

**RELACIONES VOLUMÉTRICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE,
CORRELACIONADAS CON RIGIDEZ Y RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE
(Primera Parte)**

**INGENIERO HUGO COSME
ESTUDIANTE EDWIN CHAVES**

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
POPAYÁN, MAYO DE 2006**

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
SÍNTESIS.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. CONCEPTUALIZACIÓN DE LAS RELACIONES VOLUMÉTRICAS.....	4
3. CONCEPTO DE LA CARTA VOLUMÉTRICA UNIVERSAL.....	13
4. ESPECIFICACIONES DE LAS MAC.....	16
5. TRABAJO DE LABORATORIO.....	25
6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MARSHALL.....	31
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
8. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	52

AGRADECIMIENTOS

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 1 GRAVEDADES ESPECÍFICAS DE LOS MATERIALES
CONSTITUYENTES DE LAS MEZCLAS

ANEXO 2 DISEÑOS MARSHALL PARA LAS ENERGÍAS DE COMPACTACIÓN DE
35, 50 Y 75 GOLPES POR CARA

ANEXO 3 SOLUCIÓN DE LA FASE VOLUMÉTRICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS

ANEXO 4 CORRELACIONES DE LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS CON LA ESTABILIDAD MARSHALL

ANEXO 5 PRESENTACIÓN DEL MODELO HIRSCH PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS DINÁMICOS $|E^*|$ Y $|G^*|$, DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

ANEXO 6 GRAVEDADES ESPECÍFICAS MÁXIMAS MEDIDAS, DE LAS MEZCLAS COMPACTADAS

LISTA DE CUADROS.

	Pag.
Cuadro 4.1. Diferentes especificaciones alrededor del mundo.....	24
Cuadro 5.1. Características del agregado usado vs especificaciones INV.....	26
Cuadro 5.2. Características del cemento asfáltico usado vs especificaciones INV.....	27
Cuadro 5.3. Temperaturas de mezcla y compactación en el laboratorio.....	28
Cuadro 5.4. Granulometría usada vs especificaciones INV-98 e INV-02.....	28
Cuadro 5.5. Designación y composición de las probetas.....	28
Cuadro 5.6. Relaciones volumétricas de las briquetas de 10 golpes por cara.....	29
Cuadro 5.7. Relaciones volumétricas de las briquetas de 35 golpes por cara.....	29
Cuadro 5.8. Relaciones volumétricas de las briquetas de 50 golpes por cara.....	30
Cuadro 5.9. Relaciones volumétricas de las briquetas de 75 golpes por cara.....	30
Cuadro 5.10. Relaciones volumétricas de las briquetas de 400 golpes por cara.....	30
Cuadro 6.1. Resultados de gravedad específica bulk, estabilidad y flujo de las 105 probetas elaboradas.....	33
Cuadro 6.2. Promedio de los resultados de gravedad específica bulk, estabilidad y flujo para cada terna de briquetas de igual composición.....	34
Cuadro 6.3. Resultados de gravedad específica máxima medida para las mezclas de cada porcentaje de cemento asfáltico, y el promedio de los dos ensayos.....	35
Cuadro 6.4. Promedio de las relaciones volumétricas para cada terna de briquetas de igual composición.....	36
Cuadro 7.1. Especificaciones Colombianas de diseño, Tráfico medio y ½'' de TMNA.....	46
Cuadro 7.2. Estabilidades calculadas a partir de las correlaciones encontradas.....	46
Cuadro 7.3. Especificaciones TAI-94, mezcla densa, tráfico medio y ½'' de TMNA.....	48
Cuadro 7.4. Especificaciones PANK-00, para AC.....	48

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada.....	5
Figura 2.2. Representación esquemática de V_{be} , V_{ba} y V_a	6
Figura 2.3. Representación esquemática de los VMA.....	6
Figura 2.4. Ilustración de la composición del volumen de una partícula de agregado mineral.....	8
Figura 2.5. Ilustración del volumen efectivo de una partícula de agregado mineral.....	9
Figura 3.1. Carta Volumétrica Universal (CVU).....	14
Figura 4.1. Especificaciones volumétricas Colombianas, año 1998.....	18
Figura 4.2. Especificaciones volumétricas Norteamericanas TAI, año 1962.....	18
Figura 4.3. Especificaciones volumétricas Norteamericanas TAI, año 1994.....	19
Figura 4.4. Especificaciones volumétricas Colombianas, año 2002.....	19
Figura 4.5. Criterio para escogencia del VMA propuesto por Mcleod.....	20
Figura 4.6. Especificaciones volumétricas Norteamericanas SUPERPAVE [®] , año 2005.....	21
Figura 4.7. Especificaciones volumétricas Finlandesas PANK, año 2000.....	21
Figura 4.8. Especificaciones Norteamericanas (SUPERPAVE [®] , TAI) y Finlandesas (PANK).....	22
Figura 4.9. Diferentes especificaciones alrededor del mundo.....	23
Figura 5.1. Gráfica para la obtención de las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio.....	27
Figura 6.1. Curvas típicas en la CVU, trayectorias de compactación y líneas de igual energía de compactación.....	32
Figura 6.2. Valores promedio de estabilidad para cada terna de briquetas de igual composición.....	37
Figura 7.1. Estabilidad vs Vacíos llenos con aire (V_a) para diferentes energías de compactación.....	40
Figura 7.2. Estabilidad vs Volumen de asfalto efectivo (V_{be}) para diferentes energías de compactación.....	40

Figura 7.3. Estabilidad vs Vacíos llenos con asfalto (VFA) para diferentes energías de compactación.....	41
Figura 7.4. Estabilidad vs Vacíos en los agregados minerales (VMA) para diferentes energías de compactación.....	42
Figura 7.5. Estabilidad vs Vacíos llenos con aire (Va) para mezclas con diferentes contenidos de cemento asfáltico.....	42
Figura 7.6. Estabilidad vs Volumen de asfalto efectivo (Vbe) para mezclas con diferentes contenidos de cemento asfáltico.....	43
Figura 7.7. Estabilidad vs Vacíos llenos con asfalto (VFA) para mezclas con diferentes contenidos de cemento asfáltico.....	44
Figura 7.8. Estabilidad vs Vacíos en los agregados minerales (VMA) para mezclas con diferentes contenidos de cemento asfáltico.....	45
Figura 7.9. Estabilidad vs Vacíos en los agregados minerales para las 105 briquetas elaboradas.....	45
Figura 7.10. Valores medidos de estabilidad y especificaciones INV-2002.....	47
Figura 7.11. Valores calculados de estabilidad a partir de las correlaciones encontradas y especificaciones INV-2002.....	47
Figura 7.12. Valores de E^* calculados con el modelo Hirsch y especificaciones PANK 2000 y TAI 1994.....	49
Figura 7.13. Valores de G^* calculados con el modelo Hirsch y especificaciones PANK 2000 y TAI 1994.....	49
Figura 7.14. Rigidez y esfuerzo vs. varios mecanismos de falla de las MAC.....	50
Figura 7.15. Gráfica para obtener la característica mecánica mínima para el sitio “n”, en función de los diferentes niveles de tráfico.....	50
Figura 7.16. Gráfica final para el diseño en diferentes climas y tráfico.....	51

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta investigación, agradecen a los Profesores del Departamento de Geotecnia, por haber facilitado, con su labor académica, la disponibilidad de tiempo de parte del Director, para poder llevar a cabo esta fase de la investigación, al Ingeniero Rodrigo Castrillón gerente de la Empresa Ecocivil Ltda., por brindar el apoyo para la adquisición de los materiales y al Auxiliar de Laboratorio, Gabriel Lasso, por su esfuerzo en la realización de los ensayos necesarios para la investigación .

**RELACIONES VOLUMÉTRICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE,
CORRELACIONADAS CON RIGIDEZ Y RESISTENCIA AL ESFUERZO
CORTANTE. (Primera Parte)**

Hugo Cosme¹, Edwin Chaves²

SÍNTESIS

Históricamente las mezclas asfálticas en caliente (MAC) se han trabajado en Colombia destacando ante todo sus parámetros gravimétricos. Sin embargo existe actualmente una tendencia internacional que busca relevar los parámetros volumétricos de las MAC, (V_a , V_{be} , VMA, VFA). Esto motiva la presente investigación que busca difundir en la nación, la gran importancia que tienen las relaciones volumétricas de las mezclas asfálticas y su incidencia en el comportamiento real. Por ello se lleva a cabo una investigación bibliográfica sobre el estado del arte de este tema, se introduce por primera vez en el país, la Carta Volumétrica Universal (CVU), se analizan tres importantes especificaciones sobre MAC, se elabora un plan de ensayos de laboratorio, fabricando 105 briquetas con la metodología Marshall, se analizan dentro del marco de la CVU los resultados obtenidos, y se alcanzan importantes conclusiones sobre correlaciones de valores de estabilidad, con parámetros volumétricos. Finalmente, se vislumbra el derrotero de futuras investigaciones sobre este tema, que buscarán relacionar módulos de rigidez y parámetros de resistencia al esfuerzo cortante, con relaciones volumétricas.

