



**Análisis comparativo entre la aplicación de Metodología RAMCODES y el método Marshall como alternativa para la obtención del contenido óptimo de asfalto para el diseño de mezclas asfálticas**

**Análisis comparativo entre la aplicación de  
Metodología RAMCODES  
y el método Marshall como alternativa para la  
obtención del contenido  
óptimo de asfalto para el diseño de mezclas asfálticas**

---

*Autores*

Ing. Jhonny Javier Pincay Bermello, MS.c.

Ing. Alonso Rodrigo Zuñiga Suarez, MS.c

Ing. Francisco Javier Córdova Rizo, MS.c



Análisis comparativo entre la aplicación de  
Metodología RAMCODES  
y el método Marshall como alternativa para la  
obtención del contenido  
óptimo de asfalto para el diseño de mezclas asfálticas

Autores.

Ing. Jhonny Javier Pincay Bermello, MS.c.

Ing. Alonso Rodrigo Zuñiga Suarez, MS.c

Ing. Francisco Javier Córdova Rizo, MS.c

Primera edición: abril 2018

Diseño de portada y diagramación:

Grupo Compás

Equipo Editorial

ISBN 978-9942-770-70-7

Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

## **AGRADECIMIENTO**

Como un testimonio de gratitud ilimitada, a la Universidad Técnica Particular de Loja, institución que brindó la oportunidad a través del programa de Maestría en Ingeniería Vial, de hacer posible la realización de este escrito.

## Contenido

Contenido .....	2
ÍNDICE DE FIGURAS .....	3
ÍNDICE DE TABLAS .....	5
PRÓLOGO .....	7
CAPITULO I .....	9
MEZCLA ASFALTICA .....	9
CAPÍTULO II .....	35
MATERIALES Y MÉTODOS .....	35
CAPÍTULO III .....	61
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	61
BIBLIOGRAFÍA .....	73





## PRÓLOGO

El autor de este texto, menciona que este proyecto se centra en el análisis comparativo entre las metodologías Marshall y RAMCODES con el fin de corroborar que este último produce un resultado similar, pero de manera más eficaz. Se revisó la literatura relevante, expuesta de manera detallada, limitando la información de forma de desplegar una comprensión clara y poder alcanzar los objetivos.

Se aplicó Marshall a la granulometría de diseño, luego se evaluó la misma granulometría con el contenido óptimo de asfalto de RAMCODES, donde se obtuvo valores volumétricos y mecánicos muy cercanos a los calculados. Del desarrollo y evaluación de resultados se comprobó que RAMCODES tiene aplicación exitosa para el diseño de mezclas en forma rápida, analítica y precisa, comparado con Marshall; también se determinó y utilizó el rango óptimo de asfalto obtenido del polígono de vacíos y se comparó con el rango en el que puede variar según el MOP 2002.

Este libro otorga la pauta para realizar otros estudios pues RAMCODES es una poderosa herramienta para estudios de patología, que se extiende al control de variación, producción de geomateriales, diseño, colocación, y revisión de pavimentos.







# CAPITULO I

## MEZCLA ASFALTICA

La estructura de un pavimento flexible, terminará siempre en la colocación de la carpeta asfáltica. Actualmente el país ha intervenido en 4.860km de carreteras de las cuales 3.382km son de pavimento flexible que utilizan mezclas asfáltica como capa de rodadura (MTO, 2011). Al estar en contacto directo con el tráfico, el diseño requiere de propiedades volumétricas y mecánicas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada.

La ejecución del diseño de mezclas asfálticas se ha hecho en varios métodos para fijar uno óptimo en laboratorio; el comúnmente utilizado en el Ecuador es el método Marshall; este método sigue un procedimiento normalizado ASTM D 1559 (American Society for Testing Materials, 1989). Básicamente se evalúa la granulometría que cumple con los requisitos de calidad del agregado con diferentes contenidos de asfalto (estimado,  $\pm 0.5$  y 1.0 %) y antes de establecer el diseño final se debe evaluar el cumplimiento de los requerimientos de vacíos, densidad, estabilidad y flujo, de no cumplirse algunas de ellas, se debe realizar ajustes o rediseñar la mezcla.

Debido a que la metodología Marshall es de naturaleza empírica, la importancia del cumplimiento del procedimiento estándar para obtener los resultados es de vital importancia en términos de estimar el comportamiento en laboratorio y en campo. El análisis está enfocado a tres parámetros, Densidad, Vacíos y Contenido de Asfalto.

El diseño de mezclas asfálticas es un problema que ha sido ampliamente abordado por los diferentes centros Investigativos. La estabilidad Marshall es un indicativo de cómo influye el contenido asfáltico dentro del comportamiento mecánico de las mezclas; esta incrementa su valor conforme se agrega contenido de asfalto a la mezcla hasta alcanzar un valor máximo, a partir de allí con mayor incremento de asfalto su valor disminuye; este comportamiento se debe al efecto lubricante causado por el exceso de asfalto en la mezcla, lo que origina una reducción del contacto entre partículas y por ende la fricción que los soporta. (Thenoux & Carrillo, 2002).

El análisis de vacíos, esto es, vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos del agregado mineral (VAM), y vacíos llenos de asfalto (VFA), guardan estrecha relación con el funcionamiento de la mezcla compactada; al tener alto volumen de vacíos, la oxidación y el envejecimiento del ligante se pueden acelerar; al presentar el VAM por bajo o sobre los límites de especificación, el material se vuelve más vulnerable a las deformaciones por ahuellamientos o roderas; con alto VFA podría causar exudación del ligante, y con bajo VFA no se garantizaría una apropiada capa que recubra los agregados.(Anguas, 2002).

Parte de la solución al problema radica en garantizar un diseño de mezcla asfáltica con adecuado contenido de ligante asfáltico y de vacíos. Se proyecta incorporar en el presente trabajo la aplicación de la metodología denominada RAMCODES como alternativa de diseño para la obtención del contenido óptimo de asfalto de mezclas asfálticas en forma analítica, prescindiendo de ajustes, o rediseños de mezcla debido al incumplimiento de requerimientos principalmente vacíos, y que a su vez permite desarrollar un mejor criterio para la elección del contenido óptimo de asfalto en la etapa de diseño.

RAMCODES desarrollado por Freddy J. Sánchez-Leal desde 1998, fusiona racionalmente las especificaciones de diseño con los criterios de control en campo, mediante la representación gráfica de un área delimitada donde se garantiza el cumplimiento de todas las especificaciones de vacíos ( $V_a$ , VAM y VFA). (Garnica Amguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, 2005).

Actualmente también existe la metodología Superpave que ha demostrado tener significativos avances en lo referente a la selección del ligante asfáltico, las mezclas de agregados, y la compactibilidad de la mezcla asfáltica, pero que aún es de poco impulso y aplicación en el Ecuador. En países como Estados Unidos y México el método Marshall prácticamente es de nula utilidad, realizan sus diseños de mezclas asfálticas aplicando principalmente Superpave.

La mezcla asfáltica se define como una combinación de agregados minerales, ligados mediante la implementación de un cemento asfáltico, y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden envueltos por una capa uniforme de asfalto. (Garnica, Flores, & Alamilla, 2005).

Se entiende por diseño de mezclas asfálticas al proceso de selección de los componentes que intervienen en ella de tal modo de lograr un balance deseado en sus propiedades. (Martínez Reguero, 2000).

La clasificación de mezclas asfálticas se realiza en función del tamaño de los agregados pétreos, el porcentaje de vacíos, la temperatura o la estructura de los agregados; cualquiera de estos parámetros es considerado base para establecer las diferencias. En la Tabla 1 se mencionan varios tipos de mezclas existentes.

**TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

<b>Parámetro de Clasificación</b>	<b>Tipo de mezcla</b>
Fracciones de agregados empleadas	Mástico
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en la mezcla (Va)	Densas o Cerradas ( $Va < 6\%$ )
	Semidensas o Semicerradas ( $6\% < Va < 12\%$ )
	Abiertas ( $12\% < Va < 18\%$ )
	Porosas ( $Va > 20\%$ )
Tamaño máximo del agregado (T máx.)	Gruesas (T máx. $> 10\text{mm}$ )
	Finas (T máx. $< 10\text{mm}$ )
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

**Fuente:** Cepeda, 2002

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Con referencia a lo publicado en la norma Mexicana N-CMT-4-05-003/08, Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras, se describe a continuación varias de las clasificaciones mencionadas:

- **Mezclas asfálticas en caliente:** Son producidas en caliente en una planta mezcladora estacionaria o móvil, dotada del equipo necesario para calentar los materiales de la mezcla.



- **Mezclas asfálticas en frío:** Son elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos.
- **Mezclas asfálticas de granulometría densa:** En mezclas en caliente son de granulometría continua y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5 mm (1 ½ in) y 9.5 mm (3/8 in). En mezclas en frío son uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos, con tamaño nominal entre 37.5 mm (1 ½ in) y 9.5 mm (3/8 in).
- **Mezcla asfáltica de granulometría abierta:** Es mezcla en caliente, de granulometría uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, con un tamaño nominal entre 12.5 mm (1/2 in) y 6.3 mm (1/4 in).
- **Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA:** Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, los materiales pétreos son de granulometría discontinua, con tamaño nominal 19.0 mm (3/4 in) y 9.5 mm (3/8 in).
- **Mortero asfáltico:** Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de 9.53 mm (3/8").
- **Mezclas asfálticas por el sistema de riegos:** Se componen de la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, alternados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de granulometría uniforme, asentado en tamaños decrecientes.

El diseño de mezclas asfálticas requiere de un conocimiento de las propiedades más significativas y las características del comportamiento de las mezclas bituminosas, así como el efecto que puedan causarle sus componentes, se mencionan:

**Estabilidad:** Es la capacidad para soportar las tensiones que generarán las cargas del tránsito sin causar deformaciones. (Martínez Reguero, 2000). Según el Instituto del Asfalto, 1982, la falta de estabilidad de una mezcla colocada en sitio está relacionada con exceso de betún en la mezcla, exceso de arena de tamaño medio en la mezcla, árido redondeado con pocas o ninguna cara de fractura; lo que a su

vez causa efectos como ondulaciones, ahuellamientos y exudación, baja resistencia, arrollamientos y dificultad para compactación.

**Durabilidad:** Es la capacidad del pavimento para resistir deterioros tales como, fisuras, peladuras, baches, etc., provocados por la acción del tráfico u otras agresiones externas tipo ambientales o derrames de hidrocarburos, etc (Martínez Reguero, 2000). Según el Instituto del Asfalto, 1982, la poca durabilidad está relacionada con bajo contenido de betún, alto contenido de vacíos debido al diseño o falta de compactación, áridos susceptibles al agua (hidrófilos); lo que a su vez causa efectos como endurecimiento rápido del betún y desintegración por pérdida del árido, endurecimiento temprano del betún seguido por agrietamiento o desintegración, desprendimiento de la película de betún dejando un pavimento desgastado o desintegrado

**Impermeabilidad:** Es la resistencia que tiene la mezcla al paso hacia su interior del agua y aire. Esta propiedad se relaciona con el contenido de vacíos de la mezcla compactada. (Martínez Reguero, 2000). Según el Instituto del Asfalto, 1982, las mezclas demasiado permeables se relacionan con bajo contenido de betún, alto contenido de vacíos y compactación inadecuada; lo que a su vez causa efectos como envejecimiento temprano y una desintegración de la mezcla u oxidación.

**Trabajabilidad:** Es la facilidad con que una mezcla se puede extender y compactar. (Martínez Reguero, 2000). Según el Instituto del Asfalto, 1982, la mala trabajabilidad está relacionada con tamaño máximo de partícula grande, exceso de árido grueso, temperatura muy baja de mezcla, exceso de arena de tamaño medio, bajo contenido de relleno mineral, alto contenido de relleno mineral; lo que a su vez causa efectos como dificultad para colocar, dificultad para compactar, árido sin recubrir, mezcla poco durable, mezcla que se desplaza, mezcla muy blanda, mezcla muy permeable, mezcla muy viscosa, mezcla difícil de manejar, mezcla poco durable.

**Flexibilidad:** Es la capacidad de un pavimento para acomodarse a movimientos de la estructura sin llegar a romperse, como por ejemplo asentamientos del terraplén. (Martínez Reguero, 2000).

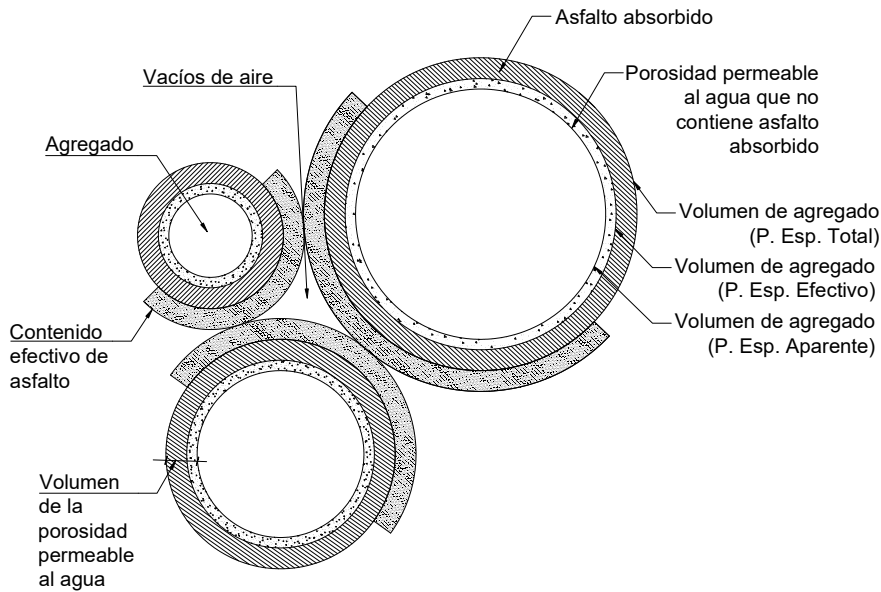
**Resistencia a la fatiga:** Es la resistencia a la flexión originada por las cargas repetidas del tránsito, se manifiesta por una pérdida de rigidez y a la postre por una fisuración extensiva conocida como piel de cocodrilo. (Martínez Reguero, 2000). Según el Instituto del Asfalto, 1982, la mala resistencia a la fatiga está relacionada con bajo contenido de betún, alto contenido de vacíos, falta de compactación, espesor insuficiente de capas mineral; lo que a su vez causa efectos como agrietamiento por fatiga, envejecimiento temprano del betún, flexión excesiva.

**Resistencia al deslizamiento:** Es la capacidad de una superficie para atenuar el deslizamiento de las llantas de los vehículos, principalmente cuando esa superficie está mojada, y evitar el hidropneumático. (Martínez Reguero, 2000). Según el Instituto del Asfalto, 1982, la poca resistencia al deslizamiento está relacionada con exceso de betún, árido mal graduado o con mala textura, árido pulido en la mezcla; lo que a su vez causa efectos como exudación, poca resistencia al deslizamiento, pavimento liso y posibilidad de hidropneumático.

Una parte esencial en el diseño de mezclas asfálticas son sus parámetros volumétricos, incluyen proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado.

Para ilustrar en que corresponde cada uno de estos parámetros se hace referencia a la Figura 1, obtenida del Texto del Instituto Chileno del Asfalto, basado en la publicación técnica N-22 (MS-22) del Instituto del Asfalto de los Estado Unidos, 1983. En ella se muestran hipotéticos agregados en forma redondeada que indican sus capas de agregado, porosidad permeable que no contiene asfalto absorbido, asfalto absorbido y finalmente el contenido efectivo de asfalto; así como sus volúmenes de la porosidad permeable al agua, el volumen de agregado para determinar el peso específico total, efectivo y aparente, y finalmente los volúmenes de aire.





**FIGURA 1: DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**Fuente:** Instituto Chileno del Asfalto, 1992

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Cada uno de estos parámetros y su expresión que permite su determinación se describen a continuación:

*Gravedad específica bruta del agregado,  $G_{sb}$*

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente los poros permeables al agua, normado por ASTM C 127 o ASTM C 128 (Garnica et al., 2005).

Se considera las fracciones separadas de agregados que conforman la mezcla final, cada una con sus diferentes gravedades específicas. Se calcula usando la ecuación 1.

