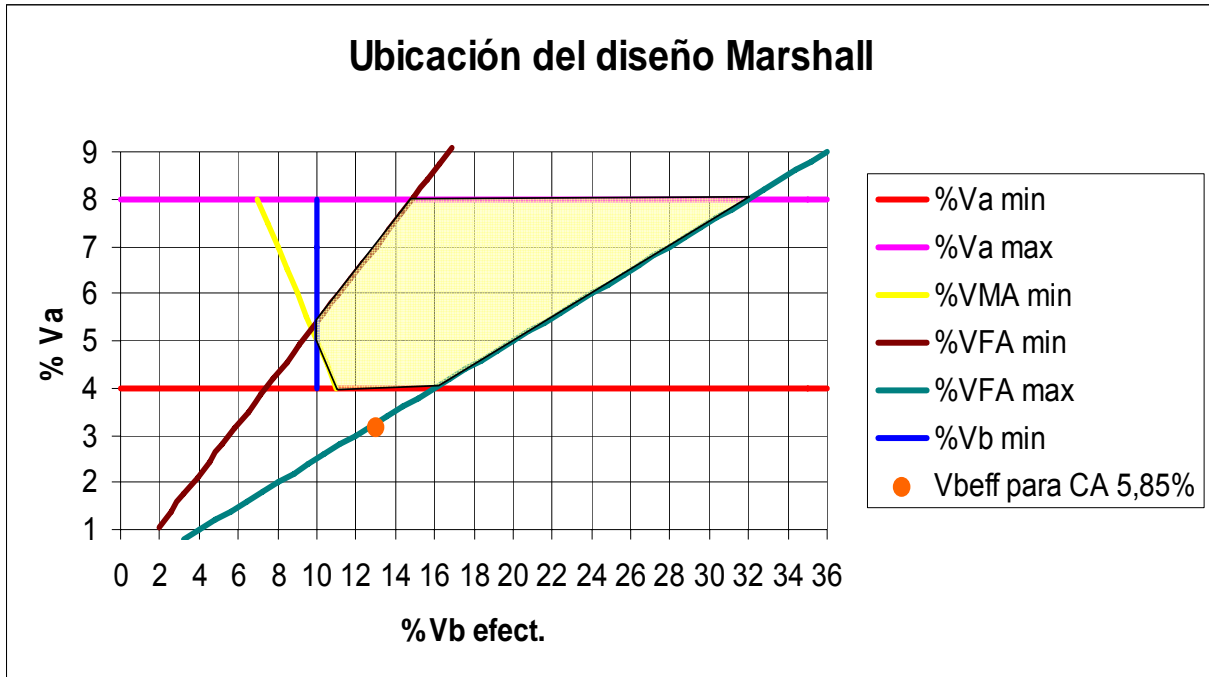


Gráfico 11. Ubicación del CA de 5.85% obtenido por Marshall en la Ventana de Diseño

Como se puede notar el diseño para contenido de asfalto de 5.85% obtenido por Marshall se encontró por fuera de la Ventana de Diseño, corroborando el hecho de que el diseño no cumple con todas las exigencias de la Norma INVIAS en cuanto a los porcentajes de vacíos.

Realizando el mismo proceso para el caso del porcentaje de asfalto de 5.05%, hallado como el porcentaje que cumple totalmente para el caso de tránsito bajo dentro de la normativa INVIAS, se evaluará dentro de la Ventana de Diseño por medio de sus características de vacíos y del porcentaje de volumen de asfalto efectivo. A continuación se presenta una tabla con esta información:



Contenido de asfalto 5,05%	
% Va	4,2
% VMA	15,0
% Vbeff	10,7

Tabla 10. Datos para la ubicación dentro de la Ventana de Diseño de un contenido de asfalto de 5.05%

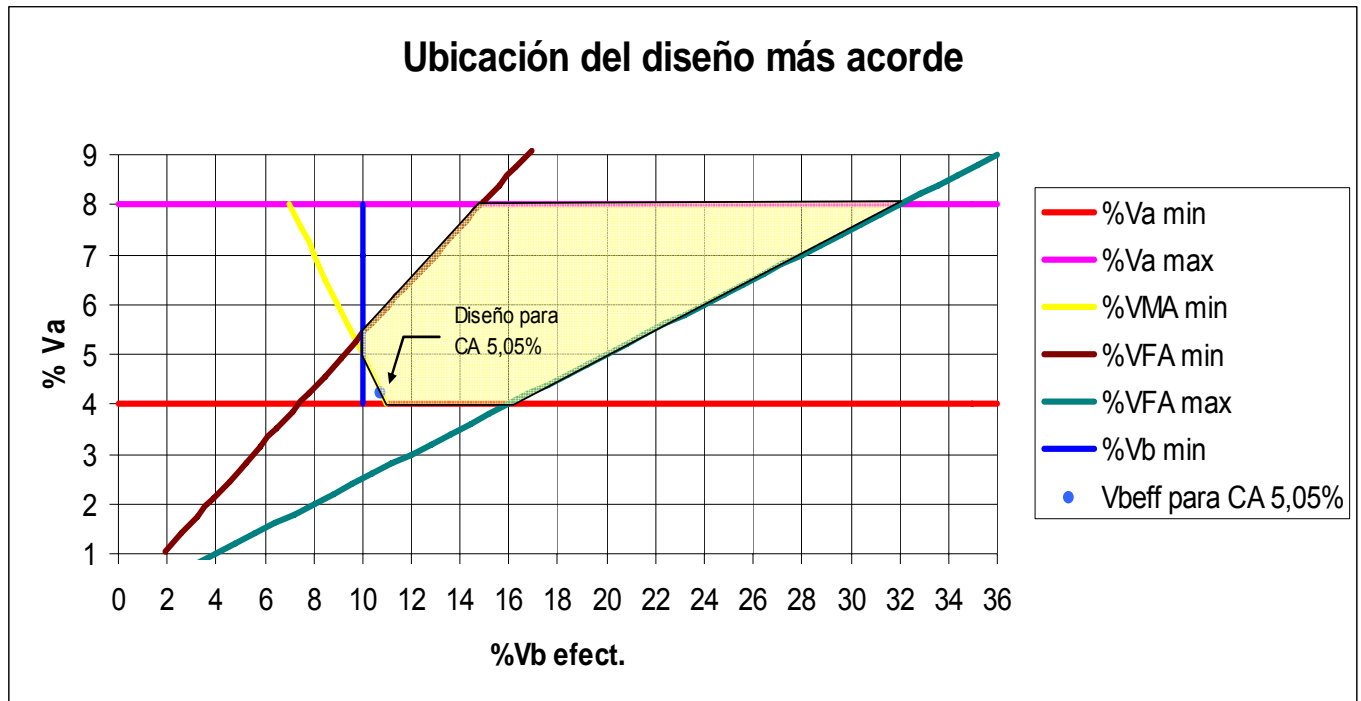


Gráfico 12. Ubicación del contenido de asfalto de mejor aceptación a las Normas INVIAS dentro de la Ventana de Diseño

Como se puede notar este punto se encuentra en el límite de la Ventana de Diseño y ante algún cambio del contenido de asfalto podría fácilmente salirse de ésta. Por ello, se procederá a calcular las tolerancias sobre el contenido de asfalto de 5.05% para que se en todo momento se encuentre en los límites aceptables de la Ventana.