1. INTRODUCCIÓN.

En el Congreso de la AAPT (Association of Asphalt Paving Technologists) llevado a cabo en el año 2003 en la ciudad de Baton Rouge, Louisiana, llamó la atención a varios investigadores de la Asociación, el artículo realizado por la Profesora Terhi K. Pellinen de la Universidad de Purdue (Indiana), en donde se introduce un nuevo criterio basado en relaciones volumétricas, y

¹ Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca

² Estudiante de Pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca



relacionado con el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Por lo novedoso de dicho artículo y de cara al futuro de los métodos de diseño de mezclas, que actualmente están experimentando un período de cambios importantes, se presenta esta investigación, a los ingenieros dedicados a los pavimentos asfálticos en Colombia.

En el país se ha utilizado y se sigue utilizando como método de diseño de mezclas asfálticas en caliente, el método Marshall; sin embargo, a nivel internacional y especialmente en Norteamérica, se está imponiendo desde hace aproximadamente diez años el método SUPERPAVE[®] y que ha sido implementado hasta el momento, sólo en el Nivel Uno es decir lo que tiene que ver con el Diseño Volumétrico. Esto hace pensar que en algunos años, Colombia empezará a utilizar el método SUPERPAVE[®] y en consecuencia se hace necesario tratar estos temas en los diferentes escenarios nacionales.

En el método SUPERPAVE[®] hay tres niveles de diseño, de los cuales el nivel uno (de diseño volumétrico), es el que se utiliza para proyectos de rutina, y es el que actualmente está en uso; sin embargo algunas mezclas diseñadas con este método han presentado pobres comportamientos. Debido a que el método SUPERPAVE[®] no se ha podido implementar sino solamente en su primer nivel, se hace necesario comprobar mediante ensayos acelerados de laboratorio y monitoreos en el campo, el comportamiento de estas mezclas asfálticas, para lo cual se necesita dar una fundamentación teórica a este tipo de diseño volumétrico, orientándose especialmente hacia el comportamiento mecánico de la mezcla; es así como se escogen para la evaluación de estas características, mediciones de estabilidad, módulo dinámico E^* y los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante ϕ y C (ángulo de fricción interna y cohesión respectivamente), dividiendo la investigación en dos partes, la primera de las cuales se está presentando en este texto y mide exclusivamente valores de estabilidad Marshall, y una segunda etapa donde se medirán E^* , ϕ y C .

La investigación incluye una búsqueda, selección, impresión, lectura y análisis de varios artículos que empiezan a tocar este tema en el panorama internacional. Se presenta una metodología novedosa para el país, que fue propuesta por el Dr. Brian Coree en el año 1999,



por medio de la cual es posible manejar simultáneamente cuatro de las relaciones volumétricas de las mezclas asfálticas en caliente (Vacíos llenos con aire V_a , vacíos en los agregados minerales VMA, volumen de asfalto efectivo V_{be} y vacíos llenos con asfalto VFA), mediante una herramienta que se denomina Carta Volumétrica Universal (CVU). El artículo explica la manera de construirla, y esta gráfica es la base para la presentación de algunas especificaciones consideradas como ilustrativas para el tema de la investigación y la presentación de los resultados obtenidos. Sobre la CVU, se ilustran y se comparan dos de las especificaciones de diseño de mezclas asfálticas en caliente, más conocidas en América como los son las de The Asphalt Institute y las Superpave, con una especificación que siguen actualmente algunos países nórdicos de la Europa Central, llamada ASTO PANK.

Para visualizar el efecto de los cambios volumétricos en las mezclas, se procedió a elaborar en el Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos de la Universidad del Cauca, 105 probetas con el método Marshall, haciendo 35 ternas de briquetas con igual energía de compactación y contenido de cemento asfáltico; en cada caso se realizaron los correspondientes ensayos que permitieran calcular las relaciones volumétricas, y se midieron las estabilidades Marshall como parámetro de resistencia mecánica. Estos resultados se dibujan en el marco de la CVU en donde se pueden anticipar diferencias en el comportamiento mecánico, en función de las diferentes relaciones volumétricas.

Finalmente, además de resaltar las bondades de la utilización de la CVU en el manejo de las mezclas asfálticas, se establecen criterios que tratan de explicar la razón teórica por la cual, especificaciones volumétricas diferentes para mezclas asfálticas, pueden producir comportamientos adecuados en las mezclas, cuando se tiene en cuenta el efecto del clima y del tráfico. Lo anterior, bajo el marco de rigidez y resistencia al esfuerzo cortante, frente a los tres tipos de fallas típicos en las mezclas asfálticas, como son: ahuellamiento, fatiga y agrietamiento por baja temperatura. También se anticipa hacia dónde se dirigirán este tipo de investigaciones, cuando se logren encontrar los modelos matemáticos que permitan relacionar cantidad de tráfico, temperatura de diseño, rigidez o parámetros de resistencia al esfuerzo cortante – los que a su vez estarán correlacionados con los parámetros volumétricos –, para controlar los tres tipos usuales de fallas de las mezclas asfálticas en caliente.

2. CONCEPTUALIZACIÓN DE LAS RELACIONES VOLUMÉTRICAS.

Al referirse a las cantidades de los materiales que componen las mezclas asfálticas en caliente, existen dos métodos para considerarlas: el gravimétrico y el volumétrico; lo cual significa que en el primer caso se trabaja con base en los pesos de los materiales componentes de las MAC y en el segundo caso con base en sus volúmenes.

Tradicionalmente se ha dado más importancia al manejo gravimétrico que al método volumétrico, y es así como en el momento de fabricar las MAC, se trabaja por pesos y no por volúmenes. Igualmente, durante su construcción se hacen controles más referidos al peso unitario de la mezcla asfáltica compactada y solamente cuando se trata de diseñar una MAC, se miden algunas relaciones volumétricas para compararlas con las respectivas especificaciones.

En los últimos diez años se han empezado a conocer referencias bibliográficas [2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 15, 20, 21, 22, 28, 29, 31] en donde se empieza a destacar la importancia que tienen las relaciones volumétricas durante el diseño, elaboración, colocación y vida de servicio de las MAC. Esta importancia fué relevada por el método de diseño de mezclas denominado SUPERPAVE[®] (Superior PERFORMANCE PAVement asphalt), en el nivel que actualmente está implementado.

Debido a que el tema central de la presente investigación son las relaciones volumétricas, a continuación se explicarán con algún detalle los conceptos básicos y la forma de calcular los parámetros volumétricos ilustrados en la figura 2.1, así como otros conceptos en los que se apoyan dichos cálculos.

Definiciones de relaciones volumétricas:

- Vacíos llenos con aire (V_a): es el volumen total de las pequeñas bolsas de aire (V_v) que quedan entre las partículas de agregado cubiertas con cemento asfáltico en una mezcla compactada, expresado como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada (Figura 2.2).

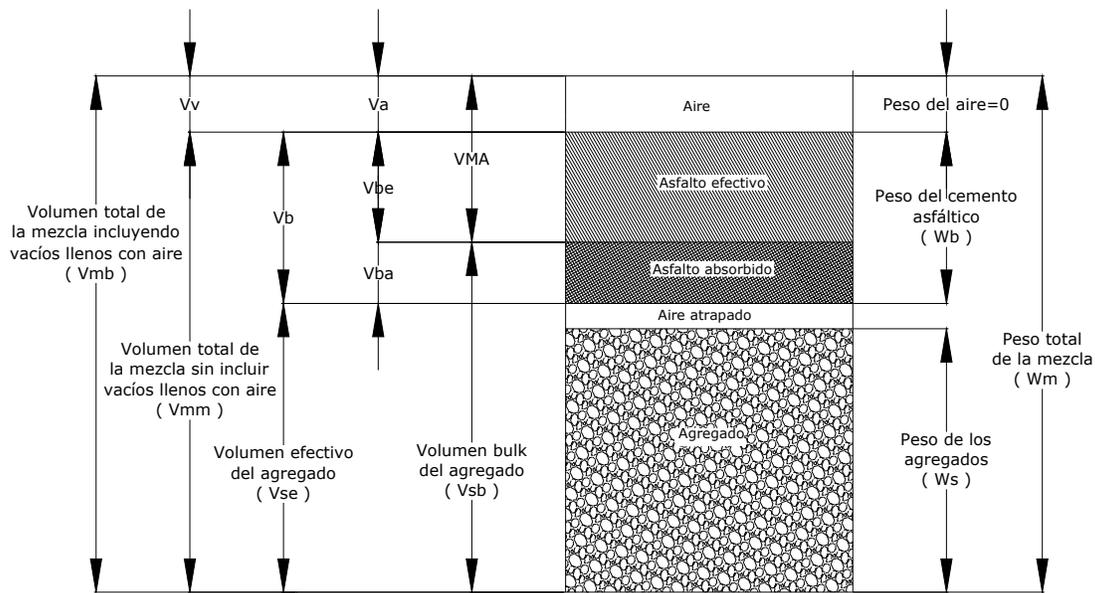


Figura 2.1. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada.