**ECUACIÓN 1:**

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

Donde:

Gsb = Gravedad específica bruta de la combinación de agregados

P1, P2, PN = Porcentajes individuales de las masas de la combinación de agregados

G1, G2, GN = Gravedad específica bruta de las fracciones de agregados individuales

#### *Gravedad específica aparente, Gsa*

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente el volumen del sólido del agregado, normado por ASTM C 127 o ASTM C 128 (Garnica et al., 2005).

Se considera las fracciones separadas de agregados que conforman la mezcla final, cada una con sus diferentes gravedades específicas, se determina con la misma expresión para obtener el Gsb, obviamente utilizando las gravedades específicas aparentes de cada componente.

#### *Gravedad específica efectiva del agregado, Gse*

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente el volumen de los poros permeables al agua no llenos con asfalto.(Garnica et al., 2005). Se calcula mediante la ecuación 2.

#### **ECUACIÓN 2**

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - CA}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{CA}{G_b}}$$

Donde:

Gse = Gravedad específica efectiva del agregado

Gmm= Gravedad específica teórica máxima

Pmm= Porcentaje del peso de la mezcla total suelta = 100

Gb = Gravedad específica del asfalto

CA = contenido de asfalto con respecto a la masa

### *Gravedad específica máxima de las mezclas del agregado, Gmm*

Representa la relación medida a una misma temperatura entre la masa de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua.(Garnica et al., 2005). Se determina para cada contenido de asfalto mediante ASTM D 2041 / AASHTO T 209.

Para obtener la Gravedad específica máxima para cualquier otro contenido de asfalto que contenga la misma mezcla de agregados se utiliza la ecuación 3, la cual supone que la gravedad específica efectiva del agregado es constante; es válida puesto que la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido de asfalto (Garnica Amguas et al., 2005).

### **ECUACIÓN 3**

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{CA}{G_b}}$$

Donde:

Gmm= Gravedad específica máxima teórica de la mezcla asfáltica

Pmm= Porcentaje del peso de la mezcla total suelta = 100

Gse = Gravedad específica efectiva del agregado

Gb = Gravedad específica del asfalto

CA = contenido de asfalto con respecto a la masa

Ps = Contenido del agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla

*Asfalto absorbido, Pba*



Se determina mediante la ecuación 4.

#### ECUACIÓN 4

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

Donde:

Pba = Asfalto absorbido, % por masa de agregado

Gsb = Gravedad específica bruta de la combinación de agregados

Gse = Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

Gb = Gravedad específica del asfalto

*Contenido de asfalto efectivo en la mezcla, Pbe*

Representa una porción del total del asfalto de la mezcla, y que recubre exteriormente el agregado. Influye de gran manera en el desempeño de la mezcla asfáltica.(Garnica Amguas et al., 2005). Se determina mediante la ecuación 5.

#### ECUACIÓN 5

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

Donde:

Pbe= Contenido efectivo de asfalto, % del total de la masa de la mezcla

Pba = Asfalto absorbido, % por masa de agregado

CA = contenido de asfalto con respecto a la masa

Ps = Contenido del agregado, % del total de la masa de la mezcla asfáltica

*Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla, VAM*

Representan el vacío intergranular entre las partículas del agregado pétreo, utilizado en la mezcla asfáltica compactada, se expresa como un porcentaje del volumen total e incluye el contenido de asfalto efectivo y los vacíos de aire. (Garnica Amguas et al., 2005).

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica, se utiliza para su determinación la ecuación 6.

#### ECUACIÓN 6

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

Donde:

VAM = Vacíos en el agregado mineral (% del volumen aparente)

Gsb = Gravedad específica bruta de la combinación de agregados

Ps = Contenido del agregado, % del total de la masa de la mezcla

Gmb = gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada

*Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada, Va*

Representa los pequeños espacios de aire que se encuentran entre las partículas de agregado. (Garnica Amguas et al., 2005). Se determina mediante la ecuación 7.

#### ECUACIÓN 7

$$V_a = 100x \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

Va = Vacíos de aire de la mezcla compactada, % del volumen total

Gmm= Gravedad específica teórica máxima

Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

*Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto de la mezcla compactada, VFA*

Este parámetro no incluye el asfalto absorbido, se determina mediante la ecuación 8.

#### **ECUACIÓN 8**

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} \times 100$$

Donde:

VFA = Vacíos rellenos de asfalto, porcentaje del VAM

VAM = porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Va = Vacíos en la mezcla compactada, % del volumen total

*Porcentaje de polvo (relación filler-asfalto), DP*

Se determina mediante la ecuación 9.

#### **ECUACIÓN 9**

$$DP = \frac{P_{0.075}}{Pbe}$$

Donde:

DP = Proporción de polvo de la mezcla asfáltica

P0.075 = Porcentaje del material que pasa la malla 200 (0.075mm)

Pbe = Porcentaje de asfalto efectivo del total de la mezcla.

La importancia de las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado (VA, VAM y VFA) radica en que proporcionan una indicación del posible funcionamiento de la mezcla asfáltica. (Instituto Mexicano del Transporte, 2004).

El diseño de mezclas por el método Marshall sigue un procedimiento normalizado ASTM D 1559 (American Society for Testing Materials, 1989) y tiene como propósito

encontrar el contenido óptimo de asfalto para la granulometría especificada y cumplir con los requerimientos de desempeño, durabilidad y trabajabilidad.

El procedimiento básico consiste en: Selección de materiales, agregados y asfalto; diseño de la estructura del agregado, granulometría, y finalmente la selección del contenido de asfalto.

Bajo esta metodología se determinan las siguientes pruebas para conocer tanto sus características mecánicas como volumétricas, y que adicionalmente representan las variables del diseño Marshall.

Determinación de la gravedad específica, es la relación del peso en el aire y el volumen de la briqueta compactada, incluye los vacíos permeables. Se determina mediante la Norma ASTM D1188 utilizando parafina o ASTM D2726 al emplear superficies saturadas de especímenes secos.

Se debe realizar pruebas de absorción a los especímenes, si es mayor al 2% se utiliza la norma ASTM D1188; en caso contrario ASTM D2726.

El ensayo de estabilidad se ejecuta con el fin de medir la resistencia a la deformación de la mezcla, se expresa en unidades de Fuerza (Lb o Kg). El valor del flujo es la deformación que sufre el espécimen al medir la estabilidad, se expresa en unidades de 0.25 mm (1/100"). El proceso se realiza conforme ASTM D 1559 – 89.

Las probetas cuya altura no está comprendida dentro de la tolerancia de  $6.35 \pm 1.17$ mm, se deben corregir, acorde a la norma antes mencionada (Estabilidad corregida).

Los análisis de densidad y vacíos se realizan conforme ASTM D 1559 – 89, aplicando las fórmulas indicadas en el acápite 2.4. A continuación se expone en forma general el proceso para su determinación.

1. Se determina la gravedad específica teórica máxima de la mezcla compactada, como mínimo en dos contenidos de asfalto conforme ASTM D 2041-03 o AASHTO T 209; de estos valores se obtiene un valor ponderado de la gravedad específica efectiva del total del agregado (Gse).
2. Con el valor del Gse ponderado se calculan los demás valores del RICE.

3. En función del peso específico bulk ( $G_{mb}$ ) y de los valores RICE calculados ( $G_{mm}$ ) se determina el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada ( $V_a$ ).
4. Los vacíos de aire en el agregado mineral (VAM) se determinan en función del porcentaje de asfalto contenido en la mezcla (%CA), del peso específico "bulk" de las probetas compactadas ( $G_{mb}$ ) y de la gravedad específica bulk de la combinación de los agregados ( $G_{sb}$ ).
5. Los vacíos llenos con asfalto (VFA) se determinan en función de los vacíos de aire en el agregado mineral (VAM) y del porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada ( $V_a$ ).

Con la finalidad de observar el comportamiento de las mezclas asfálticas compactadas, se grafica cada uno de los pares ordenados de las variables, % $V_a$ ,  $G_{mb}$ , VAM, VFA, Estabilidad y Flujo, todas, vs el contenido de asfalto en la mezcla (%CA) en un plano cartesiano. El Instituto del Asfalto recomienda conectar los puntos mediante líneas para formar curvas suaves.

El procedimiento normado mediante ASTM D 1559 – 89, establece que, en la gráfica,  $V_a$  vs %CA, se ingrese con el valor de 4% de vacíos y al interceptar con la curva se determine el porcentaje de asfalto a evaluar. El 4% de vacíos es la media para el diseño de mezclas asfálticas, la especificación sugiere un valor entre 3 y 5% (Tabla 10). Con el porcentaje de asfalto obtenido se ingresa en las demás curvas trazadas para obtener los correspondientes parámetros adicionales,  $G_{mb}$ , VAM, VFA, Estabilidad y Flujo.

Si todas las propiedades obtenidas gráficamente se encuadran dentro de las especificaciones se toma como porcentaje de asfalto óptimo el obtenido para el 4% de vacíos y se reporta el ensayo, caso contrario será necesario hacer ajustes o volver a diseñar la mezcla.

RAMCODES es un acrónimo por el nombre en inglés de RAtional Methodology for COmpacted geomaterial's DEnsity and Strength analysis. Es una metodología fundamentada en experimentos factoriales, combinada con experiencia práctica de diseño y control para análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados. (Alamilla, Anguas, Mario, & Mendez, 2006).



Ha sido desarrollada por F.J. Sánchez-Leal desde 1998 y se fundamenta en conocimientos de estadística para realizar el análisis de experimentos para el diseño y el control de compactación.

Está conformado de siete fases, citadas en publicación técnica número 200 del Instituto Mexicano del Transporte, se mencionan:

- La fase uno, dedicada a la clasificación de geomateriales.
- La fase dos trata sobre el estudio de la relación humedad, densidad, y resistencia (CBR) en suelos compactados.
- La fase tres, programada para el análisis de resistencia con equipo sofisticado.
- La fase cuatro, programada para el estudio de cambio volumétrico bajo hidratación.
- La fase cinco está dedicada al análisis de mezclas asfálticas.
- La fase seis corresponde a un software para facilitar la implementación de RAMCODES (Licencia con costo)
- La fase siete, dedicada al desarrollo de una metodología estadística de control de calidad.

El presente libro abarca únicamente la aplicación directa de la fase cinco de RAMCODES.

Como se mencionó anteriormente la fase cinco de RAMCODES está dedicado al análisis de mezclas asfálticas; para su desarrollo, F.J. Sánchez-Leal se basó en un experimento factorial de dos niveles o factores, que son:

- El contenido de asfalto (**%CA**), y
- El peso específico bulk (**Gmb**).

La selección de ambos parámetros se da debido a que como geomaterial, RAMCODES, considera que el comportamiento de resistencia y deformabilidad de una mezcla asfáltica puede ser ilustrado bajo la concepción de Coulomb, cohesión y fricción; el Gmb mide la fricción o trabazón entre partículas; y el %CA mide la

cohesión. Adicionalmente ambas variables son comúnmente utilizadas en el diseño y control de mezclas asfálticas. (Anguas, 2002).

La metodología RAMCODES aplicado a mezclas asfálticas logra enlazar las especificaciones de diseño principalmente de vacíos ( $V_a$ , VAM y VFA) con los criterios de control en campo mediante sus expresiones. Los vacíos son función del %CA y del  $G_{mb}$  y se trazan en mapas como isolíneas para los valores de especificación, la intersección que se genera entre líneas produce una construcción gráfica en el espacio %CA- $G_{mb}$ , que da lugar a una figura geométrica que el autor denomina “polígono de vacíos” en cuya área interior se cumplen todas las especificaciones de vacíos. (Alamilla et al., 2006).

Las especificaciones de vacíos dependen de la normativa del diseño, el  $G_b$  se determina conforme ASTM D 70, el  $G_{se}$  y  $G_{sb}$  se determinan conforme lo indicado en el acápite 2.4, siempre para la combinación final de los agregados.

Las expresiones o fórmulas definidas por RAMCODES y que se utilizan para el trazo de las isolíneas se indican a continuación:

- 1) **Isolíneas de vacíos ( $V_a$ ):** Se utiliza la ecuación 10 y sirve para determinar el  $G_{mb}$  en función del  $V_a$  de las especificaciones de diseño y del %CA, interviene adicionalmente el  $G_b$  y el  $G_{se}$ .

#### ECUACIÓN 10

$$G_{mb} = \frac{1 - \frac{V_a}{100}}{\frac{\%CA}{100} + \frac{1 - \frac{\%CA}{100}}{G_{se}}}$$

- 2) **Isolíneas de vacíos en el agregado mineral (VAM):** Se utiliza la ecuación 11 y sirve para determinar el  $G_{mb}$  en función del VAM de las especificaciones de diseño y del %CA, interviene adicionalmente el  $G_{sb}$ .

### ECUACIÓN 11

$$G_{mb} = \left( \frac{1 - \frac{VAM}{100}}{1 - \frac{\%CA}{100}} \right) * G_{sb}$$

- 3) **Isolíneas de vacíos llenados con asfalto (VFA):** Se utiliza la ecuación 12 y sirve para determinar el Gmb en función del VFA de las especificaciones de diseño y del %CA, interviene adicionalmente el Gb, Gse y el Gsb.

### ECUACIÓN 12

$$G_{mb} = \frac{\frac{VFA}{100}}{\frac{\%CA}{100} + \frac{1 - \%CA}{G_{se}} - \left( 1 - \frac{VFA}{100} \right) * \left( \frac{1 - \%CA}{G_{sb}} \right)}$$

Donde:

%CA = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total,  
%

Va = Porcentaje de vacíos de aire, %

VAM = Vacíos de aire en el agregado mineral, %

VFA = Vacíos de aire llenos de asfalto, %

Gmb = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

Gsb = Gravedad específica total de la combinación de agregados

Gse = Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

Gb= Gravedad específica del asfalto

### ELABORACIÓN DEL POLÍGONO DE VACÍOS.

Los valores de densidades Gb, Gsb y Gse de los materiales se determinan conforme lo explicado en 2.6.2.

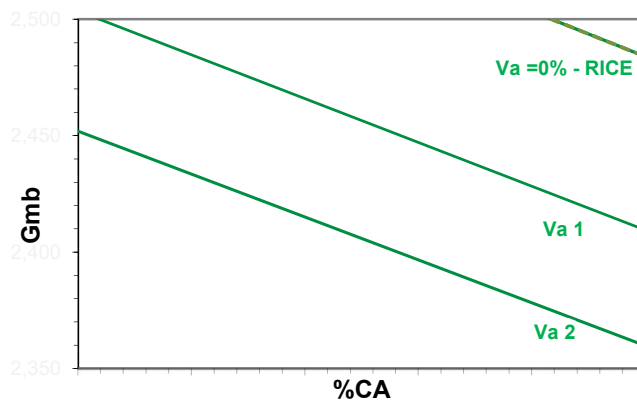
**Paso 1.-** Definir las especificaciones de Vacíos

Va, (Cero, Mínimo y Máximo) – VAM (Mínimo) y VFA (Mínimo y Máximo). Ver acápite 3.3.1.3; como particularidad, la Tabla 11, no especifica un límite superior en el VAM, sin embargo varios autores consideran evitar valores muy altos si se desea que la mezcla presente resistencia a deformación permanente (Garnica Amguas et al., 2005). Siguiendo las recomendaciones de varios autores se tomó un máximo de 2 puntos adicionales al mínimo, como rango del VAM.

**Paso 2.-** Trazado de las isólineas de vacíos de aire (Va)

Se define un rango teórico de %CA a emplear en el cálculo, los valores de densidades Gb y Gse son datos característicos de los materiales utilizados y Va depende de las especificaciones ya definidas en el paso 1.

Para cada valor de %CA definido y de vacío especificado se calcular el Gmb aplicando la ecuación 10. La representación gráfica en el espacio %CA-Gmb, da lugar a las tres isólineas de vacíos de aire, como se muestra en la Figura 2.