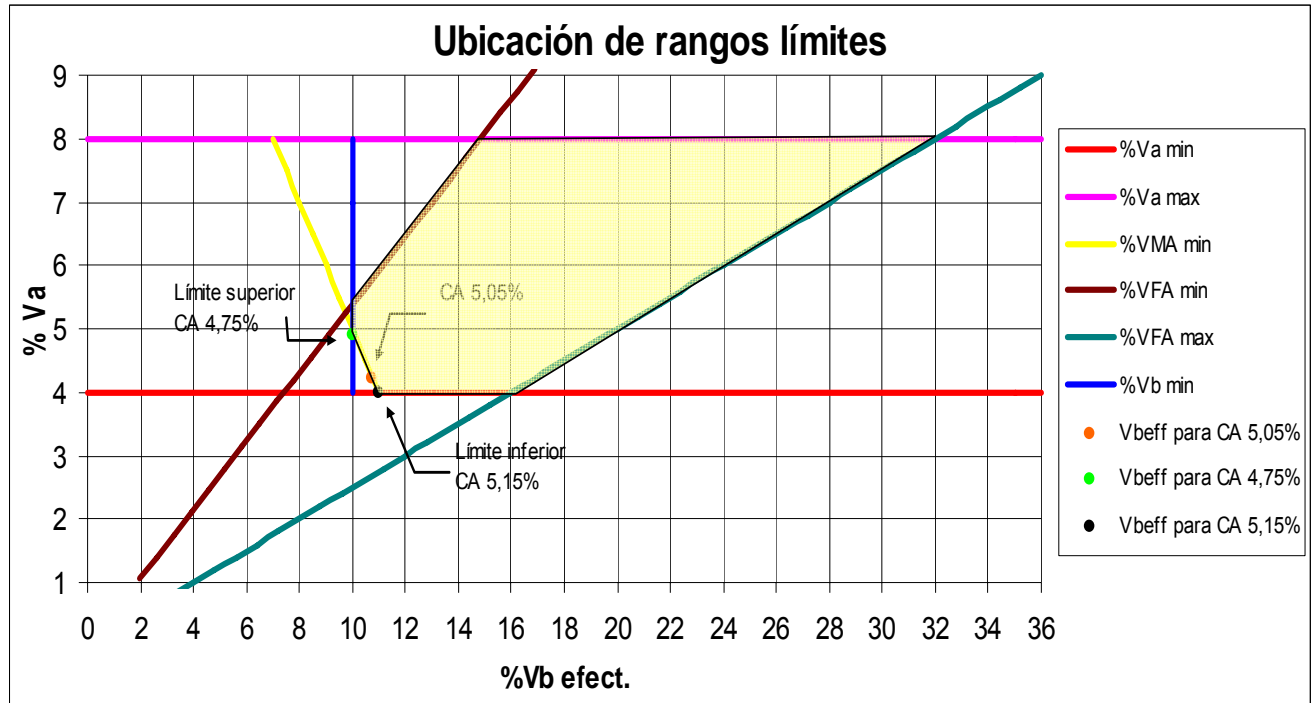


Gráfico 13. Rangos límites para CA 5.05% en la Ventana de Diseño

De estos rangos límites se encuentra que:

	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR
% Va	4,9	4,0
% Vbeff	10,0	11,0
% CA	4,75	5,15

Tabla 11. Datos de los límites del CA de 5.05% a partir de la Ventana de Diseño

Si se comparan los porcentajes límites obtenido de la Ventana de Diseño con los porcentajes de variación que permite la Norma INVIAS, se tiene:

	% Mínimo CA	% CA en estudio	% Máximo CA
<b>Norma INVIAS</b>	4,75	5,05	5,35
<b>Ventana de Diseño</b>	4,75	5,05	5,15

Tabla 12. Comparación de los límites del CA de 5.05% según INVIAS y rangos de la Ventana de Diseño

Como se observa en el rango superior existe un margen permitido por la norma que se encuentra fuera de la Ventana de Diseño, mientras que para el caso del rango inferior se encuentra justamente en el límite de aceptación.



## 5.5. MÓDULOS RESILIENTES PARA LAS BRIQUETAS DEL DISEÑO

A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos al ensayar las 18 briquetas en la Máquina Universal como se describió en el numeral 4.6.2.