Actualmente se relaciona este parámetro volumétrico con una alta probabilidad de ocurrencia de un mecanismo de falla de las mezclas denominada ahuellamiento, cuando su valor cae por debajo de aproximadamente 3%, [2, 3, 4], y con problemas de envejecimiento de la mezcla por excesiva permeabilidad, cuando sus valores exceden aproximadamente de 8%, [2].

- Volumen de asfalto efectivo (V_{be}): es el volumen de cemento asfáltico que no es absorbido dentro de la estructura porosa externa del agregado en una mezcla asfáltica compactada, expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada (Figura 2.2). Por lo tanto, este volumen se encarga del recubrimiento del agregado mineral y de los espacios entre partículas que no están ocupados por el aire. Este parámetro influye en la durabilidad de una mezcla, [7], teniendo como referencia un valor mínimo para garantizar una cantidad suficiente de cemento asfáltico que recubra el agregado.

Vacíos en los agregados minerales (VMA): es el volumen de espacio vacío entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada; incluye los vacíos llenos con

aire y el volumen de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada (Figura 2.3).

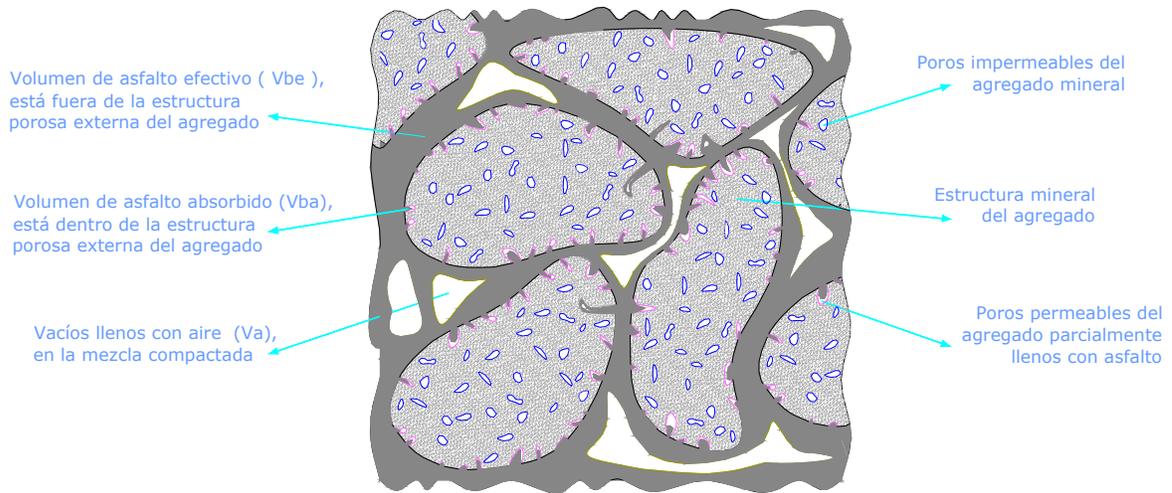


Figura 2.2. Representación esquemática de V_{be} , V_{ba} y V_a .

Vacíos en los agregados minerales (VMA)
 $VMA = V_{be} + V_a = V_{mb} - V_{sb}$

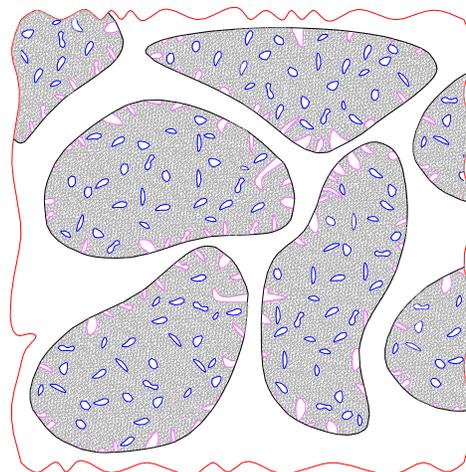


Figura 2.3. Representación esquemática de los VMA.



Históricamente, el VMA ha sido el parámetro que más se ha tenido en cuenta en el diseño de las MAC, [10], controlándose un valor mínimo que garantice volúmenes suficientes de vacíos y de asfalto efectivo [40, 41], tales que permitan manejar adecuadamente los posibles efectos nocivos derivados de no controlar bien estas características volumétricas, y un valor máximo para evitar altos contenidos de cemento asfáltico y por lo tanto incurrir en una mezcla costosa o en la exudación de la misma, que se presentará cuando la temperatura de la mezcla se incremente y el asfalto se expanda [41].

- Vacíos llenos con asfalto (VFA): es la porción de los vacíos en los agregados minerales, que está llena con cemento asfáltico, expresada como un porcentaje de los VMA. Como se explicará más adelante, las anteriores relaciones volumétricas (V_a , V_{be} , VMA, VFA) están interrelacionadas y por lo tanto, al controlar los valores límites de algunas, se está controlando la variación de las otras. Por ejemplo, el VFA dentro de la mezcla, proporciona un valor límite superior para VMA, controlando así máximos niveles de contenido de cemento asfáltico en la mezcla y además ayudando a evitar mezclas que sean susceptibles de ahuellamiento en tráficos altos [41].
- Volumen de asfalto absorbido (V_{ba}): es el volumen de cemento asfáltico que es absorbido dentro de la estructura porosa externa del agregado, expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla (Figura 2.2). El V_{ba} no es un indicador del comportamiento de las mezclas, sin embargo, valores excesivos (no hay un límite especificado, pero sí la experiencia del diseñador en lo que respecta a la escogencia de los materiales de la mezcla), pueden resultar en mezclas antieconómicas por la cantidad adicional de cemento asfáltico que se necesitaría para satisfacer los requerimientos de la estructura porosa externa del agregado y lograr un contenido de asfalto efectivo que cumpla con los requerimientos mínimos especificados.
- Volumen de asfalto (V_b): es el volumen de cemento asfáltico total, que comprende el volumen de asfalto absorbido y el volumen de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla (Figura 2.2). Este valor oscila normalmente entre 5 y 30% del volumen total, en mezclas densas, según la ASTM [38].



Definiciones de gravedad específica:

La masa de un objeto dividida por su volumen es su densidad, y la densidad de un objeto dividida por la densidad del agua es su gravedad específica. La densidad del agua a temperaturas cercanas a los 25°C, es aproximadamente 1g/cm³ y por lo tanto la gravedad específica de un objeto a temperaturas cercanas a ella, es la masa del objeto dividida por su volumen. En conclusión, conociendo la gravedad específica de un objeto podemos calcular su masa, después de medir su volumen o podemos calcular su volumen, luego de medir su masa.

- Gravedad específica del agregado: como se puede observar en la Figura 2.4, el volumen de las partículas del agregado mineral tiene tres componentes: el volumen que aporta la parte sólida del agregado, el volumen que aportan los poros internos (impermeables), y el volumen que aportan los poros externos (permeables); mientras que la masa sólo la aporta la parte sólida (W_s) o estructura mineral del agregado. Teniendo en cuenta lo anterior podemos extraer los conceptos de volumen bulk del agregado (V_{sb}) y volumen aparente del agregado (V_{sa}). El primero no es otra cosa que el volumen total aportado por los vacíos impermeables, los vacíos permeables y el volumen de la estructura mineral del agregado, y el volumen aparente, es el resultado de la suma de los volúmenes de los vacíos impermeables y de la masa mineral del agregado.