**FIGURA 2: ISOLÍNEAS DE VACÍOS DE AIRE VA**

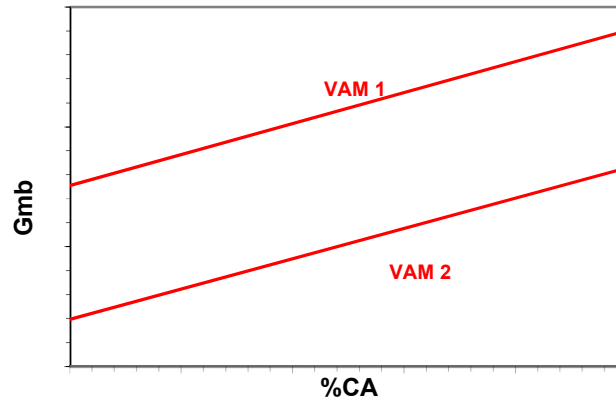
**Fuente:** Alamilla et al., 2006

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

**Paso 3.-** Trazado de las isólineas de vacíos en el agregado mineral (VAM)

Para el mismo rango de %CA definido en el paso 2, con el rango de VAM definido en el paso 1 y Gb conocido, se procede a calcular el Gmb aplicando la ecuación 11. La

representación gráfica en el espacio %CA-Gmb, da lugar a las dos isolíneas de vacíos en el agregado mineral, como se muestra en la Figura 3.



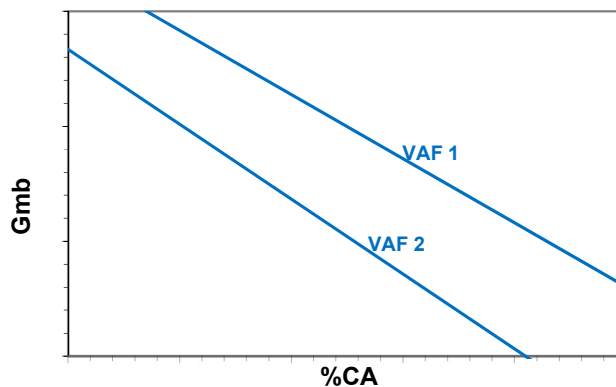
**FIGURA 3: ISOLÍNEAS DE VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VAM)**

**Fuente:** Alamilla et al., 2006

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

**Paso 4.-** Trazado de las isolíneas de vacíos llenados con asfalto (VFA)

Para el mismo rango de %CA definido en el paso 2, con el rango de VFA definido en el paso 1 y Gb, Gsb y Gse conocidos, se procede a calcular el Gmb aplicando la ecuación 12. La representación gráfica en el espacio %CA-Gmb, da lugar a las dos isolíneas de vacíos llenados con asfalto, como se muestra en la Figura 4.



**FIGURA 4: ISOLÍNEAS DE VACÍOS LLENADOS CON ASFALTO (VFA)**

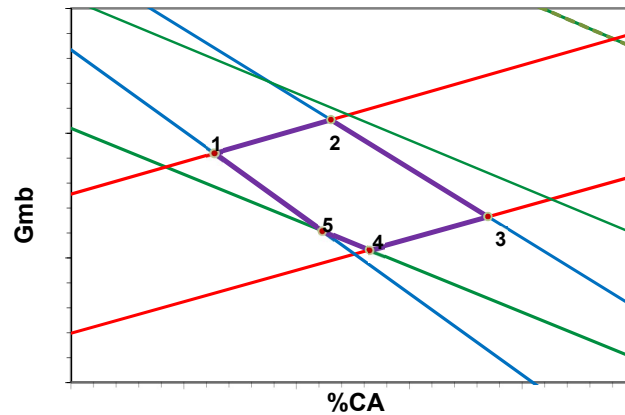
**Fuente:** Alamilla et al., 2006

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

**Paso 5.-** Trazado del polígono de vacíos



La superposición de los mapas de respuesta devuelve una visión de la variación de las propiedades mecánicas dentro del área donde se cumplen las especificaciones de vacíos (Anguas, 2002), lo que da lugar al polígono de vacíos, como se muestra en la Figura 5.



**FIGURA 5: POLÍGONO DE VACÍOS RAMCODES**

**Fuente:** Alamilla et al., 2006  
**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

#### Simbología

- isocurva VAM
- isocurva VAF
- isocurva Va
- - - isocurva Gmm
- Polígono de vacíos
- Vértice polígono de vacío

RAMCODES plantea la implementación del polígono de vacíos conformado por la intersección de las isocurvas antes mencionadas y que define el área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos; a sabiendas de lo anterior el creador de esta metodología determina el punto central del polígono de vacíos como el valor del porcentaje óptimo de asfalto y su correspondiente densidad bulk; es necesario entonces determinar las coordenadas de cada punto que lo conforma. Estas varían en función de cada uno de los parámetros mencionados.

Para determinar las coordenadas de cada vértice del polígono de vacíos, RAMCODES ha desarrollado un software al cual se accede únicamente mediante la

compra de licencia. Otra alternativa para resolver el problema es la creación de una hoja de cálculo programada, como la desarrollada en este libro, en la que intervienen las ecuaciones (10) a la (18).

Conocido las coordenadas del polígono de vacíos, se determina el centroide que básicamente corresponde al valor promedio de los porcentajes de asfalto y de los pesos específicos bulk de cada vértice. Para determinarlos se emplean las ecuaciones 13 y 14 respectivamente.

### ECUACIÓN 13

$$\%CA_{opt} = \sum_{i=1}^n \frac{(\%CA)_i}{n}$$

### ECUACIÓN 14

$$G_{mb} = \sum_{i=1}^n \frac{(G_{mb})_i}{n}$$

Donde:

$(\%CA)_i$  = Porcentaje de asfalto de cada vértice

$(G_{mb})_i$  =Peso específico bulk de la muestra de cada vértice, y “n”, es el número de vértices

Determinado el  $\%Ca_{opt}$  y su correspondiente  $G_{mb}$  se procede a calcular los parámetros  $V_a$ , VAM y VFA finales de diseño mediante las ecuaciones 15, 16, 17 y 18 respectivamente, dadas por RAMCODES.

### ECUACIÓN 15

$$V_a = 100 - \left[ \left( \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \right]$$

### ECUACIÓN 16

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{100 - \%CA_{opt}}{G_{se}} + \frac{\%CA_{opt}}{G_b}}$$

### ECUACIÓN 17

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb}(100 - \%CA_{opt})}{G_{sb}}$$

### ECUACIÓN 18

$$VFA = \left( \frac{VAM - V_a}{VAM} \right) \times 100$$

Donde:

$\%CA_{opt}$  = Porcentaje de cemento asfáltico óptimo

$V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla, %

VAM = Vacíos de aire en el agregado mineral de diseño

VFA = Vacíos de aire llenos de asfalto de diseño, %

$G_{mb}$  = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

$G_{sb}$  = Gravedad específica total de la combinación de agregados

$G_{se}$  = Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

$G_b$  = Gravedad específica del asfalto

RAMCODES por recomendación solicita la comprobación de estos resultados ensayando un total de 3 briquetas por mezcla diseñada.

Todo el proceso antes descrito se vuelve largo desarrollar sin las herramientas tecnológicas, valiéndose de las existentes, como por ejemplo Excel, el proceso se simplifica, únicamente basta determinar las especificaciones de vacíos de diseño y las gravedades de cada uno de los materiales que intervienen  $G_b$ ,  $G_{se}$  y  $G_{sb}$  para calcular el porcentaje óptimo de asfalto.

Sánchez-leal, n.d. Realizo un análisis de aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño, y comparó los resultados con los obtenidos por metodología Superpave y demostró que el polígono de vacíos produjo el mismo resultado que Superpave pero con entre 4 y 5 veces menos briquetas. También incluyó en el análisis del polígono de vacíos la verificación de los rangos de

contenido de asfalto permitidos por la recomendación de relación filler-bitumen del manual SP- 2 del Instituto Norteamericano del Asfalto; ampliando más el universo de aplicación de RAMCODES.

Higuera Sandoval, Patarroyo Fonseca, & Vargas León, 2013, realizaron un análisis de factibilidad de mezclas asfálticas de alto módulo con agregados del área de influencia de Tunja; las metodologías de diseño de mezclas asfálticas utilizadas fueron Marshall y RAMCODES. Entre sus resultados obtuvieron que con los porcentajes óptimos de asfalto por medio del ensayo Marshall estos no se les ajustaron a los rangos de las especificaciones, mientras que en RAMCODES, el polígono de vacíos realizó el ajuste directo para que el contenido de asfalto satisfaga todas las especificaciones.

Garnica Anguas et al., 2005, determinaron que existe un rango de contenido de asfalto en donde se satisfacen todas las especificaciones de vacíos requeridas para el buen funcionamiento de la capa de rodadura, publicado en el proyecto denominado “Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas”, editado por el Instituto Mexicano del transporte. Este rango lo obtuvieron al superponer el polígono de vacíos de RAMCODES y las curvas  $G_{mb} - \%CA$  de sus mezclas analizadas.

Alamilla et al., 2006, presentaron un análisis de la influencia de la zona restringida (Granulometría SUPERPAVE) en el desempeño de la mezcla asfáltica, utilizando un diseño experimental que involucra tres factores (contenido de asfalto, granulometría y origen del agregado). Analizaron las propiedades volumétricas apoyándose en la metodología RAMCODES. Entre una de sus conclusiones manifiestan que, de acuerdo con los materiales y granulometrías evaluadas, determinan que el polígono de vacíos es una herramienta eficaz para identificar la susceptibilidad a la variación de las propiedades volumétricas por cambios en la fuente de agregado o en la granulometría.

Sánchez-leal, Anguas, Larreal, & Valdés, 2011, prepararon un documento denominado “Analytical Tool for Superpave HMA Design Freddy” que contiene la aplicación del polígono de vacíos de RAMCODES, a varias mezclas, con la finalidad de mostrar formalmente las aplicaciones de esta técnica para el diseño y análisis de

asfalto en caliente de Superpave. Entre sus resultados muestran que para obtener el contenido de óptimo de asfalto con Superpave se requiere la elaboración de 16 especímenes y obtuvieron el mismo resultado con el polígono de vacíos que sólo necesitó seis especímenes para su comprobación.

Para corroborar la efectividad de la hoja de cálculo desarrollada y que sirve para determinar en forma automática las coordenadas de los vértices del polígono de vacíos de RAMCODES y su respectivo centroide, tal como se explicó en el acápite 2.6.2, se muestra un ejemplo de la aplicación del polígono de vacíos al diseño de un HMA (Mezcla asfáltica en caliente); los datos utilizados fueron publicado por (Sánchez-leal et al., 2011) en su el artículo denominado “Analytical Tool for Superpave HMA Design”; según escritura, se propone el diseño de un HMA para una autopista, la gradación tiene un diámetro máximo de 19mm, reporta un  $G_{sb} = 2.666$ , la prueba de densidad teórica máxima informó un valor promedio de  $G_{se} = 2.752$ , el asfalto es un PG 64-28, clasificado por el Instituto Venezolano del Petróleo (INTEVEP), informó  $G_b = 1.024$ , el nivel de tráfico es alto, los rangos de especificación de vacíos utilizados son  $V_a$ : 3-5%;  $V_{AM}$ : 13-15%; y  $V_{FA}$ : 65 - 75%.

Con la información anterior los autores reportaron las coordenadas y centroide del polígono de vacíos obtenido. Con los mismos datos para el diseño de la mezcla mencionada, pero usando la hoja de cálculo desarrollada por el autor, se obtuvo igualmente las coordenadas, tal como se indica en la Tabla 2.



**TABLA 2: COORDENADAS Y CENTROIDE POLÍGONO DE VACÍOS EJEMPLO HMA**

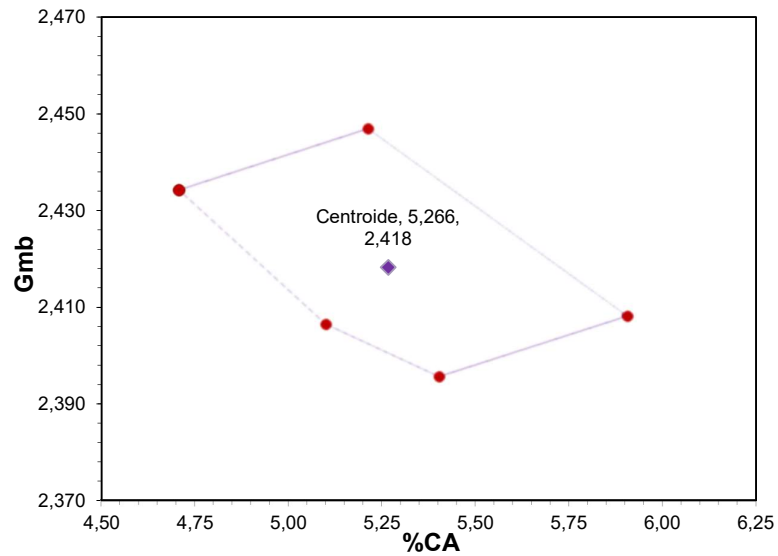
Intersección	Sánchez-leal et al., 2011		Hoja de cálculo autor	
	Pb	Gmb	Pb	Gmb
1	4.71	2.434	4.70	2.434
2	5.21	2.447	5.20	2.447
3	5.91	2.408	5.90	2.408
4	5.40	2.396	5.40	2.395
5	5.10	2.406	5.10	2.408
Promedio	5.27	2.418	5.26	2.418

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Como se observa en la Tabla 2, prácticamente los valores calculados de las coordenadas y de los centroides coinciden con los determinados por los autores del artículo mencionado.

Las coordenadas que conforman el polígono de vacíos indicado se muestran en la Figura 6.



**FIGURA 6: POLÍGONO DE VACÍOS EJEMPLO HMA**

**Fuente:** Sánchez-leal et al., 2011

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.



## CAPÍTULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

Los agregados pétreos son materiales granulares de composición mineral como la arena, la grava, concha, escoria o piedra triturada; usados en compañía de un material cementante forman morteros, concretos asfálticos o hidráulicos (ASTM D8, 2002).

Se denomina agregado fino a la porción de material que pasa el tamiz N° 4 y es retenida en el tamiz N° 200; y, agregado grueso a cuyas partículas son retenidas por el tamiz N° 4. El material llenante mineral es el que pase el tamiz N° 200.

Las propiedades de los materiales, su dosificación y rangos tolerables han sido determinados conforme a los requerimientos del Manual de Especificaciones Generales para construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002, sección 405-5.1, Mezcla de hormigón asfáltico en planta.

Se exponen a continuación los requisitos para los agregados “Estarán compuestos de partículas de piedra o grava triturada, piedra o grava natural, arena, etc., de tal manera que cumplan los requisitos de graduación que se establecen en la Tabla 404-5.1 ó 405-5.1 de estas especificaciones. Adicionalmente, deben ser fragmentos, resistentes, libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, dóciles o desintegrables, así como de agregados cubiertos de arcilla u otro material inadecuado”. (MOP-001-F, 2002). Los requisitos antes mencionados se indican, con su respectiva norma, en la Tabla 3.

**TABLA 3: REQUISITOS DE LOS AGREGADOS PARA HORMIGÓN ASFÁLTICO**

Ensayos de calidad de agregados	Unidad	Normas		Especificación	
		ASTM	AASHTO	Mín.	Máx.
Desgaste de los ángeles	%	C-131-96	T 96-02	-	40
Durabilidad con sulfato de sodio en agregado grueso	%	C 88-99	T 104	-	12
Durabilidad con sulfato de sodio en agregado fino	%	C 88-99	T 104	-	12
Partículas fracturadas	%	D 5821-04	-	85 (1c.)/80 (2c.)	
Índice de alargamiento	%	D 4791-15	-	-	10

Índice de aplanamiento	%	D 4791-15	-	-	10
Equivalente de arena	%	D 2419-02	T 176	50	-
Determinación de deletéreos	%	C 142-97	T 112	-	1
Límite líquido	-	D4318-14	T 89-02	-	-
Límite plástico	-	D4318-14	T 89-03	-	-
Índice plástico	-	D4318-14	T 89-04	-	4

**Fuente:** MOP-001-F, 2002

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Se caracterizaron los agregados que utilizan dos plantas de asfalto de una compañía constructora de la ciudad de Guayaquil. La primera se encuentra ubicada en el km 14 de la vía Guayaquil – Daule; allí también se encuentra la mina Chivería de donde se extrae material grueso de tamaño máximo 3/4” y mediano de tamaño máximo 3/8”, provenientes de la trituración de material rocoso de los cerros del sector, la arena utilizada es natural y proviene del Rio Daule, el banco se encuentra en el sector denominado El Limonal. La segunda planta se encuentra ubicada en el Km 26 de la vía Guayaquil – El Triunfo, el material utilizado en esta planta se extrae de la mina Sosoranga ubicada a la altura del Km 72 de la vía Durán - El Triunfo - Bucay, de donde se extrae material grueso de tamaño máximo 3/4” y mediano de tamaño máximo 3/8”, provenientes de la trituración de material de canto rodado; la arena utilizada es natural y proviene del rio Bulu-Bulu, el banco se encuentra en el sector denominado Virgen de Fátima. Previamente estos agregados han sido calificados como óptimos para la elaboración de mezclas asfálticas.