No. BRIQUETA	POSICIÓN	ENSAYO NO. 1 (Temp. 20)		ENSAYO NO. 2 (Temp. 25)		ENSAYO NO. 3 (Temp. 30)	
		TEMP. MEDIA (°C)	MÓDULO (Mpa)	TEMP. MEDIA (°C)	MÓDULO (Mpa)	TEMP. MEDIA (°C)	MÓDULO (Mpa)
1	Sin girar	20,05	5078,00	25,95	3905,00	31,45	2284,00
	Girada	20,15	4859,00	25,90	3832,00	31,35	2428,00
	Promedio	20,10	4968,00	25,93	3868,50	31,40	2356,00
2	Sin girar	20,20	4424,00	26,00	3486,00	31,30	2448,00
	Girada	20,15	4432,00	25,95	3432,00	30,95	2622,00
	Promedio	20,18	4428,00	25,98	3459,00	31,13	2535,00
3	Sin girar	20,30	4348,00	26,05	3314,00	30,80	2517,00
	Girada	20,40	4503,00	26,10	2918,00	30,55	2122,00
	Promedio	20,35	4425,50	26,08	3116,00	30,68	2319,00
4	Sin girar	20,45	4986,00	25,95	3283,00	30,30	2887,00
	Girada	20,50	5129,00	26,15	3428,00	30,10	2886,00
	Promedio	20,48	5057,50	26,05	3355,50	30,20	2886,50
5	Sin girar	20,50	5014,00	26,05	4012,00	30,15	3165,00
	Girada	20,50	5571,00	26,10	4011,00	30,05	3378,00
	Promedio	20,50	5292,50	26,08	4011,50	30,10	3271,50
6	Sin girar	20,45	6224,00	26,10	4951,00	30,10	4061,00
	Girada	20,40	6293,00	26,05	5215,00	30,15	4292,00
	Promedio	20,43	6258,50	26,08	5083,00	30,13	4176,50
7	Sin girar	20,45	7196,00	26,10	4571,00	30,05	3121,00
	Girada	20,40	6905,00	26,05	4238,00	30,10	2741,00
	Promedio	20,43	7050,50	26,08	4404,50	30,08	2931,00
8	Sin girar	20,55	5996,00	26,10	4123,00	30,00	2772,00
	Girada	20,55	5664,00	26,00	4153,00	30,05	3303,00
	Promedio	20,55	5830,00	26,05	4138,00	30,03	3037,50
9	Sin girar	20,60	5340,00	25,95	3991,00	30,05	3251,00
	Girada	20,75	5255,00	25,90	4719,00	30,00	323,00
	Promedio	20,68	5297,50	25,93	4355,00	30,03	3240,50
10	Sin girar	20,70	5209,00	25,95	3781,00	30,05	2605,00
	Girada	20,75	5206,00	26,00	3752,00	30,05	2525,00
	Promedio	20,73	5207,50	25,98	3766,50	30,05	2565,00
11	Sin girar	20,70	5196,00	26,00	3716,00	29,95	2949,00
	Girada	20,75	5460,00	25,95	3889,00	29,80	2721,00
	Promedio	20,73	5328,00	25,98	3802,50	29,88	2835,00
12	Sin girar	20,65	5316,00	26,05	4053,00	29,65	3376,00
	Girada	20,70	5372,00	25,95	4113,00	29,60	3293,00
	Promedio	20,68	5344,00	26,00	4083,00	29,63	3334,50
13	Sin girar	20,75	5269,00	26,00	4352,00	29,40	2983,00
	Girada	20,80	5382,00	26,00	3776,00	29,25	2932,00
	Promedio	20,78	5325,50	26,00	4064,00	29,33	2957,50



14	Sin girar	20,85	4593,00	26,00	3319,00	29,20	2130,00
	Girada	20,75	4745,00	26,00	2905,00	29,20	2483,00
	Promedio	20,80	4669,00	26,00	3112,00	29,20	2306,50
15	Sin girar	20,80	4607,00	26,00	3090,00	29,15	2062,00
	Girada	20,85	4560,00	26,05	3087,00	29,15	2095,00
	Promedio	20,83	4583,50	26,03	3088,50	29,15	2078,50
16	Sin girar	20,90	4272,00	25,90	2810,00	29,25	2220,00
	Girada	20,85	4197,00	25,95	3416,00	29,10	2352,00
	Promedio	20,88	4234,50	25,93	3113,00	29,18	2286,00
17	Sin girar	20,85	4698,00	25,90	3234,00	29,10	2789,00
	Girada	20,90	4275,00	25,95	3173,00	29,05	2075,00
	Promedio	20,88	4486,50	25,93	3203,50	29,08	2432,00
18	Sin girar	20,85	4909,00	25,90	3022,00	29,00	2380,00
	Girada	20,85	4428,00	25,85	2786,00	29,00	2271,00
	Promedio	20,85	4668,50	25,88	2904,00	29,00	2325,50

Tabla 13. Módulos Resilientes de las briquetas del diseño

A partir de esta información se realiza un gráfico donde se observa la dispersión de las medidas sobre las temperaturas de ensayo establecidas (20, 25 y 30 °C).

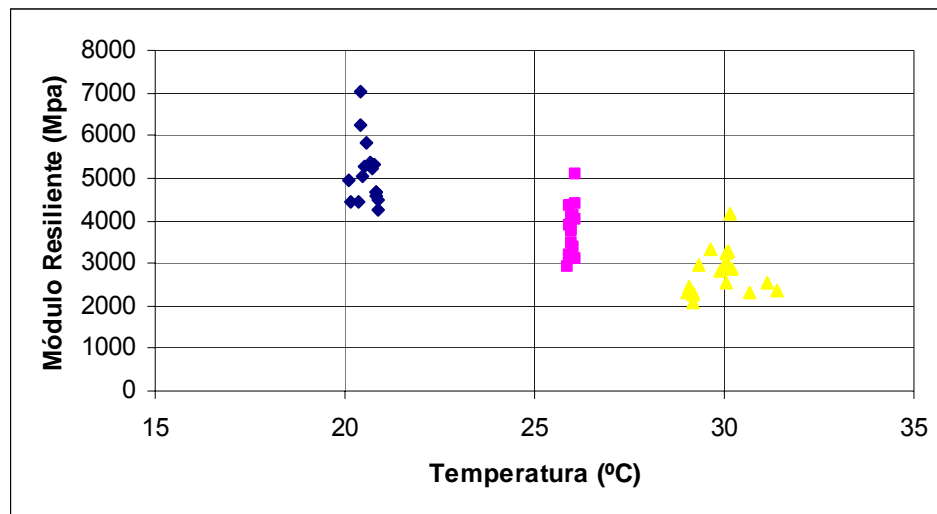


Gráfico 14. Variación de la temperatura para todas las briquetas del diseño

Los datos obtenidos en la tabla anterior son condensados para los promedios de cada contenido de asfalto y son establecidos para las tres temperaturas iniciales de prueba (20, 25 y 30 °C).



No. BRIQUETA	CONT. DE ASFALTO (%)	ENSAYO NO. 1 (Temp. 20 °C)		ENSAYO NO. 2 (Temp. 25 °C)		ENSAYO NO. 3 (Temp. 30 °C)	
		MÓDULO (Mpa)	PROMEDIO	MÓDULO (Mpa)	PROMEDIO	MÓDULO (Mpa)	PROMEDIO
1	4,0	4968,00	4607,17	3868,50	3481,17	2356,00	2403,33
2	4,0	4428,00		3459,00		2535,00	
3	4,0	4425,50		3116,00		2319,00	
4	4,5	5057,50	5536,17	3355,50	4150,00	2886,50	3444,83
5	4,5	5292,50		4011,50		3271,50	
6	4,5	6258,50		5083,00		4176,50	
7	5,0	7050,50	6059,33	4404,50	4299,17	2931,00	3069,67
8	5,0	5830,00		4138,00		3037,50	
9	5,0	5297,50		4355,00		3240,50	
10	5,5	5207,50	5293,17	3766,50	3884,00	2565,00	2911,50
11	5,5	5328,00		3802,50		2835,00	
12	5,5	5344,00		4083,00		3334,50	
13	6,0	5325,50	4859,33	4064,00	3421,50	2957,50	2447,50
14	6,0	4669,00		3112,00		2306,50	
15	6,0	4583,50		3088,50		2078,50	
16	6,5	4234,50	4463,17	3113,00	3073,50	2286,00	2347,83
17	6,5	4486,50		3203,50		2432,00	
18	6,5	4668,50		2904,00		2325,50	

Tabla 14. Promedio Módulos Resilientes de las briquetas del diseño

Para visualizar el comportamiento del Módulo Resiliente se construirá un gráfico a partir del cual se puede conocer para temperaturas de operación de una capa asfáltica MDC-2, el Módulo Resiliente de tensión basado en la deformación recuperable bajo la acción de una carga repetida.