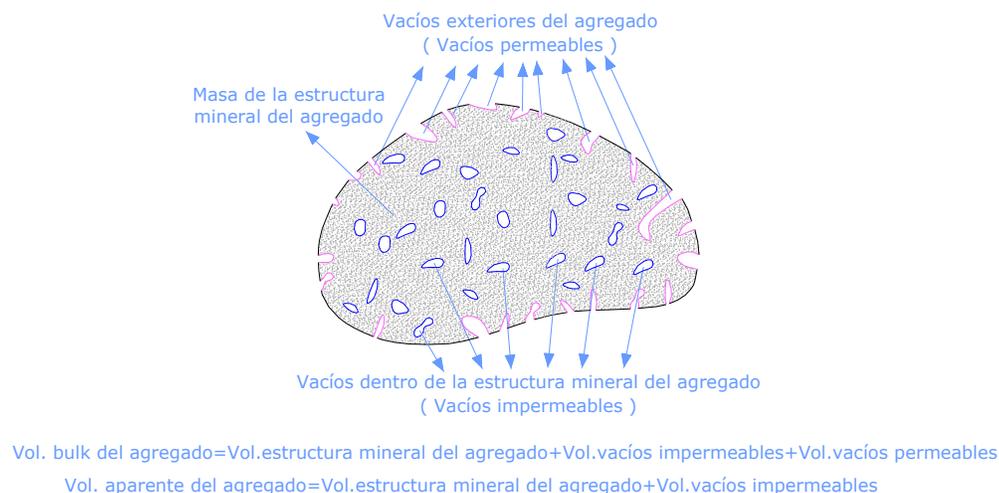
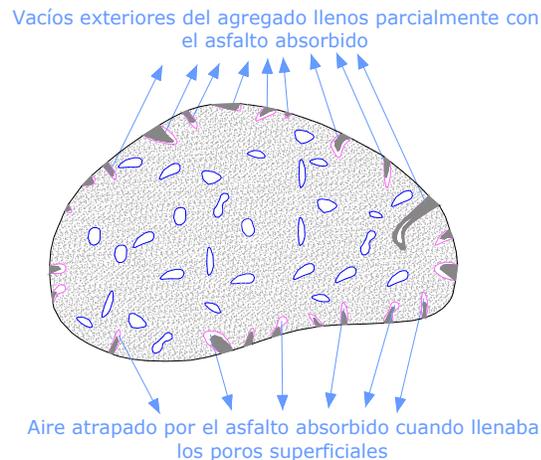


Figura 2.4. Ilustración de la composición del volumen de una partícula de agregado mineral.



Cuando se realiza la mezcla de los agregados con el asfalto, parte de éste entra en la estructura porosa externa del agregado, pero dada la naturaleza altamente viscosa del cemento asfáltico, este no llena totalmente los poros, dejando aire atrapado en los vacíos permeables (Figura 2.5). Así, al sumar los volúmenes aportados por la parte sólida del agregado mineral, por los vacíos impermeables y por el aire atrapado, obtenemos como resultado el volumen efectivo del agregado (V_{se}).



Vol. efectivo del agregado=Vol.estructura mineral del agregado+Vol.vacíos impermeables+Vol.aire atrapado

Vol. bulk del agregado=Vol.estructura mineral del agregado+Vol.vacíos impermeables+Vol.aire atrapado+Vol.asfalto absorbido

Figura 2.5. Ilustración del volumen efectivo de una partícula de agregado mineral.

De lo anterior se puede deducir que hay tres conceptos relacionados con la gravedad específica de los agregados a saber:

Gravedad específica bulk del agregado (G_{sb}):

$$G_{sb} = \frac{W_s}{V_{sb}} / 1g/cm^3 @ 25^\circ C$$

Gravedad específica aparente del agregado (G_{sa}):

$$G_{sa} = \frac{W_s}{V_{sa}} / 1g/cm^3 @ 25^\circ C$$



Gravedad específica efectiva del agregado (Gse):

$$Gse = \frac{Ws}{Vse} / 1g/cm^3 @ 25^\circ C$$

- Gravedades específicas de la mezcla: dos gravedades específicas de las MAC, medibles mediante procesos de laboratorio, son importantes para la determinación de las proporciones volumétricas: la gravedad específica máxima teórica (Gmm) y la gravedad específica bulk (Gmb).

La gravedad específica máxima teórica Gmm, es la masa de asfalto y agregado dividida por el volumen de la mezcla, cuando dicho volumen no tiene vacíos llenos con aire (Figura 2.1, Vmm).

La gravedad específica bulk Gmb, es la masa de asfalto y agregado dividida por el volumen de la mezcla, cuando dicho volumen incluye los vacíos llenos con aire (Figura 2.1, Vmb).

Una vez medidas en el laboratorio las gravedades específicas de la mezcla (Gmb y Gmm), la gravedades específicas bulk (Gsb) de los diferentes tamaños que conforman el agregado para la mezcla y la gravedad específica del cemento asfáltico (Gb), se pueden calcular las relaciones volumétricas, así:

$$Va = \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm} \right) * 100$$

$$Vbe = \frac{Pbe * Gmb}{Gb}$$

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



$$VFA = \frac{Vbe}{VMA} * 100$$

$$Vba = \frac{Pba * Ps}{100} * \frac{Gmb}{Gb}$$

$$Vb = Vba + Vbe$$

Donde:

Gmb: gravedad específica bulk de la mezcla.

Gmm: gravedad específica máxima medida de la mezcla.

Gb: gravedad específica del cemento asfáltico.

Gsb: gravedad específica bulk promedio de los agregados.

Pbe: contenido de asfalto efectivo, porcentaje por peso total de la mezcla.¹

Pba: contenido de asfalto absorbido, porcentaje por peso total de agregado.¹

Ps: contenido de agregado, porcentaje por peso total de la mezcla.

De todas las relaciones volumétricas, se observa una tendencia a resaltar los Va, los VMA, el Vbe y los VFA, porque a través de ellos se controla la composición total de la mezcla y por lo tanto, de manera empírica también se controlan los problemas asociados a la carencia o exceso de estos parámetros.

La importancia que está surgiendo en el actual momento, en la composición volumétrica de una MAC, radica en que tanto su rigidez, como su resistencia al esfuerzo cortante, que en últimas representan las características mecánicas fundamentales y verdaderas de las mezclas y que probablemente sean los mejores indicadores de su comportamiento a través de su vida de servicio, dependen directamente de los valores de las relaciones volumétricas que tenga la MAC

¹ La explicación para obtener estos parámetros se encuentra en el Anexo # 3.



durante sus diferentes fases (diseño, elaboración, colocación y vida de servicio), como se percibe en la literatura internacional [5, 6, 8, 28, 29, 30, 31].

3. CONCEPTO DE LA CARTA VOLUMÉTRICA UNIVERSAL.

Gracias al trabajo del Dr. Brian Coree, [11], desarrollado en Iowa State University, es posible visualizar las cuatro relaciones volumétricas más importantes que se utilizan en el análisis de las MAC, en una carta que se ha denominado Carta Volumétrica Universal (CVU), [11], o Ventana de Diseño Volumétrico, (VDV), [28, 31]. En ella, el eje de las abscisas indica el V_{be} , el eje de las ordenadas los V_a , en las líneas diagonales paralelas entre sí, los VMA y las líneas diagonales radiadas desde el origen, los VFA. Es importante recordar que las relaciones volumétricas están todas interrelacionadas y que únicamente son necesarios dos valores para resolver los otros. Para construir la CVU, basta tener presente que en el plano cartesiano, el eje de las “x” es denominado V_{be} , que el eje de las “y” es designado como V_a , que las líneas de igual VMA deben satisfacer la condición que $VMA = V_{be} + V_a$, y que además las líneas de igual VFA son una consecuencia de la siguiente interrelación $VFA = \left(\frac{V_{be}}{V_{be} + V_a} \right) * 100$, la cual haciendo un pequeño trabajo algebraico se convierte en $V_a = \left(\frac{100 - VFA}{VFA} \right) * V_{be}$, que a su vez es la ecuación de una línea recta con intercepto en el punto (0,0) y con pendiente $(100 - VFA) \div VFA$. Como ejemplo que para obtener la línea de VMA igual a 15%, hay varias opciones: un V_{be} de 12%, con un V_a de 3%, o un V_{be} de 7%, con un V_a de 8%. Por lo anterior una manera rápida para construir una línea VMA es conectar iguales valores en los ejes designados como V_{be} y V_a . De otra manera, para construir una línea de igual VFA, se le asigna un valor a este parámetro, con lo cual se halla la pendiente de la recta, se le da un valor a una variable, despejando la otra y se traza la línea entre el punto (0,0) y el punto hallado anteriormente. En la Figura 3.1 se ilustra el concepto de esta ventana. Los más importantes usos de la VDV encontrados e implementados en esta investigación son:

- Cualquier mezcla puede ser representada en la CVU por tan solo un punto. Esto permite comparar fácilmente una mezcla con otra.