Los ensayos realizados a los agregados de ambas procedencias se ejecutaron siguiendo las metodologías ASTM y AASHTO. Se dividieron en dos grupos denominados convencionales y adicionales.

Dentro de los ensayos convencionales se consideran:

- Determinación de caras fracturadas.
- Determinación de partículas planas y alargadas.
- Determinación de equivalente de arena.
- Determinación de partículas deletéreas.
- Determinación de la angularidad del agregado fino.

- Ensayo desgaste de los ángeles
- Durabilidad con sulfato de sodio
- Índice de plasticidad, material pasante del tamiz N° 40

Para realizar el diseño volumétrico de mezclas por la metodología MARSHALL y RAMCODES se realizaron ensayos denominados adicionales tales como gravedad específica en agregados gruesos y agregados finos, así como la gravedad específica efectiva de la combinación agregados.

Para el caso del agregado grueso se buscó determinar las gravedades específicas bulk, saturada superficialmente seca y aparente, así como la absorción, norma ASTM C 127-88 o AASTHO T 84. De igual manera, para el agregado fino se determinaron las gravedades específicas bulk saturada superficialmente seca y aparente por medio del método del picnómetro, así como la absorción, norma ASTM C 127-88 o AASTHO T 84.

Para fines de diseño, el agregado grueso lo conforman la porción de material que pasa el tamiz 3/4" y es retenido en el tamiz N° 4, procedente de la grava triturada de tamaño máximo 3/4", más la porción de material que pasa el tamiz 3/8" y es retenido en el tamiz N° 4, procedente de la grava triturada de tamaño máximo 3/8". El agregado mediano y fino lo conforman la porción de material que pasa el tamiz N° 4 a pasa tamiz N° 200, procedente de la trituración de la grava de tamaño máximo 3/8", más el material que pasa el tamiz N° 4 a pasa tamiz N° 200 que lo aporta la arena natural de río; consecuentemente a cada porción indicada se les evaluó la gravedad específica por separado.

La Tabla 4 presenta la comparación entre los valores especificados en las normas del MOP (2002) con los resultados de los ensayos de caracterización realizados a los agregados; la Tabla 5 indica un resumen de los ensayos de gravedades específicas sobre el agregado pétreo.

**TABLA 4: ENSAYOS REALIZADOS SOBRE EL AGREGADO PÉTREO**

Característica del ensayo	Unidad	Especificación	Resultados minas	
			Chivería	Sosoranga
Caras fracturadas	%	85 mín (1 o más caras frac.)	100	96.13
Partículas planas y alargadas R 5:1	%	10 máx.	9.4	3
Equivalente de arena	%	50 mín.	79.9	80.6
Partículas deletéreas	%	1 máx.	0.99	0.50
Angularidad del agregado fino	%	45 mín.	35.8	37.7
Desgaste de los ángeles	%	40 máx.	9.9	16.6
Durabilidad con sulfato de sodio	%	12 máx.	1.8	3.1
Índice de plasticidad	%	4 máx.	NP	NP

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Observación: La angularidad de la arena natural procedente de ambos bancos está fuera de especificación; para propósitos de desarrollo de este libro se aceptó su uso.

**TABLA 5: ENSAYOS DE GRAVEDADES ESPECÍFICAS SOBRE EL AGREGADO PÉTREO**

Característica del ensayo	Unidad	Resultados minas	
		Chivería	Sosoranga
<b><i>Grueso, pasa el tamiz de 3/4" y retenido en tamiz N° 4</i></b>			
Gravedad específica Bulk	-	2.889	2.766
Gravedad específica SSS	-	2.911	2.793
Gravedad específica Aparente	-	2.955	2.843
Absorción	%	0.77	0.98
<b><i>Grueso, pasa el tamiz de 3/8" y retenido en tamiz N° 4</i></b>			
Gravedad específica Bulk	-	2.871	2.713
Gravedad específica SSS	-	2.899	2.753
Gravedad específica Aparente	-	2.953	2.826
Absorción	%	0.97	1.48
<b><i>Mediano y fino de la grava 3/8", pasa el tamiz N° 4 – pasa N° 200</i></b>			
Gravedad específica Bulk	-	2.865	2.649
Gravedad específica SSS	-	2.883	2.705
Gravedad específica Aparente	-	2.917	2.806
Absorción	%	0.63	2.10

***Fino de la arena natural, pasa el tamiz N° 4 – pasa N° 200***

Gravedad específica Bulk	-	2.535	2.585
Gravedad específica SSS	-	2.595	2.633
Gravedad específica Aparente	-	2.695	2.715
Absorción (gruesos)	%	2.34	1.86

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

En el ANEXO A se presentan detalladamente los resultados de los ensayos de laboratorio correspondientes a la caracterización de los agregados pétreos.

El Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de Norteamérica se refiere al asfalto como un cemento fuerte, fácil adhesivo, de alta impermeabilidad, y duradero. Este proporciona una flexibilidad controlable a la mezcla, al ser un sólido o semisólido fácilmente licuado con aplicación de calor; y se considera bituminoso debido al hecho de que está constituido por hidrocarburos. (Garnica et al., 2005).

Las propiedades de los materiales, su dosificación y rangos tolerables han sido determinados conforme a los requerimientos del Manual de Especificaciones Generales para construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002, sección 405-5.1 mezcla de hormigón asfáltico en planta; también se hace referencia al uso de la Norma Técnica Ecuatoriana, NTE-INEN.

Se exponen a continuación los requisitos para el asfalto “El tipo y grado del material asfáltico que deberá emplearse en la mezcla será mayormente cemento asfáltico con un grado de penetración 60-70. Para vías o carriles especiales donde se espere el paso de un tráfico muy pesado, se permitirá el empleo de cementos asfálticos mejorados” (MOP-001-F, 2002).

El cemento asfáltico a utilizar deberá cumplir con los requisitos de calidad especificados en la Tabla 6.

**TABLA 6: ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO ASFÁLTICO**

Características de Ensayos al betún original	Unidad	Normas		60 -70		85 -100	
		ASTM	AASHTO	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Penetración (25 °C, 100 gr, 5 s)	mm/10	D 5	T 49-03	60	70	85	100
Punto de ablandamiento Anillo y Bola	°C	D 36-95	T 53-96	48	57	45	53
Índice de penetración (*).	-	-	-	-1.5	+1.5	-1.5	+1.5
Ductilidad (25 °C, 5 cm/minuto)	cm	D 113-07	-	100	-	100	-
Contenido de agua (en volumen)	%	-	-	-	0.2	-	0.2
Solubilidad en Tricloroetileno	%	D 2042	-	99	-	99	-
Punto de inflamación, Copa Cleveland	°C	D 92	T 48-04	232	-	232	-
Densidad relativa, 25 °C/ 25 °C	-	D 70-03	T 228-04	1.00	-	1.00	-
Ensayo de la mancha (**)	-	-	-	Negativo		Negativo	
Contenido de parafinas	%	-	-	-	2.2	-	2.2
<b>Ensayos al residuo del TFOT:</b>							
Variación de masa	%	-	-	-	0.8	-	0.8
Penetración, % de penetración original.	%	-	-	54	-	54	-
Ductilidad	cm	-	-	50	-	50	-
Resistencia al endurecimiento (***)	-	-	-	-	5.0	-	5.0

**Fuente:** MOP-001-F, 2002

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

La Norma Técnica Ecuatoriana, NTE-INEN 2515, muestra los requisitos que deben cumplir los cementos asfálticos obtenidos de productos derivados del petróleo clasificados por su viscosidad. Sus valores especificados se muestran en la Tabla 7.



**TABLA 7: REQUISITOS PARA ASFALTO CEMENTO GRADUAL VISCOSIDAD A 60 °C**

Características del ensayo	Unidad	Norma	Grado de viscosidad AC-20	
			Mín.	Máx.
<b>Sobre muestra original</b>				
Viscosidad Absoluta (60 °C)	Pa.s	ASTM D 2171	160	240
Viscosidad Cinemática (135 °C)	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	ASTM D 2170	300	-
Punto de Inflamación (°C)	° C	NTE INEN 808	232	-
w, Solubilidad en tricloroetileno	%	NTE INEN 915	99.0	-
Gravedad específica 25 °C/25 °C	-	ASTM D 70	Informe	
Índice de Penetración	-	ASTM D5/D5M	- 1,5 a + 1	
<b>Sobre residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio</b>				
Viscosidad Absoluta (60 °C)	Pa.s	ASTM 2171	-	800
Cambio de Masa	%	ASTM 2872	-	1.0
Ductilidad A, 25°C, 5 cm/min	cm	NTE INEN 916	50	-

**Fuente:** NTE-INEN 2515, 2014

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

El cemento asfáltico utilizado en este proyecto está clasificado por su viscosidad como tipo AC-20; proviene de la Refinería Estatal de Esmeraldas, ubicada en la provincia y ciudad del mismo nombre, república del Ecuador. Tiene sus aplicaciones en la construcción y pavimentación de carreteras, autopistas, caminos, calles y también como impermeabilizante.

Se caracterizó en base a su viscosidad para conocer sus propiedades en estado original y sobre el residuo del TFOT.

Los ensayos que se necesitan para evaluar las propiedades requeridas de calidad del cemento asfáltico son varios. A continuación, se muestra los ensayos realizados al ligante.

#### **Sobre la muestra Original**

- Viscosidad Absoluta (60 °C)
- Viscosidad Cinemática (135 °C)

- Punto de Inflamación (°C)
- Densidad Relativa (25 °C)
- Índice de Penetración
- Penetración (25°C)
- Punto de Ablandamiento °C

#### **Ensayos al residuo del (TFOT - 5 horas a 163 °C)**

- Viscosidad Absoluta (60 °C)
- Cambio de Masa (%)
- Ductilidad (25 °C)

La Tabla 8 presenta la comparación entre los valores especificados en la norma NTE-INEN 2515 Enmienda 1 (NTE-INEN 2515, 2014) y los resultados de los ensayos de caracterización realizados al asfalto.

**TABLA 8: ENSAYOS REALIZADOS SOBRE EL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20**

<b>Características de ensayo Sobre muestra Original</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificación</b>	<b>Resultados</b>
Viscosidad Absoluta (60 °C)	Pa.s	160 - 240	210
Viscosidad Cinemática (135 °C)	Pa.s	300 mín.	353
Punto de Inflamación (°C)	° C	232 mín.	295
Densidad Relativa (25 °C)	g/cm <sup>3</sup>	1.00	1.0218
Índice de Penetración	-	- 1,5 a 1	-1.0
Penetración (25°C)	mm/10	60 -70	70
Punto de Ablandamiento °C	° C	47 - 58	48
<b>Sobre residuo del (TFOT. 5 horas a 163 °C)</b>			
Viscosidad Absoluta (60 °C)	Pa.s	800 máx.	888
Cambio de Masa (%)	%	1.0 máx.	-0.32
Ductilidad (25 °C)	cm	50 mín.	42

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Observaciones: Los valores de viscosidad absoluta y ductilidad del residuo están fuera de especificación. Para propósitos de desarrollo de este libro, se aceptó su uso.

En el ANEXO B se presentan un resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio correspondientes a la caracterización del asfalto.

### **Viscosidad rotacional Brookfield**

Se utiliza para determinar la viscosidad del asfalto al aplicarle temperatura. Se coloca una pequeña muestra de asfalto en un recipiente especial controlado termostáticamente. El torque requerido, aplicado sobre un vástago cilíndrico que se sumerge en la muestra, para hacerlo girar, a velocidad de rotación y temperatura constante, se emplea como parámetro para calcular la resistencia relativa a la rotación, lo que permite obtener la viscosidad del ligante en unidades de Pascal por segundo. Los valores medidos mediante este procedimiento se utilizan en diagramas de temperatura vs viscosidad, que a su vez sirven para estimar las temperaturas de mezclado y compactación a utilizar durante el diseño y construcción de mezclas asfálticas en caliente. Norma Colombiana INV E-717-07 (Invias, 2007).

El equipo utilizado es un Viscosímetro BROOKFIELD DV3T, tiene una pantalla digital donde se muestra automáticamente la viscosidad de la muestra en Pascal por segundo ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ); el vástago utilizado o también denominado aguja fue la N° 21, Figura 7.

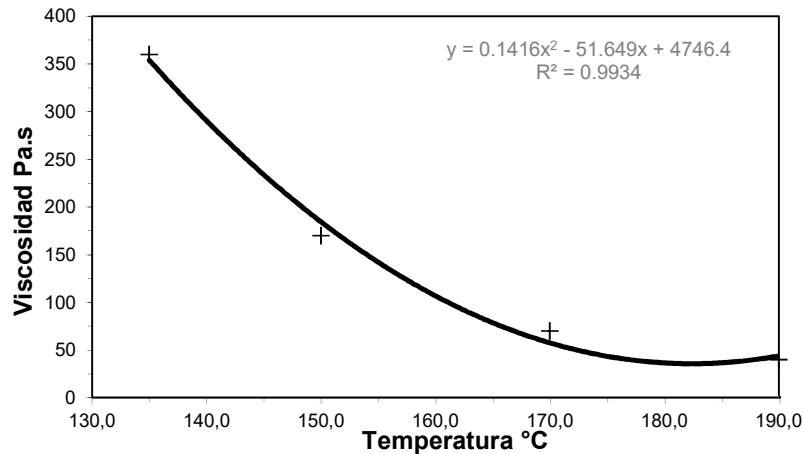


**FIGURA 7: EQUIPO PARA ENSAYO DE VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

La Figura 8 representa la curva reológica obtenida para el ligante ensayado, en ella se aprecia claramente la variación de la viscosidad Brookfield que experimenta el ligante en función de la temperatura de ensayo.



**FIGURA 8: CURVA REOLÓGICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO UTILIZADO, AC-20**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

El requerimiento ingenieril para el diseño de mezclas asfálticas ha recurrido a través del tiempo a varios métodos; existen pasos generales que no varían según sea la metodología escogida, estos son:

- Selección de los materiales (agregado, asfalto y requisitos volumétricos),
- Selección del contenido óptimo de ligante asfáltico (Fórmula de trabajo)
- Selección de la estructura de agregado de diseño (Granulometría)

La técnica de diseño de las mezclas asfálticas utilizadas para el desarrollo de este proyecto como se menciono es Marshall, adicionalmente se obtendrá la dosificación del ligante asfáltico mediante la aplicación de la metodología RAMCODES.

*Selección de los materiales.*

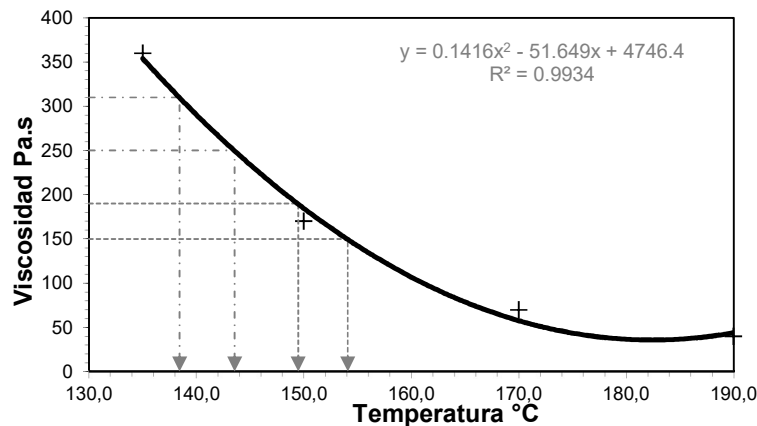
Dentro de la selección de los materiales, las exigencias que deben cumplir el agregado y el asfalto son las mismas con las que se los calificó inicialmente. Adicionalmente se debe determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en laboratorio, así como la determinación del nivel tránsito.