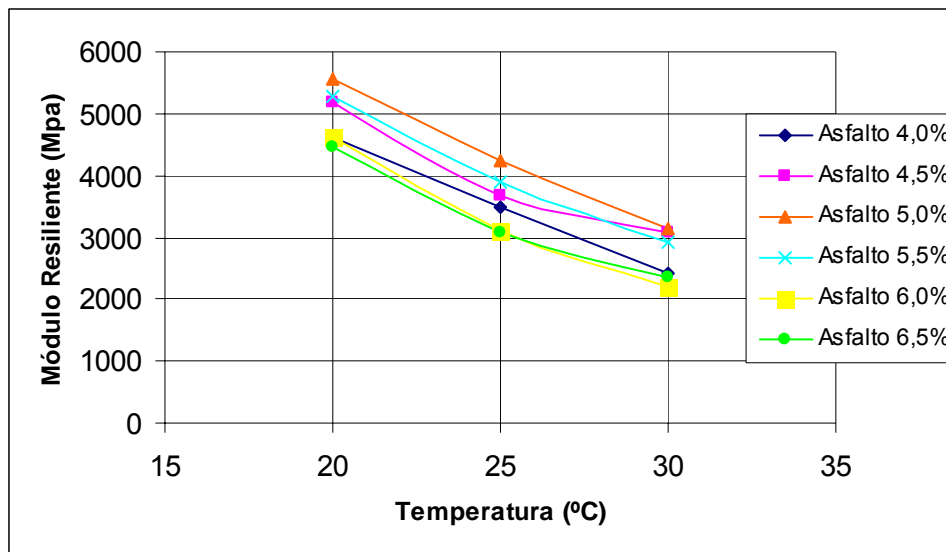


Gráfico 15. Variación del Módulo Resiliente para las briquetas promedio de cada contenido de asfalto



Con la información obtenida también se puede conocer la variación del módulo de acuerdo con el contenido de asfalto para cada una de las temperaturas. Estos gráficos son de gran importancia ya que dan una visión del contenido de óptimo para el cual se produce el mayor Módulo Resiliente.

### PARA 20 °C

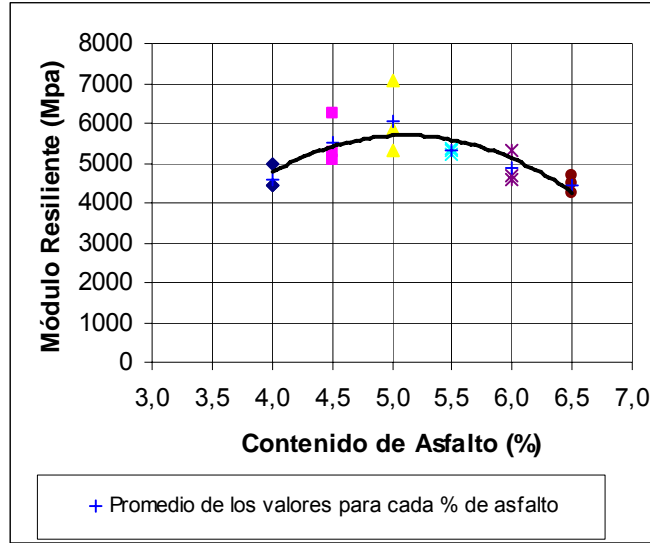


Gráfico 16. Variación del Módulo Resiliente con respecto al contenido de asfalto para una temperatura de 20°C

### PARA 25 °C

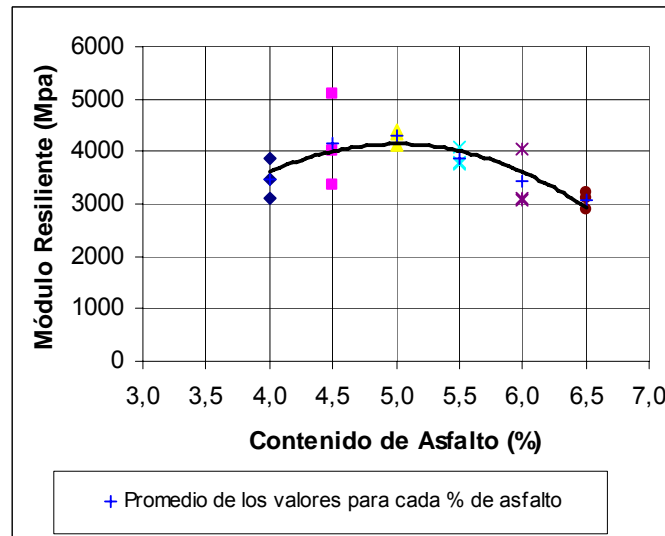


Gráfico 17. Variación del Módulo Resiliente con respecto al contenido de asfalto para una temperatura de 25°C



## PARA 30 °C

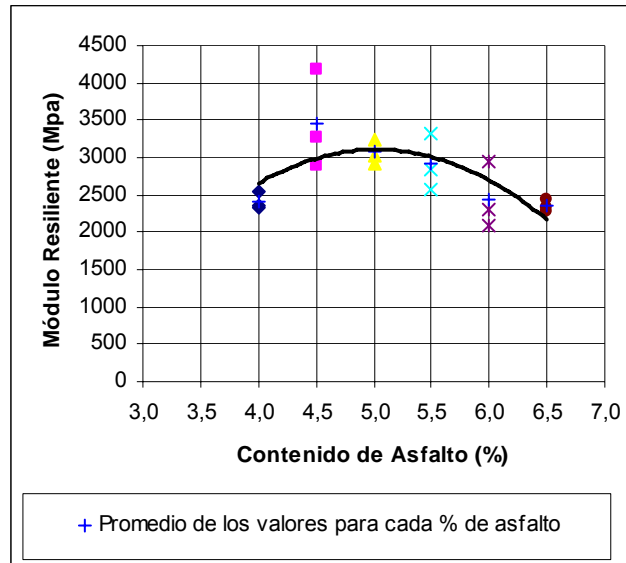


Gráfico 18. Variación del Módulo Resiliente con respecto al contenido de asfalto para una temperatura de 30°C

Al observar los gráficos de Módulo Resiliente contra Contenido de Asfalto para las briquetas del diseño inicial en las diferentes temperaturas se puede notar que en general el promedio que genera el máximo Módulo Resiliente se encuentra entre un contenido de asfalto de 5.05% y 5.1%, coincidiendo con el valor antes estudiado que genera la mejor aceptación de los parámetros establecidos en la norma INVIAS.