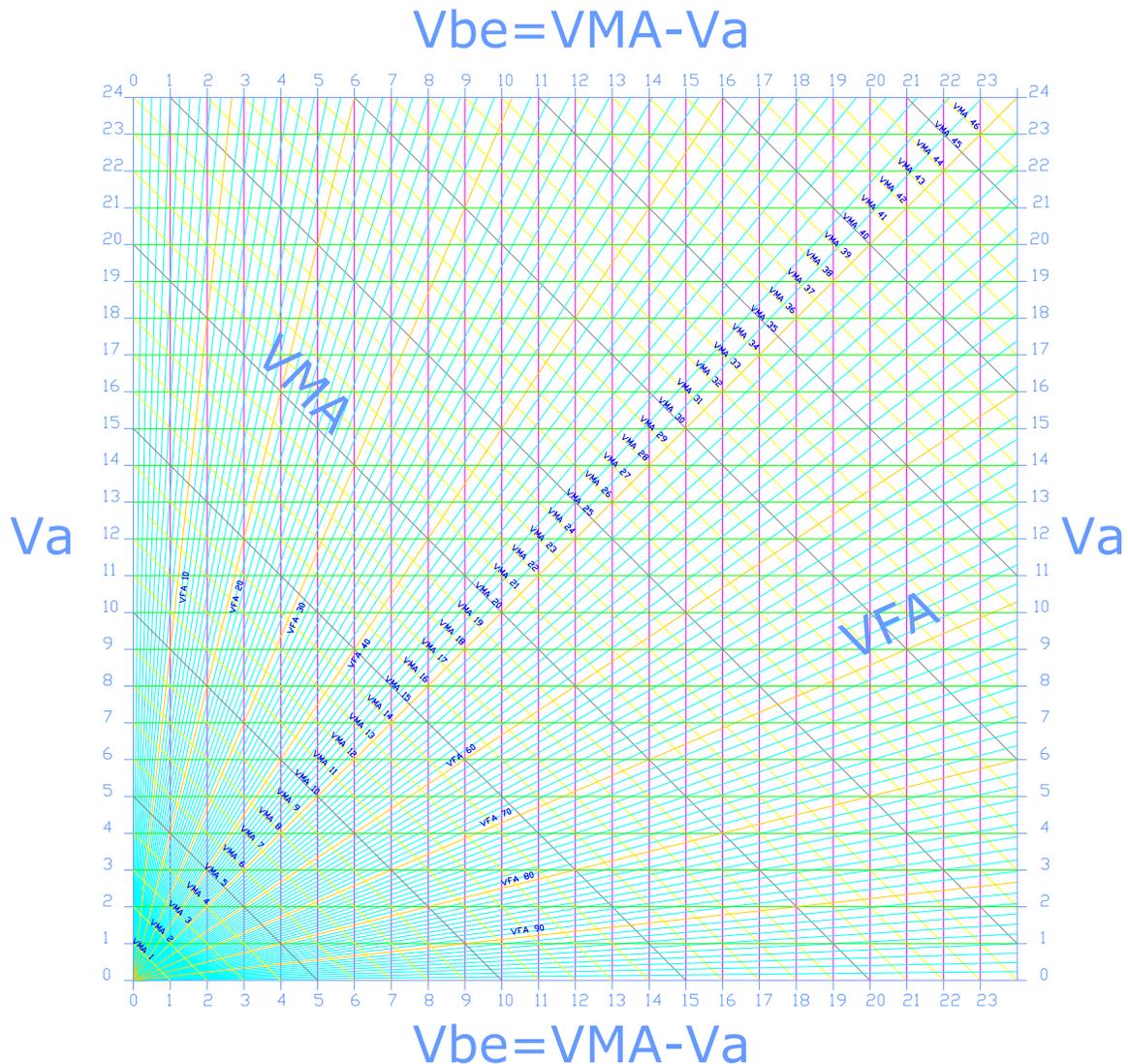


Figura 3.1. Carta Volumétrica Universal (CVU).

- Las especificaciones volumétricas (V_{be} , V_a , VMA , VFA) para MAC, pueden ser dispuestas en la CVU. Esto permite comparar distintas especificaciones existentes.
- Determinar trayectorias de comportamiento de una mezcla, al variar sus relaciones volumétricas en las etapas de diseño, construcción y vida de servicio.



- Delimitar zonas con pavimentos de diferentes comportamientos en el campo y comparar su composición volumétrica.

- Observar la variación de algunas características mecánicas de las mezclas que están relacionadas con el aspecto volumétrico de estas.

En Colombia, las CVU no son de uso común. Uno de los propósitos de esta investigación es fomentar el uso masivo de esta novedosa herramienta, que se utiliza actualmente de una forma más generalizada en los Estados Unidos.

4. ESPECIFICACIONES DE LAS MAC.

Para empezar este tema sobre las especificaciones de diseño de las MAC, se transcribe la clasificación de los diferentes métodos del diseño de mezclas, que la Profesora Theri K. Pellinen, de la Universidad de Purdue, hace en su tesis doctoral:

“Los métodos de diseño de MAC han sido divididos en seis categorías por Luminari y Findato¹ (1998): de receta, empíricos, analíticos, volumétricos, relacionados con el comportamiento y basados en el comportamiento.

El método de la receta es basado sobre la experiencia de mezclas estándar de composición conocida, las cuales durante largos períodos de tiempo y bajo condiciones dadas de sitio, tráfico y clima, se han comportado satisfactoriamente. Especímenes para evaluación no son preparados en este método. En los métodos de diseño de mezclas basados sobre pruebas empíricas, la selección del contenido de diseño de bitumen está basada sobre la optimización de varias variables, las cuales tienen límites apoyados en una anterior experiencia. En el método analítico, la composición de la mezcla es determinada con cálculos analíticos, sin someter la mezcla a evaluación.

En el método de diseño de mezclas volumétrico, la selección del contenido de bitumen de diseño y la gradación del agregado, es obtenida por análisis del volumen proporcional de vacíos, bitumen y agregado. Las mezclas son compactadas en el laboratorio usando un procedimiento que asume producir la compactación de la mezcla in-situ. Las propiedades mecánicas de las mezclas no son evaluadas. Los parámetros usualmente considerados en la evaluación de la mezcla son contenido de vacíos (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos con asfalto (VFA). El actual método volumétrico de diseño de mezclas SUPERPAVE[®], pertenece a esta categoría.

En los métodos de diseño de mezclas relacionados con el comportamiento, las mezclas que

¹ Luminari, M., & Findato, A. (1998). State of the Art Report on Mix Design. L. Francken (Ed.), Bituminous Binders and Mixtures (pp 69-101) (RILEM Report 17). London y New York: E & FN Spon, An Imprint of Roulitge.



reunen el criterio volumétrico son compactadas y evaluadas con ensayos de simulación y/o fundamentales, para estimar sus propiedades, las cuales son relacionadas con el comportamiento del pavimento. La mezcla óptima es entonces seleccionada sobre estos criterios adicionales. El método de diseño de mezclas Finnish PANK-95 está basado en la utilización de pruebas de simulación, incluyendo el compactador giratorio y pistas de evaluación (Finnish Pavement Technology Advisory Council, (PANK), 1995).

En los métodos de diseño de mezclas basados en el comportamiento, una mezcla inicialmente diseñada con cualquiera de los métodos antes mencionados, se somete a ensayos basados en el comportamiento, y su desempeño anticipado en el campo es estimado usando un modelo de propiedades del material, calibrado usando información obtenida in situ. Las propiedades fundamentales determinadas por este tipo de ensayos deben relacionarse con el comportamiento.”

Como se dijo anteriormente, uno de los más importantes usos de la CVU es la visualización rápida de diferentes especificaciones para las MAC; algunas veces, esas especificaciones reflejan un área de la carta, y otras, más exigentes, una línea recta.

En Colombia, las especificaciones de diseño de las MAC están íntimamente relacionadas con las del Instituto Norteamericano del Asfalto (TAI), que a su vez se han basado históricamente en el método de diseño empírico Marshall. Es así como las especificaciones del año 1998 del Instituto Nacional de Vías (INV), iban de la mano con la especificaciones TAI del año 1962, como se puede observar en las Figuras 4.1 y 4.2; además, la modificación hecha por el TAI en 1994 (Figura 4.3), se vió reflejada en las más recientes especificaciones del INV publicadas en el 2002 (Figura 4.4), aunque sin incluir el criterio de selección del VMA en función del contenido de vacíos y del tamaño máximo nominal del agregado (TMNA), pero sí teniendo en cuenta el criterio para VFA adoptado por el TAI para escogencia de las mezclas en el método Marshall [10]. En las especificaciones TAI-62, el criterio para la escogencia del mínimo VMA era función únicamente del TMNA [40], (como lo es actualmente en Colombia), teniendo como base el trabajo realizado por el Dr. Norman Mcleod hacia finales de la década de los 50's, en donde