### Selección del ligante asfáltico – temperaturas.

Partiendo de los resultados del ensayo de viscosidad y del trazado de la curva reológica del cemento asfáltico utilizado se determinó las temperaturas de mezclado y de compactación en laboratorio en base a los criterios de  $170 \pm 20$  Pa.s y  $280 \pm 30$  Pa.s respectivamente. Tal como muestra la Figura 9, la temperatura de mezclado esta entre  $149\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $154\text{ }^{\circ}\text{C}$  y el intervalo de compactación entre  $138\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $144\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Los valores obtenidos mediante la aplicación del nomograma de Heukelom (Figura 10) para los mismos criterios son: Temperatura de mezclado es  $157\text{ }^{\circ}\text{C}$  y de compactación es  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

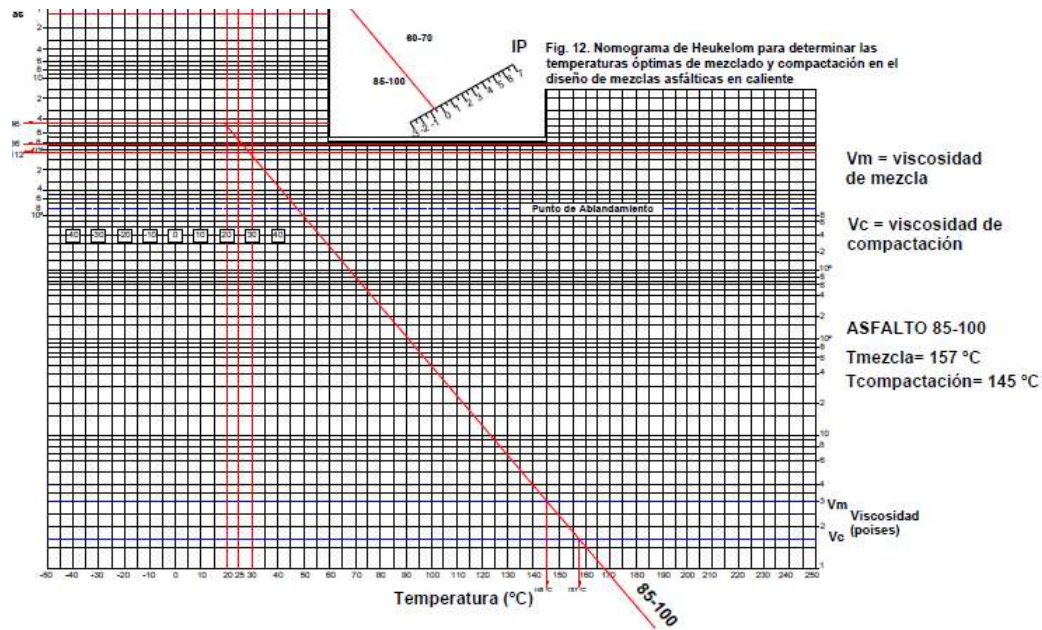
Como se indica los valores obtenidos por ambas formas son muy semejantes.



**FIGURA 9: TEMPERATURAS COMPACTACIÓN Y MEZCLADO - CURVA REOLÓGICA DEL ASFALTO UTILIZADO**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.



**FIGURA 10: NOMOGRAMA DE HEUKELOM**

**Fuente:** Heukelom, 1969  
**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

### *Requisitos de la granulometría.*

Para la elaboración de mezclas asfálticas por medio de la metodología Marshall, la granulometría se obtiene por medio de una gráfica semilogarítmica; en las abscisas va escalado en forma logarítmica la abertura de los tamices de la serie ASTM para las mallas de alambre, expresada en mm, y en las ordenadas va el material pasante de cada tamiz expresado en porcentaje.

La curva granulométrica de diseño queda definida por el tamaño máximo nominal del agregado y por las líneas de control superior o inferior que representan un rango o margen de paso obligatorio del punto granulométrico para cada uno de los tamices que la conforman.

La Tabla 9 muestra los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus rangos de control para cada tamiz de acuerdo las Especificaciones MOP-2-102-10-F-2002.

**TABLA 9: GRADUACIONES PROPUESTAS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Tamiz	Diámetro	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	mm	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4
1"	25.00	100	-	-	-
3/4"	19.00	90-100	100	-	-
1/2"	12.50	-	90-100	100	-
3/8"	9.50	56-80	-	90-100	100
Nº 4	4.75	35-65	44-74	55-85	80-100
Nº 8	2.36	23-49	28-58	32-67	65-100
Nº 16	1.18	-	-	-	40-80
Nº 30	0.60	-	-	-	25-65
Nº50	0.30	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7-40
Nº100	0.15	-	-	-	3-20
Nº200	0.075	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

**Fuente:** MOP-001-F, 2002

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Los requisitos volumétricos y mecánicos de diseño Marshall se muestran en la Tabla 10, están en función del nivel de tránsito esperado en la vida útil del pavimento, ligero medio y pesado.

**TABLA 10: CRITERIO DE DISEÑO DE MEZCLAS MÉTODO MARSHALL**

Método Marshall	Tráfico ligero Carpeta y base		Tráfico medio Carpeta y base		Tráfico pesado Carpeta y base	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes		35		50		75
Estabilidad (N)	3336	-	5338	-	8006	-
(lb)	750	-	1200	-	1800	-
Flujo (0.25mm)(0.01in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver Tabla 11					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: ASTM D3515, 2013

Elaborado por: Jhonny Pincay B.

La metodología Marshall establece un valor mínimo de Vacíos del Agregado Mineral (VAM), está en función de tamaño máximo nominal de la granulometría de la mezcla de diseño y del contenido de vacíos de aire ( $V_a$ ) que se le dé a la mezcla. Los valores se muestran en la Tabla 11.

**TABLA 11: MÍNIMO PORCENTAJE DE VACÍOS DE AGREGADO MINERAL**

Tamaño máximo nominal de la partícula		Porcentaje mínimo VAM		
mm	in	3	4	5
1.18	Nº16	21.5	22.5	23.5
2.36	Nº8	19.0	20.0	21.0
4.75	Nº6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0



19	3/4	12.0	13.0	14.0
25	1	11.0	12.0	13.0
37.5	1 1/2	10.0	11.0	12.0

**Fuente:** ASTM D3515, 2013

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Para vías de tráfico pesado y muy pesado adicionalmente se deberá cumplir con la relación entre el porcentaje en peso del agregado pasante del tamiz N° 200 y el contenido de asfalto en porcentaje en peso del total de la mezcla (filler/betún); se recomienda que sea mayor o igual a 0,8 y siempre menor a 1,2 (MOP-001-F, 2002).

Con el propósito de realizar un análisis comparativo volumétrico entre las dos metodologías, se consideró como referencia un nivel de tránsito de 10 millones de ejes equivalentes (ESALs) correspondiente a un nivel de tráfico pesado; por lo tanto, la compactación equivale a un número de golpes en cada uno de los especímenes a 75 golpes por cara.

Los criterios establecidos para el diseño de la mezcla asfáltica - método Marshall se muestran en la Tabla 12:

**TABLA 12. CRITERIOS ESTABLECIDOS PARA EL DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Características	Unidad	Especificación	
		Mín.	Máx.
Estabilidad	Lb	1800	-
Vacíos de aire	%	3	5
Flujo	(1/100")	8	14
Vacíos llenados de asfalto	%	65	75.00
Vacíos en agregado mineral	-	14	-
Relación Filler - Betun	mm/10	0.8	1.2

**Fuente:** MOP-001-F, 2002

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

A los materiales de tamaño máximo 3/4", 3/8" y arena natural procedentes de ambas plantas y muestreado de los bancos se les determinó su granulometría por separado; con estos resultados individuales de cada fracción se calculó por medio de prueba y error las proporciones de material requerido para obtener la estructura

de agregado de diseño de tal manera que la combinación conseguida cumpla con los requisitos de las granulometrías normadas propuestas para mezclas asfálticas.

Las fracciones para obtener la estructura de agregado de diseño, con los materiales seleccionados se muestran en la Tabla 13. Los procedentes de la mina Chivería se los denomina M-CHI-1 y los de la mina Sosoranga se los denomina M-SOS-1.

**TABLA 13: FRACCIONES DE COMBINACIÓN PARA GRANULOMETRÍAS DE DISEÑO**

Tamaño del material	Porcentaje Usado M-CHI-1	Porcentaje Usado M-SOS-1
3/4"	25 %	35 %
3/8"	65 %	55 %
ARENA	10 %	10 %

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.

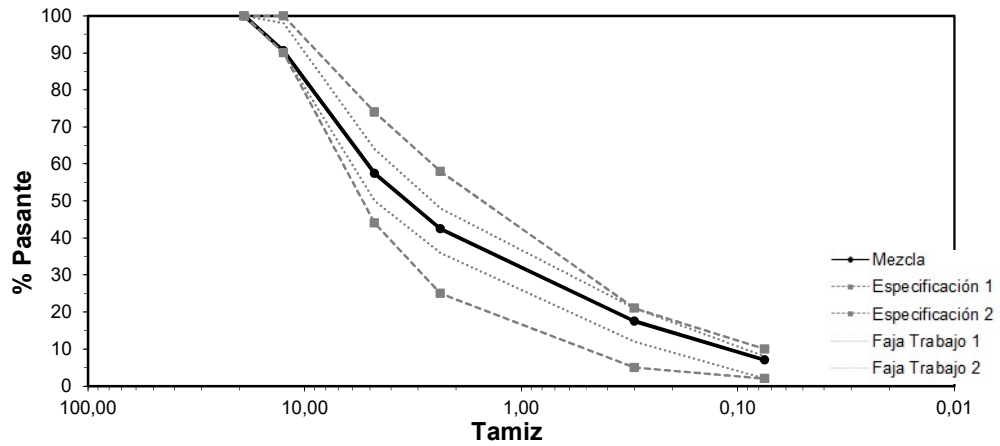
Las granulometrías de diseño para ambas mezclas seleccionadas, se ajustaron a las especificaciones de graduación propuesta de 1/2" conforme se muestra en las Tablas 14 y 15 y Figuras 11 y 12. Por lo tanto el tamaño máximo nominal para ambas mezclas de granulometrías es de 1/2".

**TABLA 14: GRANULOMETRÍA DE DISEÑO, MEZCLA M-CHI-1**

Tamiz	Diámetro	Puntos de control		Faja trabajo		Granulometría
	mm.	Min %	Max %	Min %	Max %	% Pasa
3/4"	19.00	100	100	100	100	100.0
1/2"	12.50	90	100	90	98	90.6
Nº 4	4.75	44	74	50	64	57.4
Nº 8	2.36	25	58	36	48	42.5
Nº50	0.30	5	21	12	21	17.6
Nº200	0.075	2	10	2	8	7.0

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.



**FIGURA 11: GRANULOMETRÍA DE DISEÑO, FRANJAS LÍMITES Y DE TRABAJO, MEZCLA M-CHI-1**

Fuente: El autor

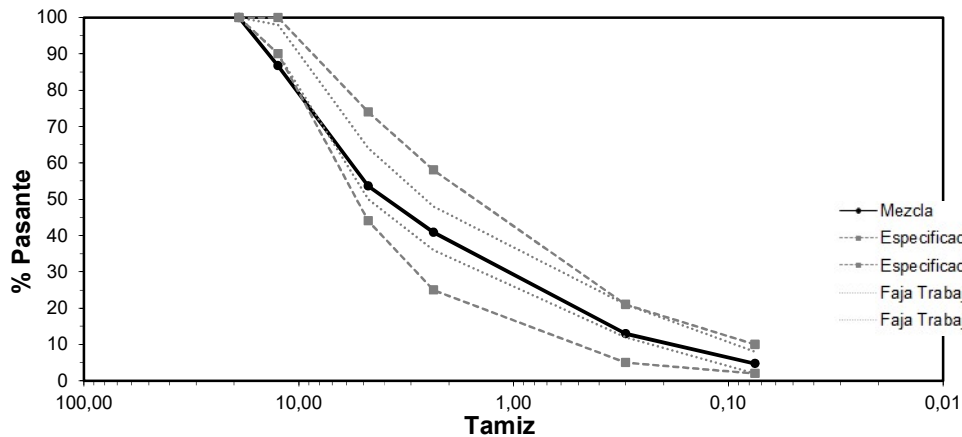
Elaborado por: Jhonny Pincay B.

**TABLA 15: GRANULOMETRÍA DE DISEÑO, MEZCLA M-SOS-1**

Tamiz	Diámetro	Puntos de control		Faja trabajo		Granulometría
	mm.	Min %	Max %	Min %	Max %	% Pasa
3/4"	19.00	100	100	100	100	100.0
1/2"	12.50	90	100	90	98	86.8
Nº 4	4.75	44	74	50	64	53.6
Nº 8	2.36	25	58	36	48	40.9
Nº50	0.30	5	21	12	21	12.9
Nº200	0.075	2	10	2	8	4.7

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.



**FIGURA 12: GRANULOMETRÍA DE DISEÑO, FRANJAS LÍMITES Y DE TRABAJO, MEZCLA M-SOS-1**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

*Observación:* El porcentaje retenido en el tamiz 1/2" para la granulometría M-SOS-1 está fuera de especificación, 3.2 puntos por debajo del mínimo; para propósitos de desarrollo de el libro, se aceptó su uso.

En el ANEXO D se presentan un resumen de los resultados de las granulometrías realizadas y el análisis de los porcentajes de combinación de los agregados.

La mezcla de los agregados grueso, mediano y fino, se ajustó a las exigencias de la especificación MOP (2002) para una granulometría de mezcla asfáltica densa en caliente. Conviene indicar que es un tipo de mezcla asfáltica ampliamente utilizado en el País.

Con base en los resultados anteriores, se consideró a las combinaciones aceptables y se las definió como las estructuras de agregados de diseño.

Una vez seleccionada las granulometrías de diseño se procedió a determinar sus gravedades específicas promedios aplicando los resultados de ensayos de gravedad específicas ejecutados a cada material. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 16.

Como la mezcla consiste en las fracciones de agregados, indicadas en la Tabla 5, y todos tienen gravedades específicas diferentes, es necesario determinar la gravedad

específica de masa (Gsb) y la gravedad específica aparente (Gsa) para las combinaciones de agregados seleccionados.

La gravedad específica efectiva de la combinación agregados (Gse) depende del volumen de asfalto absorbido, por lo que esta función de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Gmm), norma ASTM D 2041-03 o AASHTO T 209, considerando previamente el periodo de curado de la misma que permita la absorción de asfalto.

**TABLA 16: GRAVEDADES ESPECÍFICAS DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS**

Gravedades específicas	M-CHI-1	M-SOS-1
Gsa	2.909	2.812
Gse	2.904	2.754
Gsb	2.835	2.689

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Como medida de comprobación de ensayos realizados se observa que se cumple la siguiente ecuación,  $Gsa > Gse > Gsb$ , en ambas mezclas.