### 5.6. MÓDULOS RESILIENTES PARA LAS BRIQUETAS CON CONTENIDO ÓPTIMO Y RANGO DE VARIACIÓN

El análisis de los Módulos Resilientes se realizó a partir de las características de vacíos de 3 briquetas con contenido óptimo de asfalto (encontrado a partir del diseño Marshall) y otras 3 briquetas tanto para el límite superior como para el límite inferior que considera la norma INVIAS (rango de variación del  $\pm 0.3\%$  a partir del óptimo).



Estas 9 briquetas conservan las mismas proporciones de agregados gruesos y finos, y con ello las características de peso específico y absorción para el material granular.

No. BRIQUETA	POSICIÓN	ENSAYO NO. 1 (Temp. 20 °C)		ENSAYO NO. 2 (Temp. 25 °C)		ENSAYO NO. 3 (Temp. 30 °C)	
		TEMP. MEDIA (°c)	MÓDULO (Mpa)	TEMP. MEDIA (°c)	MÓDULO (Mpa)	TEMP. MEDIA (°c)	MÓDULO (Mpa)
1	Sin girar	19,90	4604,00	25,65	2973,00	30,30	2053,00
	Girada	19,90	4517,00	25,60	2546,00	30,10	2070,00
	Promedio	19,90	4560,50	25,63	2759,50	30,20	2061,50
2	Sin girar	20,00	4423,00	25,45	3071,00	29,90	1990,00
	Girada	19,95	4222,00	25,30	3200,00	29,85	1961,00
	Promedio	19,98	4322,50	25,38	3135,50	29,88	1975,50
3	Sin girar	19,95	4289,00	25,20	2869,00	29,65	1959,00
	Girada	20,00	3949,00	25,20	2891,00	29,65	1821,00
	Promedio	19,98	4119,00	25,20	2880,00	29,65	1890,00
4	Sin girar	19,95	3785,00	25,10	2787,00	29,45	2095,00
	Girada	20,05	4242,00	25,25	2681,00	29,30	2375,00
	Promedio	20,00	4013,50	25,18	2734,00	29,38	2235,00
5	Sin girar	20,05	4563,00	25,15	3160,00	29,30	2278,00
	Girada	19,95	4267,00	25,05	3217,00	29,30	2043,00
	Promedio	20,00	4415,00	25,10	3188,50	29,30	2160,50
6	Sin girar	20,00	4956,00	25,05	3005,00	29,35	2049,00
	Girada	19,95	4595,00	24,95	3118,00	29,45	2143,00
	Promedio	19,98	4775,50	25,00	3061,50	29,40	2096,00
7	Sin girar	19,95	3675,00	24,95	2895,00	29,55	1858,00
	Girada	20,00	3963,00	24,95	2136,00	29,50	1948,00
	Promedio	19,98	3819,00	24,95	2646,00	29,53	1903,00
8	Sin girar	20,00	3581,00	24,90	3019,00	29,45	1732,00
	Girada	19,95	3230,00	24,95	2828,00	29,45	1550,00
	Promedio	19,98	3405,50	24,93	2923,50	29,45	1641,00
9	Sin girar	19,95	3273,00	25,05	2645,00	29,15	1639,00
	Girada	20,05	3232,00	24,95	2544,00	29,35	1473,00
	Promedio	20,00	3252,50	25,00	2594,50	29,25	1556,00

*Tabla 15. Módulos Resilientes de las briquetas con contenido óptimo de asfalto y rango de variación*

Aunque inicialmente se tenía presupuestado realizar el ensayo solamente para la temperatura de 20°C, se ha extendido el análisis para las temperaturas de 25 y 30°C, en la medida que se considera que se puede generar un mayor espectro de resultados para diferentes condiciones de temperatura.



Para conocer la variación de la temperatura sobre la ejecución de los ensayos en las briquetas de estudio se procede a realizar un gráfico ilustrativo de esta variable con respecto a la fluctuación del Módulo Resiliente.

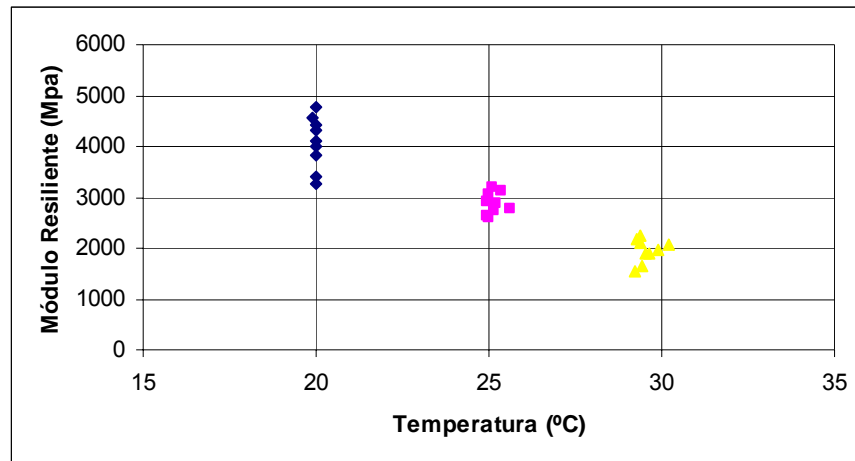


Gráfico 19. Variación de la temperatura para todas las briquetas con contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación

De este gráfico se puede notar que a una mayor temperatura se presenta una mayor susceptibilidad de los resultados en cuanto que existe una mayor variación de la temperatura de la máquina UTM que realiza el ensayo de tensión sobre las briquetas.

Para condensar la información obtenida se procede a realizar un cuadro de los valores promedio de los Módulos Resilientes.