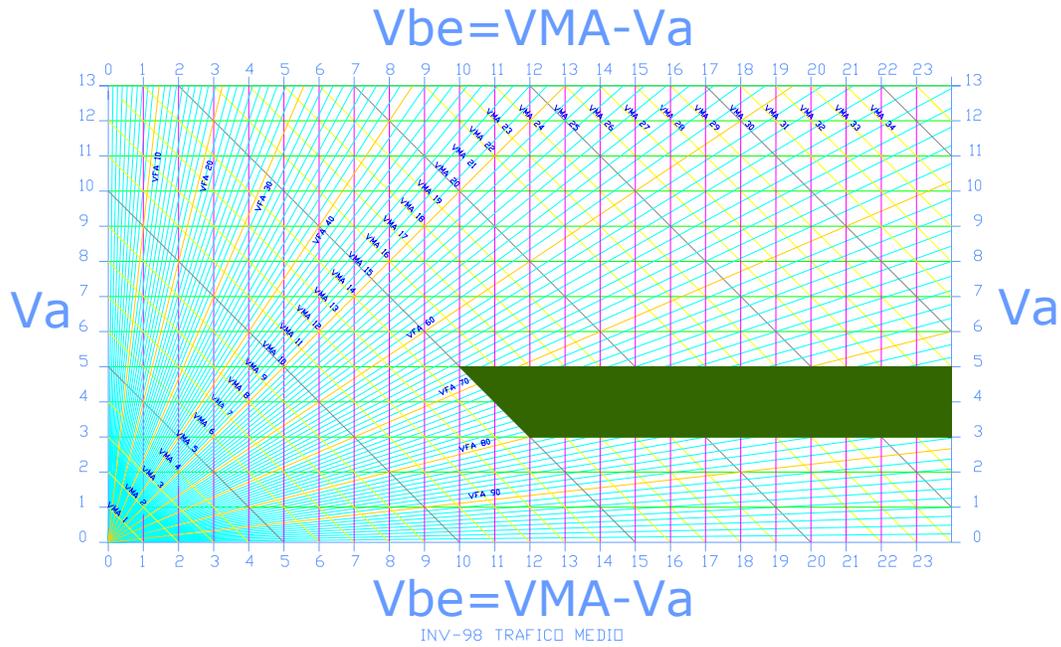


Figura 4.1. Especificaciones volumétricas Colombianas, año 1998.

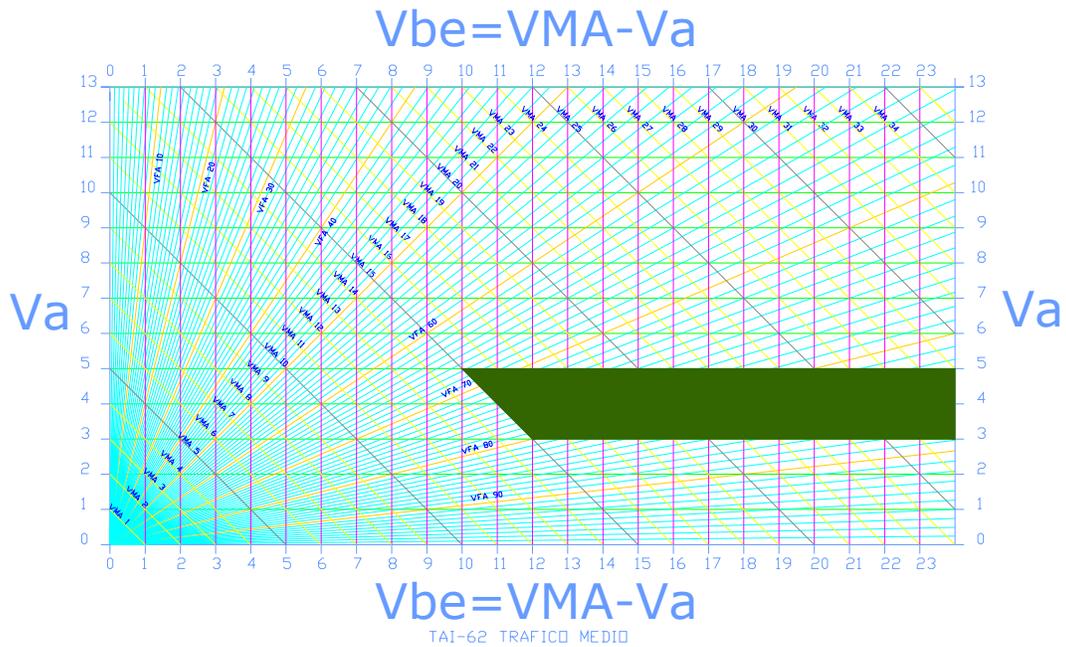


Figura 4.2. Especificaciones volumétricas Norteamericanas TAI, año 1962.

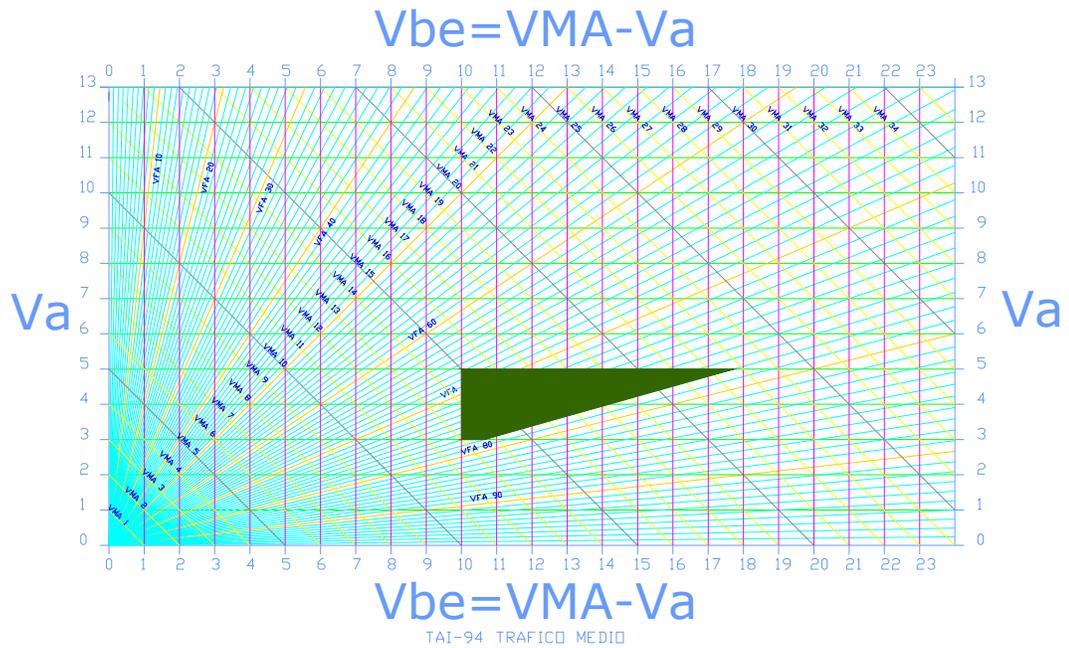


Figura 4.3. Especificaciones volumétricas Norteamericanas TAI, año 1994.

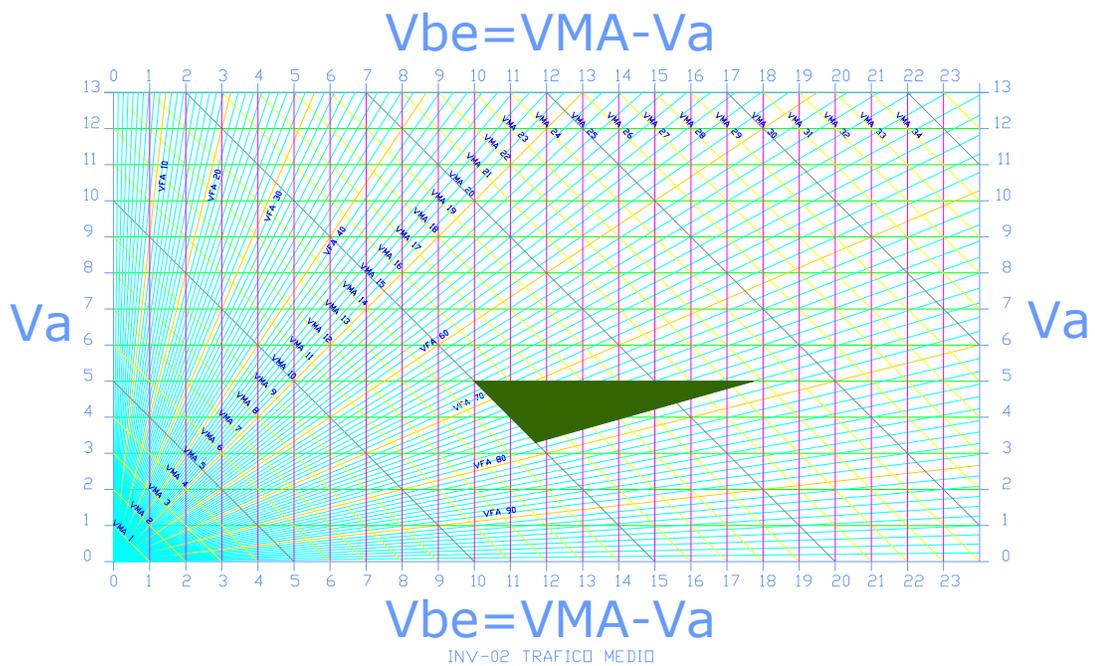


Figura 4.4. Especificaciones volumétricas Colombianas, año 2002.



propuso este método de selección, para este parámetro (Figura 4.5), [10, 13, 21, 22, 40].