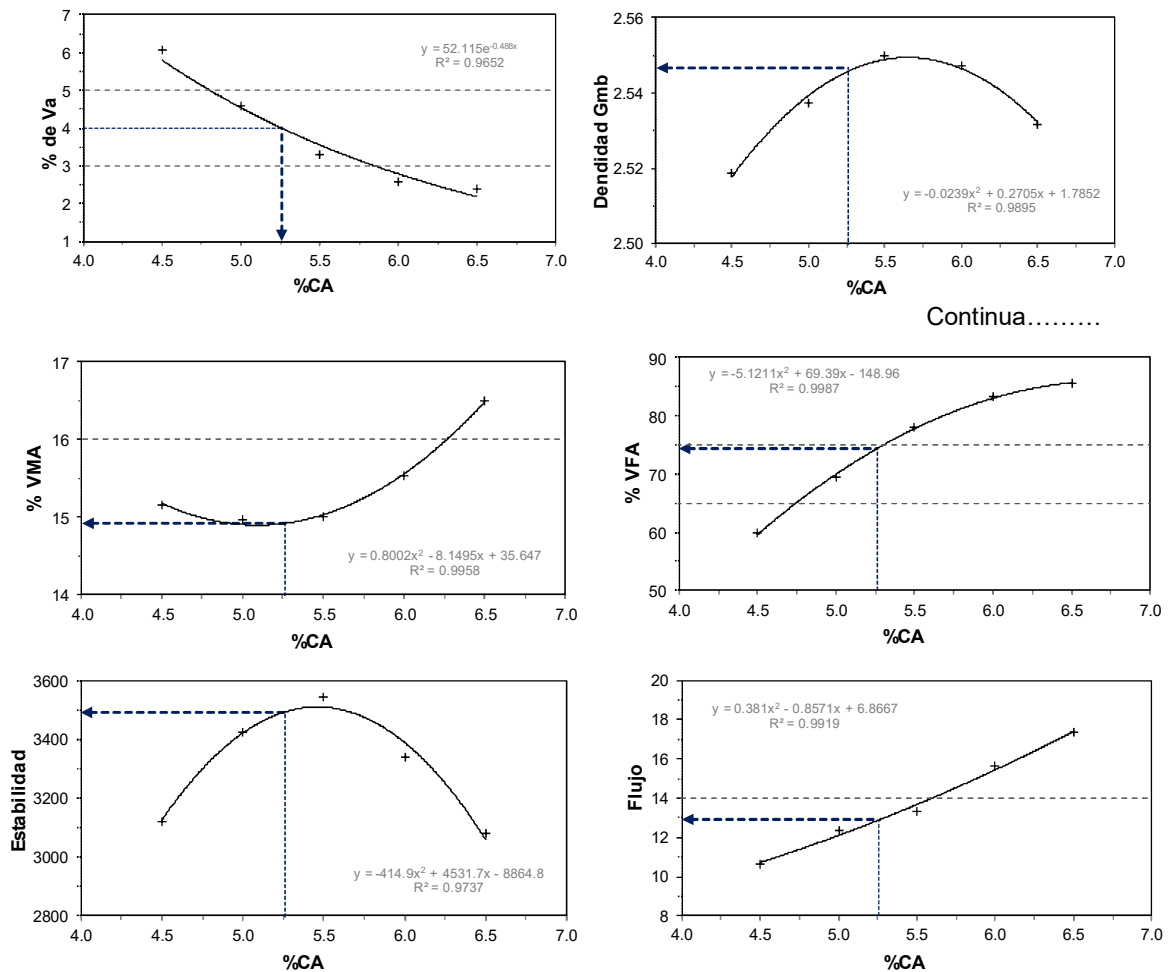
El porcentaje promedio de absorción para la mezcla M-CHI-1 es del 0.77% y para la mezcla M-SOS-1 es del 1.44%. En el ANEXO C se presenta un resumen de los resultados de las gravedades específicas de combinación de los agregados.

Para obtener la dosificación por el método Marshall se evaluó las granulometrías con 5 contenidos de asfalto, con variación del 0.5%, se preparó 3 briquetas para cada contenido; por otro lado, la dosificación RAMCODES se comprobó mediante la elaboración de 3 briquetas con el contenido óptimo de asfalto. Consecuentemente para cada granulometría se fabricaron 15 briquetas por método Marshall y 3 por RAMCODES, en total 36 pastillas.

Para determinar el  $\%CA_{\text{óptimo}}$ , en la gráfica ( $\%CA$  vs  $V_a$ ) se ingresa con el 4% de vacíos, luego se desplaza en forma horizontal hasta interceptar con la curva e inmediatamente se proyecta ese punto en forma vertical hacia el eje de las abscisas, la lectura final del proceso determina el porcentaje de asfalto a evaluar conforme lo indicado en el acápite 2.5.2.

En la Figura 13 se muestran las curvas obtenidas, la selección del contenido de asfalto y la determinación gráfica de las demás propiedades del diseño para la mezcla asfáltica M-CHI-1, y en la Figura 14 para la mezcla M-SOS-1, respectivamente.

En el ANEXO E se presentan detalladamente los cálculos correspondientes del diseño de las mezclas asfálticas de ambas mezclas.



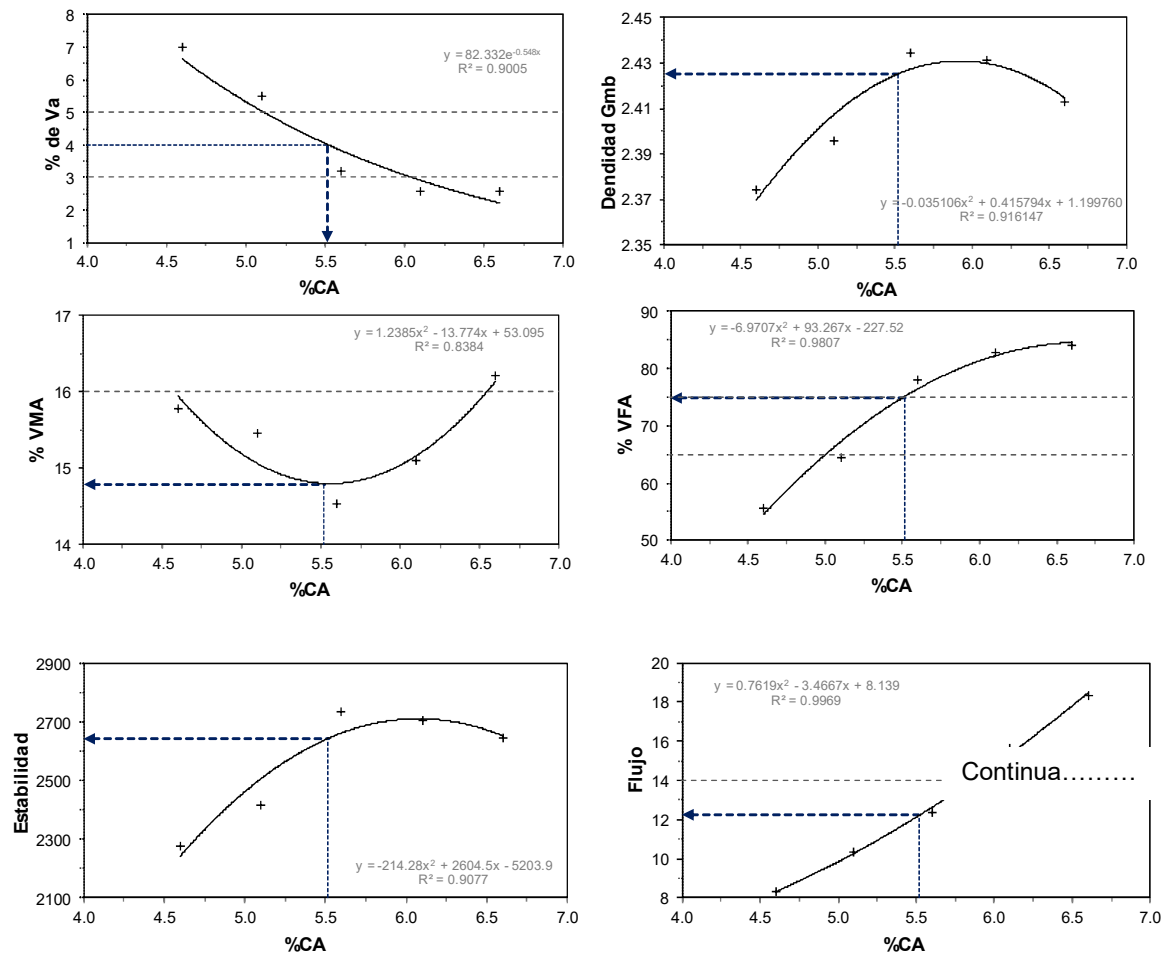
**FIGURA 13: DETERMINACIÓN GRÁFICA DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO Y PROPIEDADES, MEZCLA M-CHI-1**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

*Nota:* Las líneas entrecortadas en gris indican los rangos máximos y mínimos de especificación para cada propiedad; las flechas de color azul con líneas entrecortadas indican el valor obtenido gráficamente de cada propiedad para el %CA

evaluado; la cruz indica el promedio de las 3 briquetas ensayadas con cada contenido de asfalto; y la curva continua y su ecuación, representan la obtenida por regresión que mejor se ajustó a los pares ordenados evaluados.



**FIGURA 14: DETERMINACIÓN GRÁFICA DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO Y PROPIEDADES, MEZCLA M-SOS-1**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto se utiliza la hoja programada en Excel, de la metodología RAMCODES, desarrollada por el autor y formulada conforme lo indicado en los acápites 2.6.3 y 2.6.4; y que se incluye en el libro, con su respectivo manual de uso. A continuación, se muestran los pasos a seguir.

### 1) Ingreso de datos

Básicamente corresponde a las gravedades específicas de la mezcla de los materiales ( $G_{se}$  y  $G_{sb}$ ), el peso específico del asfalto ( $G_b$ ), la selección del tamaño máximo del agregado (TMA), obtenido según la granulometría de diseño y que regula la especificación del VAM; y finalmente el Tránsito (ESAL's) que se espera soportará la carpeta asfáltica, este parámetro regula la especificación máxima y mínima del VFA, Tabla 17.

**TABLA 17: DATOS DE INGRESO A LA HOJA ELECTRÓNICA.**

Propiedad	M-CHI-1	M-SOS-1
$G_{se}$	2.904	2.754
$G_b$	1.0218	1.0218
$G_{sb}$	2.835	2.689
TMA (mm)	12.5	12.5
Tránsito, Esal's (millones)	$10^6$	$10^6$

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

## 2) Reporte del cálculo del $G_{mb}$ variando el %CA

En este paso se calculan automáticamente los valores de  $G_{mb}$  para cada especificación de vacío variando el %CA (Tablas 18 y 19). Sirven para el trazado de las isóneas de vacíos de aire ( $V_a$ ), de vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenados con asfalto (VFA), calculadas mediante las ecuaciones mostradas en el acápite 2.6.2.



**TABLA 18: VALORES CALCULADOS DE GMB, MEZCLA M-CHI-1**

<b>%CA</b>	<b>Va 0%</b>	<b>Va1 3%</b>	<b>Va2 3%</b>	<b>VAM1 14%</b>	<b>VAM2 16%</b>	<b>VFA1 65%</b>	<b>VFA2 75%</b>
3.0	2.752	2.669	2.614	2.513	2.455	2.668	2.700
3.5	2.728	2.646	2.592	2.526	2.468	2.627	2.665
4.0	2.705	2.624	2.570	2.540	2.480	2.588	2.631
4.5	2.682	2.601	2.548	2.553	2.493	2.549	2.598
5.0	2.659	2.579	2.526	2.566	2.507	2.512	2.566
5.5	2.637	2.558	2.505	2.580	2.520	2.476	2.535
6.0	2.615	2.537	2.484	2.594	2.533	2.440	2.504
6.5	2.594	2.516	2.464	2.607	2.547	2.406	2.474

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.

**TABLA 19: VALORES CALCULADOS DE GMB, MEZCLA M-SOS-1**

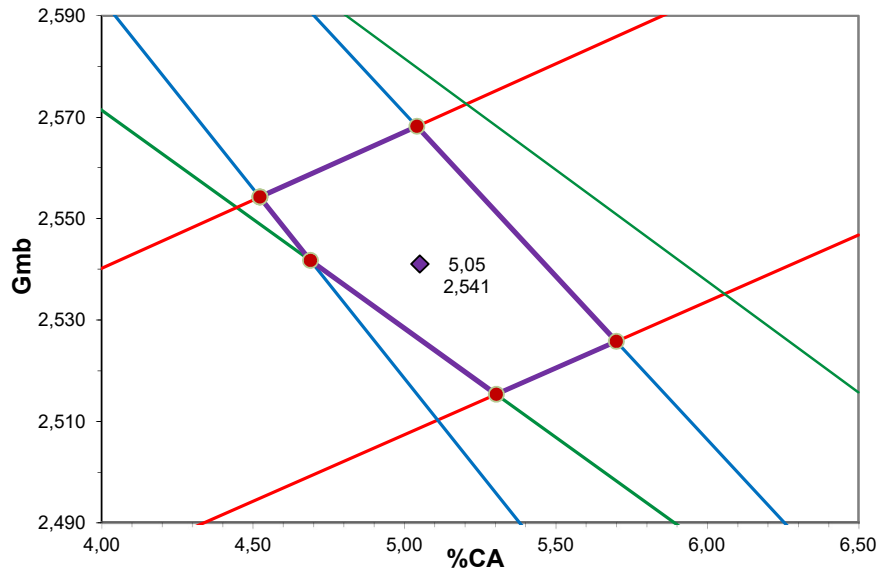
<b>%CA</b>	<b>Va 0%</b>	<b>Va1 3%</b>	<b>Va2 3%</b>	<b>VAM1 14%</b>	<b>VAM2 16%</b>	<b>VFA1 65%</b>	<b>VFA2 75%</b>
3.1	2.617	2.538	2.486	2.387	2.331	2.538	2.568
3.6	2.596	2.518	2.466	2.399	2.343	2.502	2.537
4.1	2.575	2.498	2.446	2.412	2.356	2.467	2.507
4.6	2.555	2.478	2.427	2.424	2.368	2.432	2.477
5.1	2.535	2.459	2.408	2.437	2.381	2.399	2.449
5.6	2.515	2.440	2.390	2.450	2.393	2.366	2.421
6.1	2.496	2.421	2.371	2.463	2.406	2.334	2.393
6.6	2.477	2.403	2.353	2.476	2.419	2.304	2.367

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.

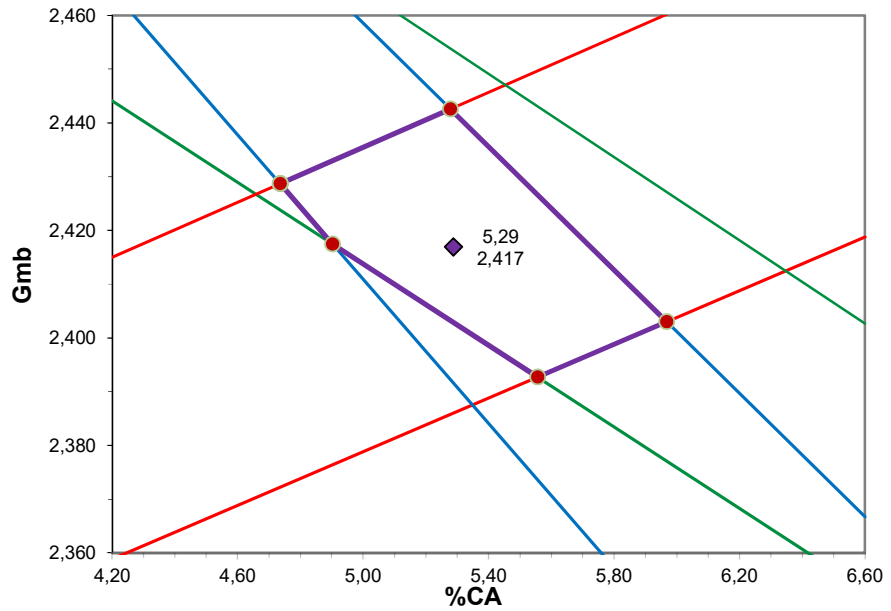
### 3) Trazado del polígono de vacío, reporte de las coordenadas que lo conforman y cálculo del %CA óptimo.

En las Figuras 15 y 16 se muestran los polígonos de vacíos, reportados automáticamente, de las dos mezclas ensayadas. Los puntos centrales indican el porcentaje óptimo de asfalto obtenido del promedio de las coordenadas que lo conforman (Dosificación RAMCODES). La Tabla 20 muestra las coordenadas de los vértices de los polígonos de vacíos y de los centroides.



**FIGURA 15: POLÍGONO DE VACÍOS Y DOSIFICACIÓN RAMCODES, MEZCLA M-CHI-1**







**Fuente:** El autor  
**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.



**FIGURA 16: POLÍGONO DE VACÍOS Y DOSIFICACIÓN RAMCODES, MEZCLA M-SOS-1**

**Fuente:** El autor  
**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

## Simbología

	isolinea VAM
	isolinea VAF
	isolinea Va
	isolinea Gmm
	Polígono de vacíos
	Dosificación RAMCODES

**TABLA 20: REPORTE DE COORDENADAS DE POLÍGONOS DE VACÍOS**

No	M-CHI-1		M-SOS-1	
	% AC	Gmb	% AC	Gmb
<b>1.00</b>	4.73	2.429	4.52	2.554
<b>2.00</b>	5.28	2.443	5.04	2.568
<b>3.00</b>	5.97	2.403	5.70	2.526
<b>4.00</b>	5.56	2.393	5.30	2.515
<b>5.00</b>	4.90	2.417	4.69	2.542
<b>Promedio</b>	<b>5.29</b>	<b>2.417</b>	<b>5.05</b>	<b>2.541</b>

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.