No. BRIQUETA	CONT. DE ASFALTO (%)	ENSAYO NO. 1 (Temp. 20 °C)		ENSAYO NO. 2 (Temp. 25 °C)		ENSAYO NO. 3 (Temp. 30 °C)	
		MODULO (Mpa)	PROMEDIO	MODULO (Mpa)	PROMEDIO	MODULO (Mpa)	PROMEDIO
1	5,85	4560,50	4334,00	2759,50	2925,00	2061,50	1975,67
2	5,85	4322,50		3135,50		1975,50	
3	5,85	4119,00		2880,00		1890,00	
4	5,55	4013,50	4401,33	2734,00	2994,67	2235,00	2163,83
5	5,55	4415,00		3188,50		2160,50	
6	5,55	4775,50		3061,50		2096,00	
7	6,15	3819,00	3492,33	2646,00	2721,33	1903,00	1700,00
8	6,15	3405,50		2923,50		1641,00	
9	6,15	3252,50		2594,50		1556,00	

Tabla 16. Promedio Módulos Resilientes de las briquetas con contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación

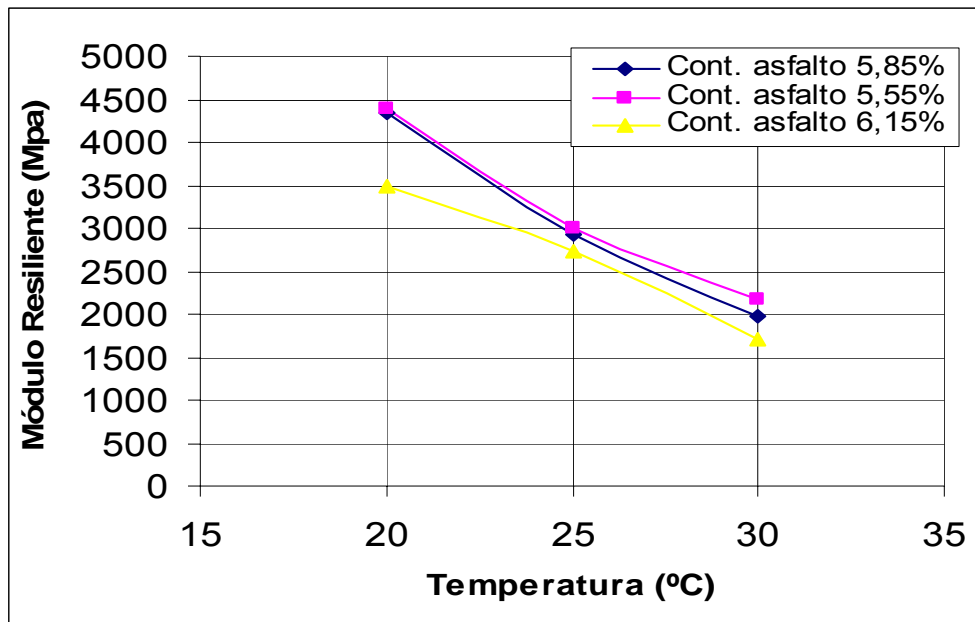


Gráfico 20. Variación del Módulo Resiliente para las briquetas promedio con contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación

Se aprecia que el contenido de asfalto correspondiente al rango de variación inferior de la norma (para este caso 5.55%) proporciona los mayores valores del Módulo Resiliente para todas las temperaturas, siendo correspondiente con los resultados de los ensayos realizados a las 18 briquetas iniciales. Esto en la medida que el valor del Módulo Resiliente se dio para un porcentaje que se aproximaba a 5.1%.

A continuación se presenta el gráfico de la variación del Módulo Resiliente ensayado a la temperatura de referencia (20°C) con respecto al contenido de asfalto.



## PARA 20 °C

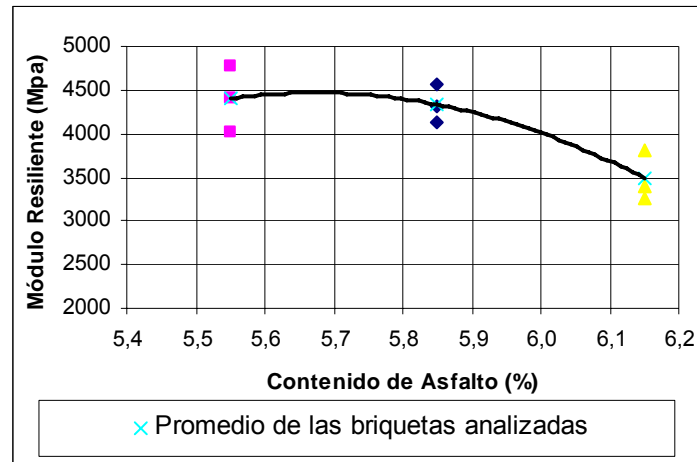


Gráfico 21. Variación del Módulo Resiliente a 20°C para el contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación

De este gráfico se observa que el máximo pico del módulo no se encuentra en el contenido encontrado por el Marshall, sino que se encuentra en un valor menor.

Para determinar si este máximo del gráfico anterior es correspondiente para las demás temperaturas, se grafican los resultados para las demás temperaturas de la siguiente forma:

## PARA 25 °C

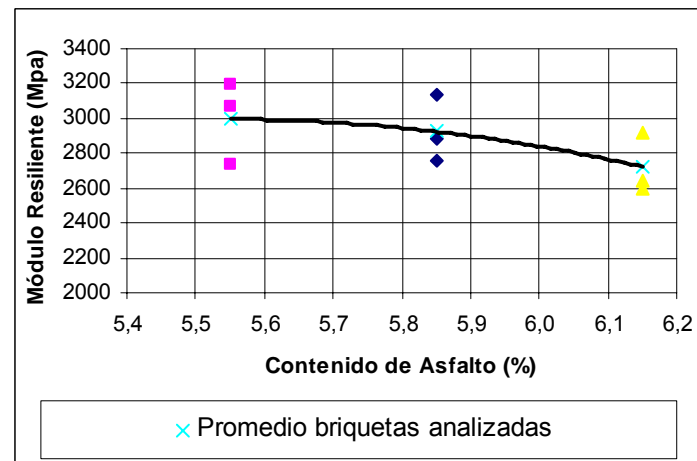


Gráfico 22. Variación del Módulo Resiliente a 25°C para el contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación



## PARA 30 °C

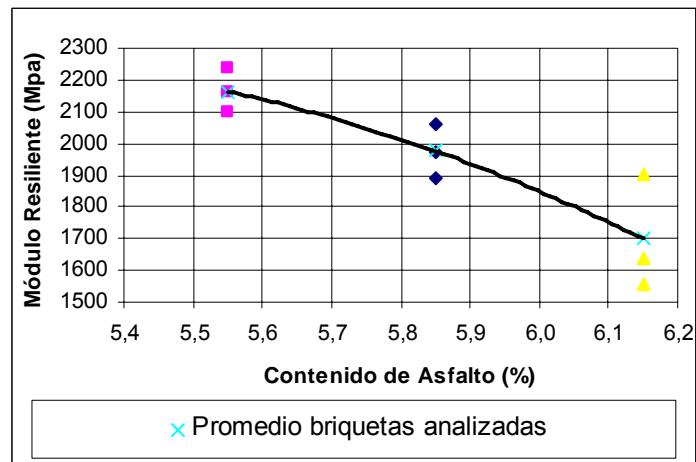


Gráfico 23. Variación del Módulo Resiliente a 30°C para el contenido de asfalto obtenido por Marshall y su rango de variación

Como se nota, a una mayor temperatura la curva del Módulo Resiliente tiene a presentar una mayor inclinación, y de igual forma a lo expresado anteriormente, el máximo módulo se encuentra en un menor porcentaje de contenido de asfalto al obtenido por el método Marshall.