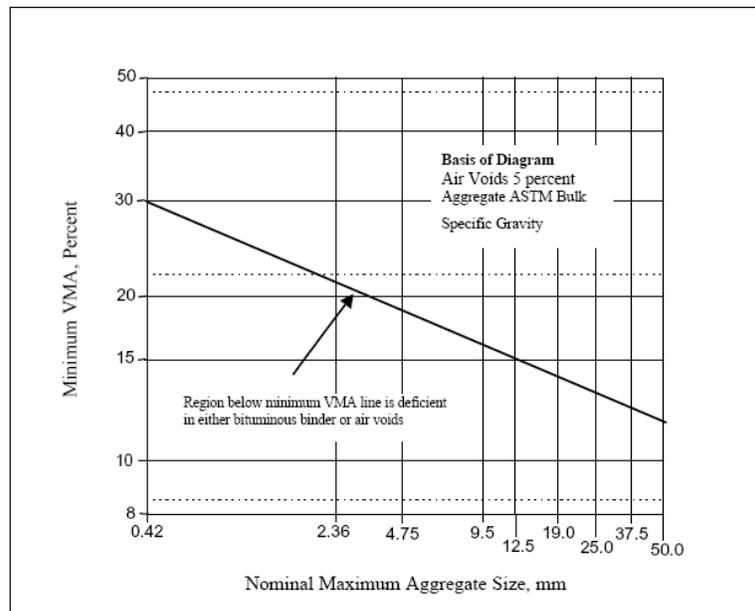


Figura 4.5. Criterio para escogencia del VMA propuesto por Mcleod.

Sin embargo, Macleod había realizado análisis con valores típicos para las gravedades específicas del agregado y del asfalto, y considerando sólo un contenido de vacíos en la mezcla, igual al 5%. Como estas especificaciones (TAI-62) permitían un contenido de Va variable entre 3% y 5%, existía una ambigüedad que fue reconocida luego de 30 años [21,22] por el TAI, que en la sexta edición de su texto sobre diseño de mezclas exige ya dos parámetros para escoger el mínimo VMA: el TMNA y el Va de la mezcla, que puede variar entre 3% y 5%. Este criterio corregido de VMA, fue incorporado en los procedimientos de diseño de mezclas SUPERPAVE® [9, 21, 22,], que además también controla los Va con un valor fijo del 4% y los VFA con un criterio de escogencia en función del tráfico; a diferencia de las anteriores especificaciones TAI, que eran representadas por áreas en la CVU, esta de SUPERPAVE®, es simplemente una línea como se observa en la Figura 4.6, por lo tanto se puede decir que es más exigente. Otra especificación que llama mucho la atención por su diferencia tan evidente con las Norteamericanas, es la que actualmente está implementada en Finlandia (Figura 4.7),

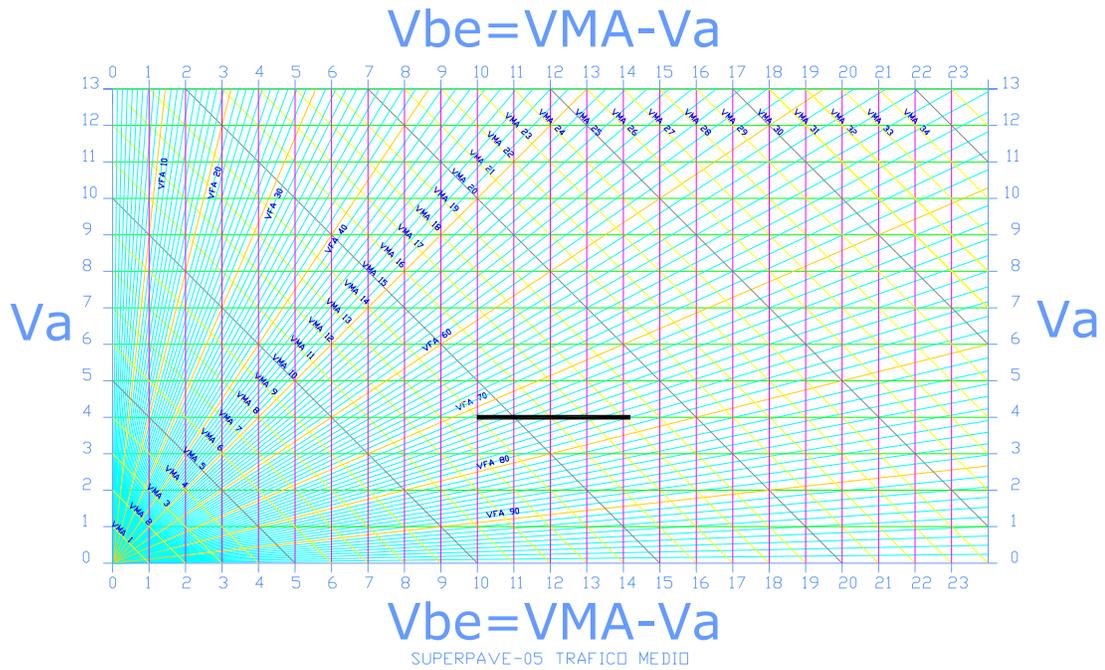


Figura 4.6. Especificaciones volumétricas Norteamericanas SUPERPAVE[®], año 2005.

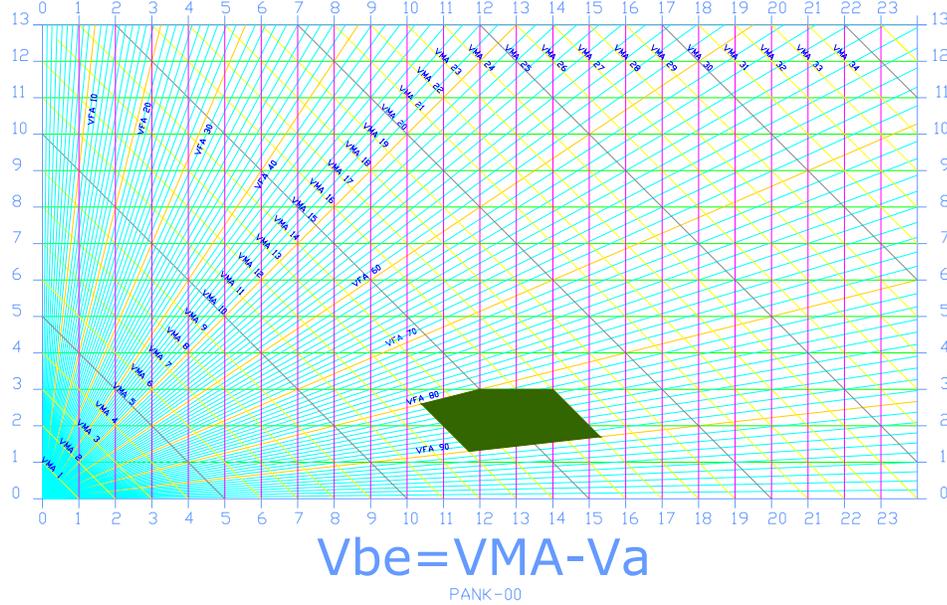


Figura 4.7. Especificaciones volumétricas Finlandesas PANK, año 2000.



donde los vacíos permitidos varían entre 1% y 3%, los VFA entre 80% a 90% y además hay dos limitaciones para el VMA: una mínima del 13% y una máxima del 17% (PANK 2000); esto parece ir en contravía de lo que se busca al cumplir con los criterios volumétricos del TAI y SUPERPAVE[®], como se observa en la Figura 4.8.