## Comprobación dosificación RAMCODES

Las dosificaciones obtenidas por la metodología RAMCODES para las combinaciones M-CHI-1 y M-SOS-1 se comprobaron mediante la elaboración de las mezclas asfálticas respectivas, obviamente con el contenido óptimo de asfalto calculado en el acápite 3.3.3.2; por recomendación del autor de esta metodología se compactó y ensayo un total de tres briquetas por mezcla analizada y cuyo valor promedio se reportó como los valores obtenidos de cada una de las propiedades.

Los ensayos se realizaron conforme el procedimiento indicado en ASTM D 1559.

Se preparó y ensayó un total de 6 briquetas. En el ANEXO F se presentan detalladamente los cálculos correspondientes de la comprobación correspondiente de ambas mezclas.



### CAPÍTULO III

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para medir el porcentaje óptimo de asfalto que requieren las muestras asfálticas analizadas, tanto para la mezcla M-CHI-1 y M-SOS-1 se realizaron los ensayos de Marshall, RAMCODES y comprobación física de la dosificación obtenida por RAMCODES.

Las Tablas 21 y 22 muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados tanto para la mezcla M-CHI-1 y M-SOS-1 respectivamente.

**TABLA 21: PROPIEDADES DE DISEÑO, MEZCLA ASFÁLTICA M-CHI-1**

Característica a mezcla	Unidad	Especificación		Marshall	RAMCODE S	Comprobación RAMCODES
		Mín.	Máx.			
% CA	%	-	-	5.26	5.05	5.05
Va	%	3	5%	4.00	4.36	4.31
VMA	%	14%	16%	14.92	14.89	14.85
VFA	%	65%	75%	74.35	70.73	70.95
Gmb	g/cm <sup>3</sup>		-	2.547	2.541	2.542
Estabilidad	Lbs	1800	-	3493	-	3345
Flujo	(1/100")	8	14	12.90	-	12.30
Filler/Betún	%	0.8	1.2	1.58	1.65	1.66

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.

**TABLA 22: PROPIEDADES DE DISEÑO, MEZCLA ASFÁLTICA M-SOS-1**

Característica a mezcla	Unidad	Especificación		Marshall	RAMCODE S	Comprobación RAMCODES
		Mín.	Máx.			
% CA	%	-	-	5.52	5.29	5.29
Va	%	3	5%	4.00	4.38	4.41
VMA	%	14%	16%	14.80	14.89	14.92
VFA	%	65%	75%	74.90	70.59	70.43
Gmb	g/cm <sup>3</sup>		-	2.425	2.417	2.416
Estabilidad	Lbs	1800	-	2643	-	2610
Flujo	(1/100")	8	14	12.21	-	12.70
Filler/Betún	%	0.8	1.2	1.01	1.06	1.01

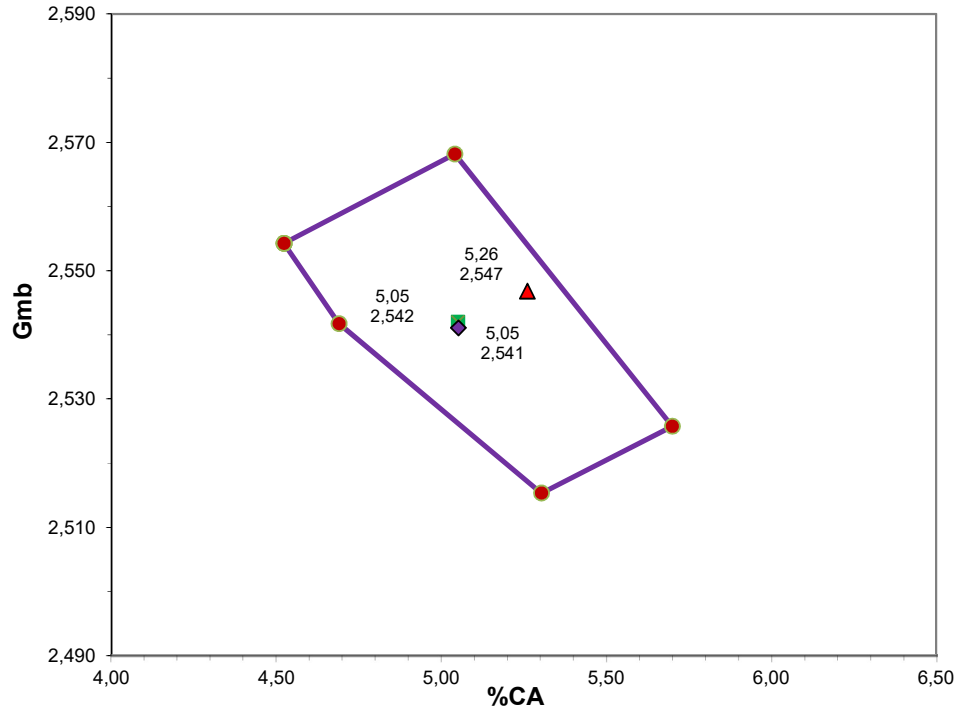
**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

De los resultados obtenidos para ambas muestras se aprecia:

- a) Se cumplen todos los requerimientos de vacíos, densidad, estabilidad y flujo tanto por la metodología Marshall, evaluada para un 4% de vacíos, como por RAMCODES y su comprobación física.
- b) El porcentaje óptimo de asfalto obtenido por Marshall es 3.97 y 4.19% mayor que el obtenido mediante RAMCODES para M-CHI-1 y M-SOS-1 respectivamente. Esto se puede traducir en un ahorro de asfalto para la planta, a largo plazo, o al procesar grandes cantidades de mezcla.
- c) El porcentaje de vacío calculado mediante RAMCODES es 8.22 y 8.63% mayor que el establecido por Marshall para M-CHI-1 y M-SOS-1 respectivamente. Ambas se encuentran dentro de especificación, pero obviamente la dosificación RAMCODES al tener un mayor porcentaje de vacíos requiere una menor cantidad de asfalto, tal como se aprecia para ambas muestras.
- d) El valor del VMA no presenta mucha diferencia en los valores obtenidos, se encuentran muy cercano al promedio de ambos límites establecidos.
- e) El valor del VFA obtenido por Marshall se encuentra muy pegado al límite superior, no así el calculado mediante RAMCODES que se encuentra muy cercano al promedio de ambos límites establecidos.
- f) El valor de la estabilidad en ambas muestras es muy superior al mínimo requerido. El valor mayor se da para la mezcla M-CHI-1, muy probablemente por la presencia en exceso de finos, tal como lo demuestra la relación filler/betún, que se encuentra muy superior al límite máximo requerido, probablemente esta rigidez ocasioné falla frágil a la mezcla in situ.
- g) Los valores de vacíos y densidad de comprobación de RAMCODES se encuentran muy cercanos a los valores obtenidos analíticamente, el mismo comportamiento tienen los valores de estabilidad y flujo obtenidos por Marshall para ambas muestras, lo que demuestra la eficacia del método.
- h) Las tres dosificaciones obtenidas, %CA <sub>óptimo</sub> con su correspondiente Gmb, tal como era de esperarse se encuadran dentro de los polígonos de vacíos

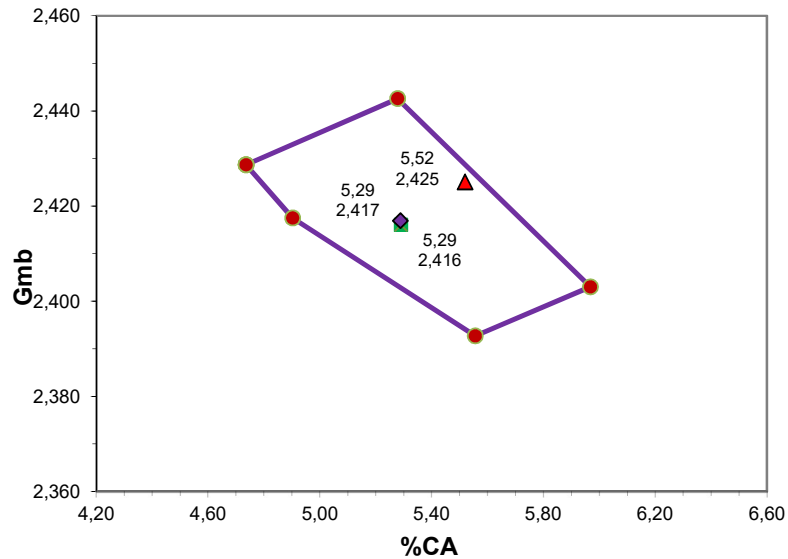
obtenidos, así lo demuestran las Figuras 17 y 18 para M-CHI-1 y M-SOS-1 respectivamente.



**FIGURA 17: POLÍGONO DE VACÍOS Y DOSIFICACIONES MARSHALL, RAMCODES Y COMPROBACIÓN RAMCODES, MEZCLA M-CHI-1**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.



**FIGURA 18: POLÍGONO DE VACÍOS Y DOSIFICACIONES MARSHALL, RAMCODES Y COMPROBACIÓN RAMCODES, MEZCLA M-SOS-1.**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

### Simbología

- Polígono de vacíos
- ▲ Dosificación Marshall
- ◆ Dosificación RAMCODES
- Comprobación Dosificación RAMCODES
- Vértice polígono de vacío

- i) La dosificación obtenida mediante Marshall se encuentra cercano al límite superior establecido por el polígono de vacíos, alejado con relación al centro de gravedad del mismo que es la dosificación RAMCODES.
- j) Los equipos utilizados para obtener la dosificación RAMCODES prácticamente son los mismos utilizados por Marshall, debido a que se debe comprobar 3 briquetas que deben ser elaboradas y ensayadas siguiendo el procedimiento ASTM D 1559 – 89. Una ventaja es la reducción de elaboración del número de pastillas de 15 a 3 por cada mezcla ensayada, lo que representa principalmente ahorro de tiempo en la obtención de resultados.
- k) Con los parámetros de los materiales que requiere RAMCODES se puede conocer también el porcentaje de asfalto óptimo para varios niveles de tránsito casi en forma instantánea, aplicando la hoja de cálculo, únicamente



se varia este parámetro en liviano, mediano o pesado dado en Esal's. Esto no se puede realizar rápidamente con Marshall ya que eso implicaría elaborar un nuevo diseño variando el nivel de compactación de las mezclas, entre otros requerimientos.

Del análisis anterior se observa que las dosificaciones obtenidas por Marshall a pesar de cumplir los requerimientos de vacíos, densidad, estabilidad y flujo, sus valores se pueden mejorar variando principalmente el porcentaje de vacíos. Una excelente referencia de partida puede ser el valor de vacíos obtenido analíticamente por RAMCODES y así obtener el %CA que servirá para evaluar gráficamente los demás requerimientos.

El proceso antes mencionado se realizó y sus resultados se muestran en las Tablas 23 y 24 así como los valores superpuestos en los polígonos de vacíos, Figuras 19 y 20.

**TABLA 23: RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA, USANDO VA DE RAMCODES, MEZCLA M-CHI-1**

Característica a mezcla	Unidad	Especificación		Marshall	RAMCODE S	Comprobación RAMCODES
		Mín.	Máx.			
% CA	%	-	-	5.08	5.05	5.05
Va	%	3	5%	4.36	4.36	4.31
VMA	%	14%	16%	14.90	14.89	14.85
VFA	%	65%	75%	71.46	70.73	70.95
Gmb	g/cm <sup>3</sup>		-	2.543	2.541	2.542
Estabilidad	Lbs	1800	-	3450	-	3345
Flujo	(1/100")	8	14	12.36	-	12.30
Filler/Betún	%	0.8	1.2	1.65	1.65	1.66

Fuente: El autor

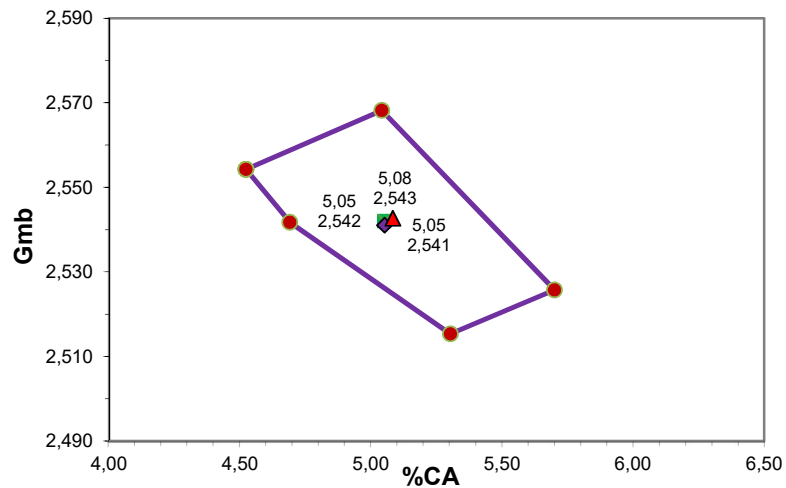
Elaborado por: Jhonny Pincay B.

**TABLA 24. RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA, USANDO VA DE RAMCODES, MEZCLA M-SOS-1**

Característica a mezcla	Unidad	Especificación		Marshall	RAMCODE S	Comprobación RAMCODES
		Mín.	Máx.			
% CA	%	-	-	5.35	5.29	5.29
Va	%	3	5%	4.38	4.38	4.41
VMA	%	14%	16%	14.85	14.89	14.92
VFA	%	65%	75%	72.01	70.59	70.43
Gmb	g/cm <sup>3</sup>		-	2.419	2.417	2.416
Estabilidad	Lbs	1800	-	2598	-	2610
Flujo	(1/100")	8	14	11.42	-	12.70
Filler/Betún	%	0.8	1.2	1.05	1.06	1.01

Fuente: El autor

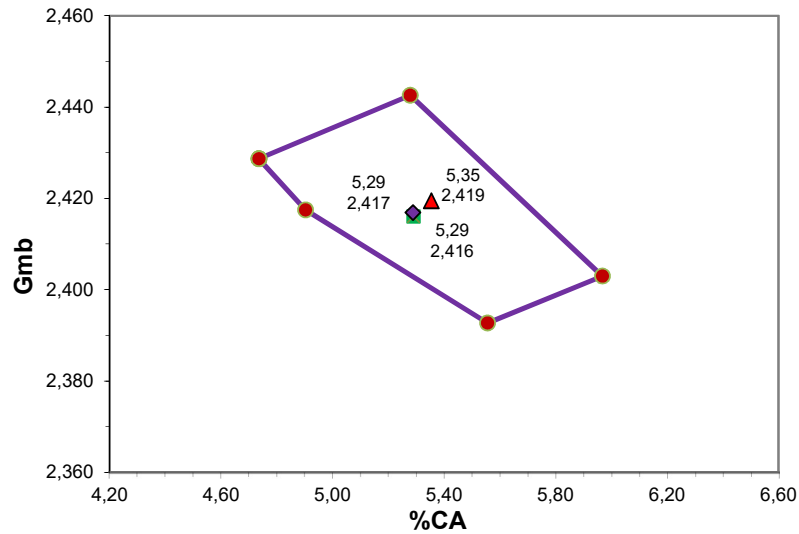
Elaborado por: Jhonny Pincay B.



**FIGURA 19: POLÍGONO DE VACÍOS Y DOSIFICACIONES MARSHALL, RAMCODES Y COMPROBACIÓN RAMCODES USANDO VA DE RAMCODES, MEZCLA M-CHI-1**

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.