---

## CONCLUSIONES

El diseño de mezclas asfálticas por Marshall con contenido de asfalto de 5.85% presentó un valor de flujo superior al de la especificación, lo que indica una fricción interna posiblemente baja y un porcentaje de asfalto de diseño relativamente alto. Además como el valor de estabilidad de la mezcla asfáltica es más bajo de las especificaciones y el contenido de asfalto es alto, se puede presentar una mezcla susceptible a exudación y ahuellamiento por flujo plástico.

De los gráficos de Módulo Resiliente para las briquetas del diseño inicial en las diferentes temperaturas, se puede notar que en general se puede establecer como promedio 5.05% como el contenido que genera el máximo Módulo Resiliente, así como también es el porcentaje de asfalto que genera la máxima aceptación de las características establecidas en la Norma INVIAS.

Considerando que se evalúa el comportamiento general de los tres porcentajes de asfalto definidos; se puede notar que la aquel que tubo el mejor comportamiento fue el correspondiente al contenido del 5.55%. Esto en la medida que es aquel que se acerca más al porcentaje que presentó la mayor aceptación de las Normas.

La Ventana de Diseño al ser la unión de los parámetros de vacíos con los cuales se realiza la selección del contenido de asfalto, puede convertirse en una herramienta para identificar posibles irregularidades en el diseño y establecer un contenido de asfalto adecuado a las exigencias de la norma en su conjunto.

Como se observó para el caso estudiado del contenido de asfalto de 5.05%, los rangos de variación del 0.3% que permite la Norma INVIAS, se pueden convertir en rangos de inseguridad, puesto que ante contenidos óptimos de asfalto muy cercanos a los límites de la Ventana de Diseño estos podrían llegar a encontrarse



---

por fuera de la misma y con esto la generación de los problemas en el comportamiento general de la mezcla.

En forma general las curvas de Módulo Resiliente contra contenido de asfalto nos muestran que el máximo módulo se encuentra en un determinado valor de asfalto, que es menor entre mayor sea la temperatura.

El Módulo Resiliente contribuye a determinar un contenido de asfalto que puede ser un muy buen referente para establecer en que medida el diseño Marshall presenta variaciones significativas de un óptimo real.

Considerando que el contenido de asfalto dado por el método Marshall se observó que era alto para las condiciones volumétricas de la mezcla y que el contenido de asfalto que originó el pico del Módulo Resiliente fue inferior al contenido óptimo dado por el diseño Marshall; se concluye que para este caso particular la aproximación del contenido de asfalto dada por el análisis del módulo es un criterio que podría tenerse en cuenta para la interpretación final del comportamiento de la mezcla asfáltica y del diseño de la fórmula de trabajo.



---

## BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. Guide for Design of Pavements Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C. USA, 1993.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. Section 4 Construction, Volume 04 Concrete an aggregates. México, 2004.

ASOCIACIÓN MEXICANA DE INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES. Reología de asfaltos, teoría, aplicación e implementación, 4 Seminario Técnico. México, 1995.

ASPHALT INSTITUTE. Manual del Asfalto. Ediciones URMO. Bilbao – España. ISBN 84 – 314 – 0087 – 0. p. 477. España, 1973.

ASPHALT INSTITUTE. Mix desing methods for asphalt concrete y other hot-mix types. Second edition. Manual Series No 2 (MS - 2). USA, 1962.

BELTRÁN MORENO, Lisandro. Procedimiento para analizar mezclas de pavimento compactas. Bogotá, 1998.

CARDONA BOTERO, Alberto., RAMÍREZ RUA, Álvaro. Análisis comparativo de métodos de diseño de pavimentos flexibles. Tesis Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 1999.

GUEVARA, Julio. Construcción de carpetas con MDC. Presentación realizada en la Especialización en Vías y Transporte, Universidad Nacional de Colombia. Semestre II de 2007.



---

GUEVARA, Julio. La Capa de Rodadura. Presentación realizada en la Especialización en Vías y Transporte, Universidad Nacional de Colombia. Semestre II de 2007.

HUANG, Yanh H. Pavement Analysis and Design. Prentice Hall, New Jersey. USA 1993.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PETRÓLEO, UNIVERSIDAD DEL CAUCA. Cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos. 1994.

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Publicación Técnica No 246, México, 2004.

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No 1. México, 1990.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales de Construcción para Carreteras. Normas para ensayos de Laboratorio. INV E-213, 214, 222, 223, 735 y 748. 1996.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de tránsito. 1997.

SMITH, Richard W. The Marshall Method for the Design and Control of Asphalt Paving Mixtures. Humboldt MFG. Chicago, 1987.

TRANSPORT RESEARCH LABORATORY. Asphalt Surfacing, A guide to asphalt surfacings and treatments used for the surface course of road pavements. 1998.



---

VÁSQUEZ TORRES, Luís Carlos. Criterios y Factores en el Diseño de Pavimentos Flexibles. Boletín de Vías. Vol. XXIII, No. 86. Pág. 7-15. 1996.

VÁSQUEZ TORRES, Luís Carlos. Notas de clase, Mantenimiento y construcción de mezclas asfálticas. Presentadas en la Especialización en Vías y Transporte, Universidad Nacional de Colombia. Semestre II de 2007.

VÁSQUEZ TORRES, Luís Carlos. Pavimentos Guía para la Orientación de una Cátedra. Marzo, 2002.

VÁSQUEZ VARELA, Luís Ricardo. Notas de clase, Línea de Profundización Vías, Transporte y Geotecnia. Presentación Introducción a la gestión o administración de pavimentos. 2007

VÁSQUEZ VARELA, Luís Ricardo. Retrocálculo de propiedades elásticas en pavimentos. Presentación realizada en la Línea de Profundización Vías, Transporte y Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia. 2007.

WITCZAK M. Fundamentals of Asphalt Mix Design, XVI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2007.

WITCZAK M. Overview of the new AASHTO mechanistic empirical pavement desing guide, XVI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2007.

ZUÑIGA PINTO, Juan. Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente. Noviembre, 1993.



---

# **ANEXOS**

- 1. CRONOGRAMA DETALLADO DE ACTIVIDADES**
- 2. PRESUPUESTO**
- 3. ANEXO FOTOGRÁFICO**
- 4. RESULTADOS DE ENSAYOS**



**ANEXO No. 1**

<b>CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES</b> <b>VARIABILIDAD DEL MÓDULO RESILIENTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-2</b> <b>DENTRO DE LA VENTANA DE DISEÑO PROPUESTA POR M. WITCZAK</b>								
<b>ACTIVIDADES</b>	<b>DURACIÓN</b>	<b>NOVIEMBRE 2007</b>	<b>DICIEMBRE 2007</b>	<b>ENERO 2008</b>	<b>FEBRERO 2008</b>	<b>MARZO 2008</b>	<b>ABRIL 2008</b>	<b>MAYO 2008</b>
Revisión bibliográfica general		■						
Elaboración de propuesta inicial		■						
Entrega de propuesta			■					
Entrega de solicitud para ensayos en lab.				■				
Análisis granulométrico en agreg. gruesos y finos					■			
Peso específico y absorción de agregado grueso					■			
Peso específico y absorción de agregado fino					■			
Diseño Marshall					■			
Densidad Rice					■			
Tensión ind. mezclas asfálticas (probetas Marshall)					■			
Tensión ind. mezclas asfálticas (rangos específicos)					■			
Organización de información de ensayos					■			
Procesamiento y sistematización de datos					■			
Análisis de datos					■			
Comparaciones, conclusiones y recomendaciones					■			
Estructuración del informe			■					
Entrega del informe final para revisión							■	
Correcciones							■	
Entrega final								■



## ANEXO No. 2 PRESUPUESTO

Los siguientes son los principales costos en cuales se incurre para la realización del proyecto de investigación:

RECURSO		CANT.	COSTO UNIT.	COSTO (Aprox.)	FINAN - CIACIÓN	PROPIETARIO DEL RECURSO
Libros, revistas y documentos						Univer. Nacional Otras fuentes
Computador						Propio
Fotocopias				\$40.000	Recursos Propios	Diversas fuentes
Internet				\$30.000	Recursos propios	Centros Internet Propio
Impresiones				\$60.000	Recursos Propios	Propio
Papelería (hojas, CDs, argollados)				\$30.000	Recursos Propios	Propio
Transportes				\$80.000	Recursos propios	Servicio Público
Material	Granular	50 Kg		\$28.000	Donación	Fuente: Río Chambery
	Asfalto	2 Gl			Donación	Planta de asfalto
Ensayos	Peso específico y absorción de agregado grueso	3	\$20.900	\$62.700	Univer. Nacional	Laboratorio de materiales - UN
	Peso específico y absorción de agregado fino	3	\$20.900	\$62.700	Univer. Nacional	Laboratorio de materiales - UN
	Densidad Rice	1	\$32.900	\$32.900	Univer. Nacional	Laboratorio de materiales - UN



	Diseño Marshall	1	\$335.400	\$335.400	Univer. Nacional	Laboratorio de materiales - UN
	Elaboración de briqueta (para tensión indirecta)	9	\$17.500	\$157.500	Univer. Nacional	Laboratorio de materiales - UN
	Tensión indirecta en mezclas asfálticas (rangos específicos)	9	\$91.200	\$820.800	Univer. Nacional	Laboratorio de materiales - UN
	Tensión indirecta en mezclas asfálticas probetas Marshall	18	\$91.200	\$1.641.600	Univer. Nacional	Laboratorio de materiales - UN
	Tiempo Asesor	36 hr	\$35.000	\$1.260.000	Donación	Ing. Luís Ricardo Vásquez
	Tiempo propio para desarrollo del trabajo de grado	192 hr	\$7.000	\$1.344.000	Recursos propios	

## RESUMEN COSTOS FÍSICOS APROXIMADOS

Costos asumidos propios:	\$ 240.000
Costos financiados por la universidad (ensayos de laboratorio):	\$ 3.092.700
Costos asumidos por terceros (materiales granulares y asfalto):	\$ 28.000

## RESUMEN COSTOS POR DEDICACIÓN HORARIA APROXIMADOS

Asesor:	\$ 1.260.000
Propio:	\$ 1.344.000



## ANEXO No. 3 ANEXO FOTOGRÁFICO

### MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL



*Foto 1. Martillo mecánico para compactación de briquetas Marshall.  
Foto de autor*



*Foto 2. Aparato Marshall para prueba de estabilidad y flujo. Foto de autor*



## DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS Y DE RECOLECCIÓN DE DATOS



Foto 3. Tamices para la realización del análisis granulométrico. Foto de autor



Foto 4. Material granular separado por tamaños. Foto de autor



*Foto 5. Montaje de la muestra en el ensayo de Densidad Máxima RICE. Foto de autor*



*Foto 6. Extracción del aire de la muestra en el ensayo RICE. Foto de autor*



Foto 7. Briquetas de asfalto. Foto de autor

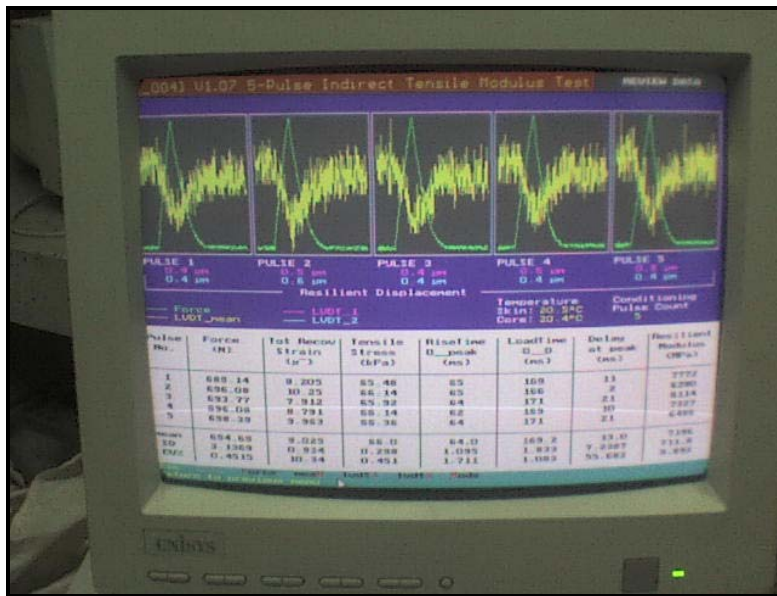


Foto 8. Ejemplo de un resultado de Módulo Resiliente en pantalla de computador. Foto de autor