**FIGURA 20: POLÍGONO DE VACÍOS Y DOSIFICACIONES MARSHALL, RAMCODES Y COMPROBACIÓN RAMCODES, USANDO VA DE RAMCODES, MEZCLA M-SOS-1**

**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

#### Simbología

- Polígono de vacíos
- ▲ Dosificación Marshall
- ◆ Dosificación RAMCODES
- Comprobación Dosificación RAMCODES
- Vértice polígono de vacío

Se encontró que para ambas muestras al evaluar Marshall con el porcentaje de vacíos obtenido mediante RAMCODES, todos los parámetros de vacíos, densidad, estabilidad y flujo prácticamente convergen a valores similares, muy cercanos a los promedios de los rangos establecidos, igualmente se aprecia en los polígonos de vacíos de las Figuras 19 y 20; esto indudablemente conlleva a un mejor diseño de la mezcla.

RAMCODES plantea que la construcción del polígono de vacíos es una herramienta poderosa para el control de mezclas asfálticas en dos aspectos fundamentales: el rango óptimo de asfalto y las características de compactación de la mezcla. En lo referente al rango óptimo, este se determina al superponer el polígono de vacíos con la curva %CA vs Gmb del diseño Marshall. La obtención del mismo se puede utilizar como sustento técnico del rango en el que puede variar el control de la dosificación

de una mezcla en planta. Actualmente la normativa MOP 2002, indica que esta no debe variar más allá de  $\pm 0.3\%$  del porcentaje óptimo obtenido.

En base a lo expresado anteriormente, se realizó la obtención del rango óptimo para las dos mezclas analizadas (Figuras 21 y 22) y se procedió a comparar los valores con el rango que establece la normativa antes indicada y evaluar sus resultados partiendo del porcentaje óptimo de asfalto obtenido por Marshall para un 4% de vacíos. Los resultados se muestran en las Tablas 25 y 26 para las mezclas M-CHI-1 y M-SOS-1.

**TABLA 25. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE RANGOS ÓPTIMOS DE ASFALTOS, MEZCLA M-CHI-1**

Característica a mezcla	U	Especificación		Marshall	Rango MOP -0.30 +0.3%		Rango Marshall - Pol. Vacíos.	
		Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
% CA	%	-	-	5.26	4.96	5.56	4.85	5.30
Va	%	3	5%	4.00	4.63	3.46	4.89	3.92
VMA	%	14%	16%	14.92	14.91	15.07	14.94	14.93
VFA	%	65%	75%	74.35	69.23	<b>78.54</b>	67.12	74.96
Gmb	g/cm <sup>3</sup>	-	-	2.547	2.539	2.550	2.535	2.547
Estabilidad	Lbs	1800	-	3493	3405	3505	3354	3499
Flujo	(1/100")	8	14	12.90	11.99	13.88	11.67	13.03
Filler/Betún	%	0.8	1.2	<b>1.58</b>	<b>1.70</b>	<b>1.48</b>	<b>1.74</b>	<b>1.57</b>

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.

**TABLA 26: RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE RANGOS ÓPTIMOS DE ASFALTOS, MEZCLA M-SOS-1**

Característica a mezcla	U	Especificación		Marshall	Rango MOP -0.30 +0.3%		Rango Marshall - Pol. Vacíos.	
		Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
% CA	%	-	-	5.52	5.22	5.82	5.14	5.53
Va	%	3	5%	4.00	4.71	3.39	4.92	3.99
VMA	%	14%	16%	14.80	14.94	14.88	15.02	14.80
VFA	%	65%	75%	74.90	69.39	<b>79.18</b>	67.71	75.00

Gmb	g/cm <sup>3</sup>	-	-	2.425	2.413	2.430	2.409	2.425
Estabilidad	Lbs	1800	-	2643	2553	2696	2522	2645
Flujo	(1/100")	8	14	12.21	10.80	13.77	10.45	12.24
Filler/Betún	%	0.8	1.2	1.01	1.09	0.95	1.11	1.01

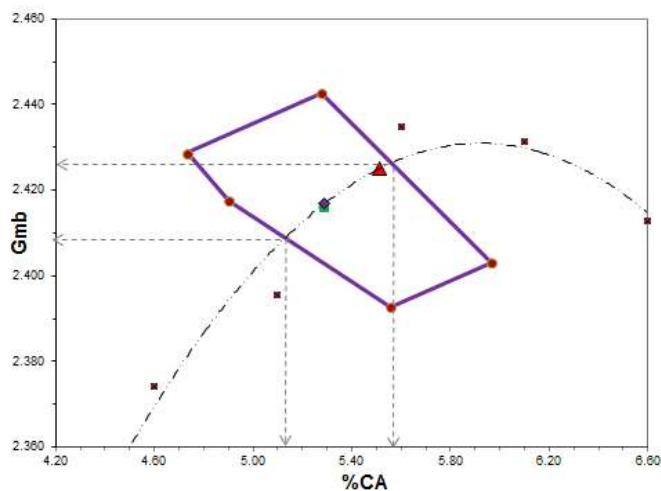
**Fuente:** El autor

**Elaborado por:** Jhonny Pincay B.

De los resultados del análisis de rango óptimo de asfalto de ambas mezclas se observa que, con el rango obtenido mediante los polígonos de vacíos, todos los requerimientos siempre se enmarcan dentro de los límites establecidos, no así para el rango +0.3% en el cual para ambas muestras el valor de VFA sale de especificación (valor en rojo Tablas 25 y 26) lo que puede conllevar a aceptar, en planta u obra, lotes de mezclas asfálticas con diseños inexactos.

Se observa también que el %CA<sub>óptimo</sub> obtenido por Marshall al incrementar el 0.30% de asfalto en ambas muestras, se supera el máximo valor del rango óptimo determinado por el polígono de vacíos y eso se traduce principalmente en que el VFA queda fuera de especificación; obviamente el par ordenado también queda fuera del polígono de vacíos.

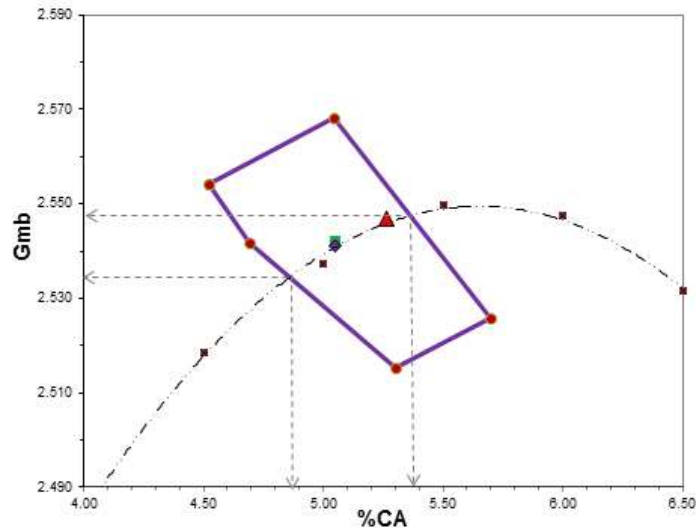
Adicionalmente se observa que las tres dosificaciones determinadas, por cada muestra analizada, se encuadran dentro del rango óptimo calculado mediante esta metodología, tal como se aprecia claramente en las Figuras 21 y 22. Indudablemente este criterio también se podría utilizar como un control de la efectividad del diseño.



## FIGURA 21: DETERMINACIÓN GRÁFICA DEL RANGO ÓPTIMO DE ASFALTO, M-CHI-1

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.



## FIGURA 22: DETERMINACIÓN GRÁFICA DEL RANGO ÓPTIMO DE ASFALTO, M-SOS-1

Fuente: El autor

Elaborado por: Jhonny Pincay B.

### Simbología

- . . . — . . . Gmb vs %CA de la mezcla asfáltica
- ← . . . — . . . Rango óptimo %CA y Gmb
- ▲ Dosificación Marshall
- ◆ Dosificación RAMCODES
- Comprobación Dosificación RAMCODES
- Vértice polígono de vacío

El diseño de mezclas asfálticas como todo diseño ingenieril debe ser tomado con el grado de responsabilidad e importancia necesaria, esto implica el conocimiento y cumplimiento de los procedimientos estandarizados, así como también un grado de experiencia sobre el comportamiento de cada uno de los componentes que lo conforman.

La presente tesis ha hecho eco a una nueva tecnología aplicable al diseño y control de mezclas asfálticas como es RAMCODES a través del polígono de vacíos. Los

resultados obtenidos fueron comparados con los obtenidos con el método estandarizado Marshall.

Se utilizó RAMCODES con la ayuda de la hoja electrónica desarrollada, con lo cual se simplificó el proceso de obtención de los polígonos de vacíos y del contenido óptimo de asfalto para las muestras ensayadas.

La comprobación física de los resultados analíticos de RAMCODES, mediante la elaboración de las 3 briquetas por muestra ensayada, tal como se esperaba los valores se asemejaron bastante bien.

Los equipos utilizados para obtener la dosificación RAMCODES son los mismos utilizados por Marshall, debido a la comprobación que se debe realizar siguiendo el procedimiento ASTM D 1559 – 89. La reducción de elaboración del número a 3 por cada mezcla ensayada, representa principalmente ahorro de tiempo en la obtención de resultados.

En las dos muestras analizadas se encontró que al adoptar como porcentaje óptimo de asfaltos el obtenido para un porcentaje de vacíos del 4%, partiendo de lo recomendado por la metodología Marshall, inicialmente se cumplen todas las propiedades volumétricas y mecánicas pero al adoptar el rango de dosificación de  $\pm 0.30\%$  (recomendado por el MOP 2002 para el control en planta y en obra), se encontró que a pesar de que se cumple lo que especifica la norma, al aplicar el rango recomendado ciertos parámetros de vacíos quedan fuera de especificación conforme lo muestra las Tablas 25 y 26, obviamente el par ordenado se ubica fuera del polígono de vacío establecido.

Se plantea como recomendación la utilización de RAMCODES ya sea como método independiente de diseño de mezclas asfálticas o como un complemento al diseño Marshall ya que esto permite desarrollar un mejor criterio para la elección del contenido óptimo de asfalto en la etapa de diseño.

Se recomienda la utilización del polígono de vacíos de la metodología RAMCODES, como alternativa técnica para obtener el rango de dosificación a utilizar en planta, el mismo que se obtiene al superponer con la curva Gmb-%CA del diseño Marshall con

el polígono de vacíos. Se encontró que para las muestras analizadas este rango favorece a que los parámetros principalmente volumétricos siempre se encuadren dentro de especificación.

Se debe poner en la práctica profesional diaria este tipo de herramientas nuevas. Con ese alcance se desarrolló esta tesis para darle una trascendencia estudiantil y profesional a la metodología RAMCODES a nivel país.

Otro procedimiento que se debe poner en práctica es el cálculo del Módulo Dinámico de mezclas asfálticas, un método que está al alcance es Witczak el cual depende principalmente de la granulometría y de los resultados del diseño de mezclas asfálticas ya sea por Marshall, RAMCODES o Suparpave, se requiere conocer adicionalmente la viscosidad del ligante, pero no requiere de más ensayos especiales. El utilizar estas herramientas se traducirá indudablemente en un mejor desempeño de las mezclas asfálticas.



## BIBLIOGRAFÍA

- Alamilla, H. D., Anguas, P. G., Mario, G., & Mendez, V. (2006). Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, (299).
- ASTM D1559\_89. (1989) Resistance to Plastic Flow of Bituminous mixtures Using Marshall Apparatus Materials. United States of America.
- Anguas, P. G. (2002). Ramcodes : Metodología racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados, (200).
- ASTM D2171. (1994). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer. United States of America.
- ASTM D2170. (1995). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens). United States of America.
- ASTM C131. (1996). Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. United States of America.
- ASTM D1188. (1996). Standard Test Method for Bulk Specific and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples. United States of America.
- ASTM D5. (1997). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. United States of America.
- ASTM D70. (1997). Standard Test Method for Density of Semi-Soild Bituminous materials (Pycnometer Method). United States of America.
- ASTM D142. (1997). Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates. United States of America.
- ASTM C88. (1999). Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. United States of America.
- ASTM D127. (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. United States of America.
- ASTM D2419. (2002). Standard Test Method for Sand Equivalent value of Soils and Fine Aggregate. United States of America.

- ASTM D8. (2002). Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements. United States of America.
- ASTM D977 (2003). Standard Test Method for Determining the Adherent Coating on Coarse Aggregates. United States of America.
- ASTM D2041. (2003). Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixture. United States of America.
- ASTM D5711 (2003). Standard Specification for Emulsified Asphalt. United States of America.
- ASTM D2726. (2004). Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. United States of America.
- ASTM D5821. (2004). Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. United States of America.
- ASTM D422 (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. United States of America.
- ASTM D2487 (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). United States of America.
- ASTM D3515. (2013). Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures. United States of America.
- ASTM D4318. (2014). Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. United States of America.
- ASTM D4791. (2015). Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. United States of America.
- Garnica, A. P., Flores, F. M., & Alamilla, D. H. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas, (267), 105.

- Garnica Amguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C. (2005). Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, (271), 62.
- Higuera Sandoval, C. H., Patarroyo Fonseca, A. M., & Vargas León, Y. F. (2013). Factibilidad de mezclas asfálticas de alto módulo con agregados del área de influencia de Tunja. High Module Asphalt Mix Feasibility, with Aggregates from the Influence Area of Tunja City., 22(34), 9–20.
- Instituto Mexicano Del Transporte. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Secretaría De Comunicaciones Y Transportes, (246).
- Instituto Chileno del Asfalto. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente, (292).
- Invias. (2007). INV E-717-07. Método para determinar la viscosidad de asfalto empleando el vicósímetro rotacional, 7–11. Colombia.
- Martínez Reguero, A. (2000). Aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución.
- MTOP. (2011). Construyendo obras viales en el Ecuador, 82.
- MOP-001-F. (2002). Especificaciones Generales Para la Construcción de Caminos y Puentes, 772. Ecuador.
- NTE-INEN 915. (1982). Materiales Bituminosos. Determinación de la Solubilidad en Tricloroetileno. Ecuador.
- NTE-INEN 808. (1986). Productos derivados del petróleo. Determinación de los Puntos de Inflamación y Combustión en Vaso Abierto Cleveland. Ecuador.
- NTE-INEN 2515. (2014). Productos derivados del petróleo. Cemento Asfáltico (clasificación por viscosidad) Requisitos. Ecuador.
- Salazar, N. G. (2011). Estadística aplicada, Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez-leal, F. J. (n.d.). Aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño. RAMCODES de Venezuela, C.A., 1, 20.

- Sánchez-leal, F. J., Anguas, P. G., Larreal, M., & Valdés, D. B. L. (2011). Polyvoids : Analytical Tool for Superpave HMA Design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1129–1137.
- Thenoux, G., & Carrillo, H. (2002). Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. *Provia*, 1–16.

**Ing. Jhonny Javier Pincay Bermello, MS.c**

Título: Ingeniero civil, Graduado en la Universidad de Guayaquil en el (2002-2008)

Magister en Ingeniería Vial, Universidad Técnica Particular de Loja

Facilitador de Cursos: AutoCAD Civil 3D en varias instituciones.

Docente de Carreteras II y Diseño Geométrico Vial, Carrera de ingeniería civil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil.

Especialista en Diseño Vial, Gobierno Autónomo Descentralizado de Guayaquil.

Consultor Vial.

**Ing. Alonso Rodrigo Zuñiga Suarez, MS.c**

Título: Ingeniero Civil - Universidad Técnica Particular de Loja

Magister en Ingeniería Civil Mención en Ingeniería Vial – Universidad de Piura, Perú.

Diploma Superior en Gestión y Evaluación de Proyectos – Instituto de Altos Estudios Nacionales

Director de la Maestría en Ingeniería Vial de la Universidad Técnica Particular de Loja

Docente de varias asignaturas en la carrera de ingeniería Civil - de la Universidad Técnica Particular de Loja.

Director de Tesis de Pregrado y Posgrado - Universidad Técnica Particular de Loja

Autor de varios artículos y libros publicados en revistas indexadas

**Ing. Francisco Javier Córdova Rizo, MS.c**

Título: Ingeniero Civil - Universidad de Guayaquil

Magister en Docencia y Gerencia en Educación Superior – Unidad de Posgrado - Universidad de Guayaquil.

Magister en Geotecnia Universidad de Guayaquil - Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas – Universidad de Guayaquil.

Vicedecano de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas - Universidad de Guayaquil

Docente en las asignaturas de Carreteras I y Diseño Vial – ingeniería Civil - Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas – Universidad de Guayaquil

Consultor Vial.

ISBN: 978-9942-770-70-7



comp<sup>AS</sup>