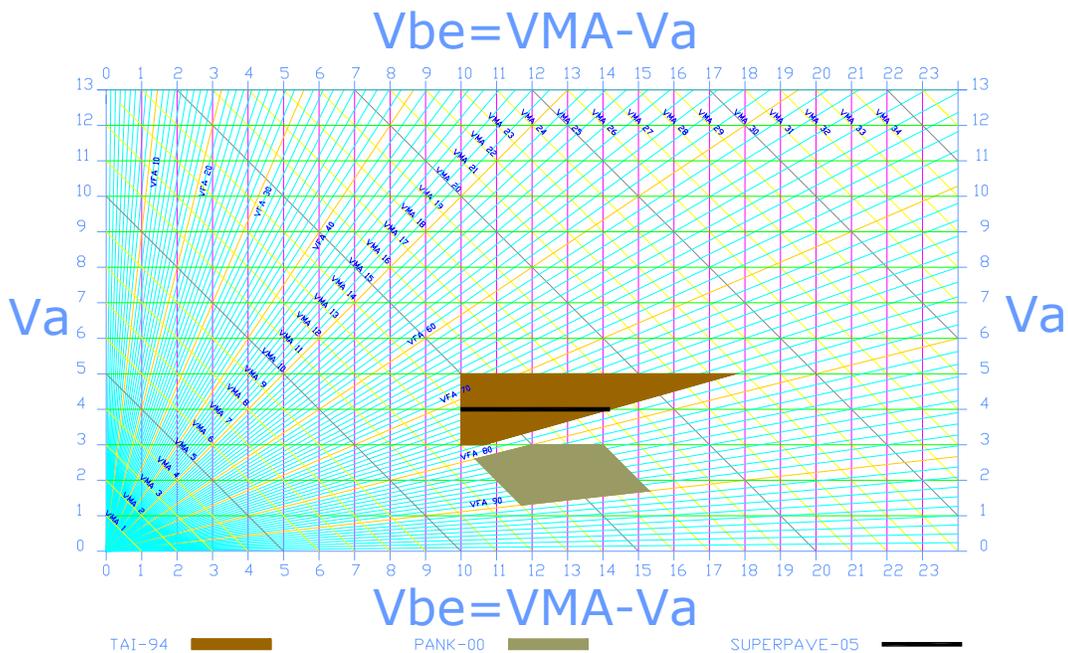


Figura 4.8. Especificaciones Norteamericanas (SUPERPAVE[®], TAI) y Finlandesas (PANK).

Como lo muestra la Figura 4.9 y el Cuadro 4.1, existen (y han existido a través del tiempo), muchas especificaciones diferentes, en todos los países, siendo unas más exigentes que otras, y algunas muy dispares como lo son las Finlandesas frente a las Norteamericanas. Este texto dará una explicación más adelante, acerca de las razones por las cuales, especificaciones tan diferentes una de otra, finalmente funcionan bien en cada ambiente de trabajo para el cual están implementadas.

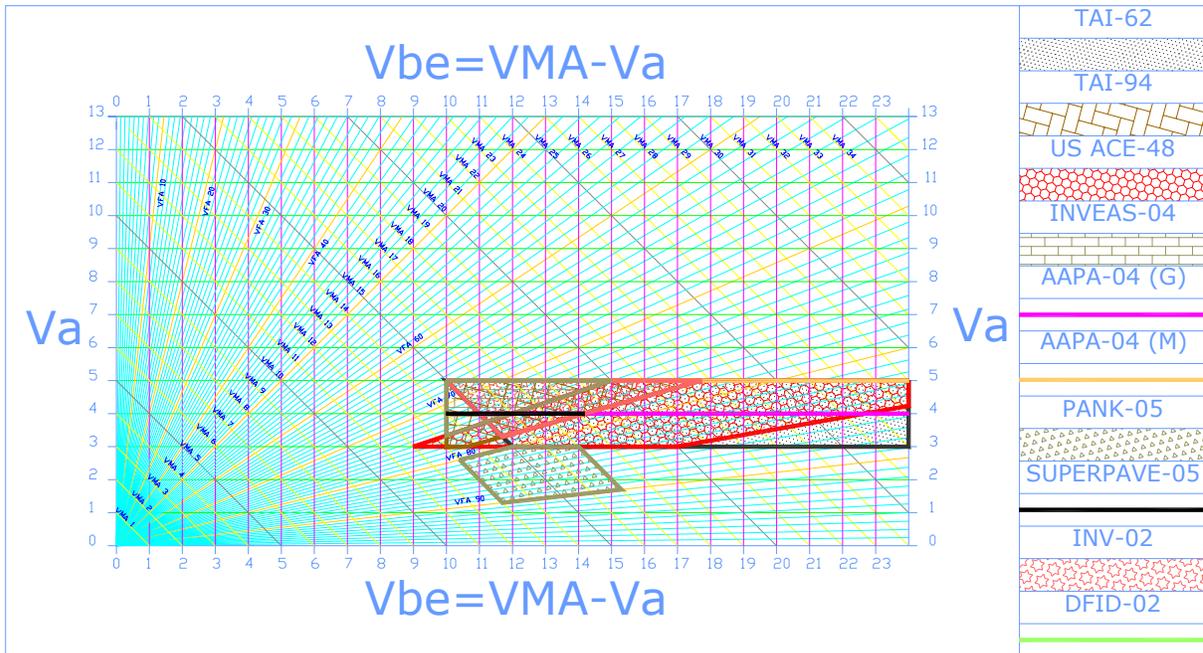


Figura 4.9. Diferentes especificaciones alrededor del mundo.

NOTA: Todas las Figuras anteriores están hechas para tráfico medio de acuerdo a la consideración respectiva de cada especificación, y para tamaños máximos nominales de ½ pulgada (correspondiente en Colombia a la MDC-2), o similares, cuando no existe el criterio de TMNA, y/o cuando el tamaño de la granulometría no coincide con la serie estándar.



Cuadro 4.1. Diferentes especificaciones alrededor del mundo*.

Países Especificaciones y niveles de tráfico	Colombia						Venezuela			Estados Unidos						Reino Unido	Australia				Estados Unidos			Finlandia					
	INV-98			INV-02			INVEAS ¹ -04			COE US AC-48 ² PI ¹¹ =100 psi	TAI-62			TAI-94			DFID ³ -02	AAPA-04 (M) ⁴				AAPA ⁵ -04 (G) ⁶				SUPERPAVE-05			PANK ⁷ -00
	B ⁸	M ⁹	A ¹⁰	B	M	A	B	M	A		B	M	A	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA ¹²	B	M	A	TODOS
Compactación	75	75	75	75	75	75	50	75	75	50	35	50	75	35	50	75	75	50	50	50	50	-	-	-	-	-	-	-	-
Estabilidad (Kgf)	500	650	750	600	900	900	724	814	995	226	226	226	339	339	339	543	814	900	561	663	663	714	-	-	-	-	-	-	-
Flujo (mm)																													
Mínimo	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	4	4	3.5	4	4	3.5	4.1	3.6	3.6	5.1	5.1	4.6	4.1	4.6	4.1	3.6	3.5	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Va (%)																													
Mínimo	3	3	4	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Fijo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	3	4	5	6	4	4	4	5	4	4	4	-
Máximo	5	5	6	5	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
VMA (%)																													
Mínimo	15	15	15	15	15	15	13 ¹³ ,15 ¹⁴	13 ¹³ ,15 ¹⁴	13 ¹³ ,15 ¹⁴	-	15	15	15	13 ¹³ ,15 ¹⁴	13 ¹³ ,15 ¹⁴	13 ¹³ ,15 ¹⁴	15	15	15	16	16	15	15	15	15	14	14	14	13
Máximo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17
VFA (%)																													
Mínimo	-	-	-	65	65	65	65	65	65	75	-	-	-	70	65	65	65	-	-	-	-	-	-	-	-	70	65	65	80
Fijo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(85) ¹⁵
Máximo	-	-	-	80	78	75	78	75	75	85	-	-	-	80	78	75	73	-	-	-	-	-	-	-	-	80	78	75	90

¹ Instituto Venezolano del Asfalto

² Corp of Engineers - US-Army Corps

³ Department for International Development – Recomendaciones encontradas en el texto: A guide to the design of hot mix asphalt in tropical and sub-tropicals countries del DFID

⁴ Compactación por el método Marshall

⁵ Australian Asphalt Pavement Association

⁶ Compactación con equipo giratorio

⁷ Finnish Pavement Technology Advisory Council

⁸ Nivel de tráfico bajo de acuerdo a la consideración respectiva de cada especificación

⁹ Nivel de tráfico medio de acuerdo a la consideración respectiva de cada especificación

¹⁰ Nivel de tráfico alto de acuerdo a la consideración respectiva de cada especificación

¹¹ Presión de inflado - Criterio establecido para instalaciones militares

¹² Nivel de tráfico muy alto de acuerdo a la consideración respectiva de cada especificación

¹³ Valor mínimo de VMA cuando los vacíos con aire Va toman un valor de 3%, para valores superiores se puede interpolar linealmente entre los puntos (3,13) y (5,15).

¹⁴ Valor mínimo de VMA cuando los vacíos con aire Va toman un valor de 5%, para valores inferiores se puede interpolar linealmente entre los puntos (3,13) y (5,15).

¹⁵ Valor recomendado en el Método de Diseño de la Finnish Asto Pank 2000, denominado Empirical Mix Design System with VFA Optimisation

* El cuadro fue realizado para los diferentes niveles de tráfico de cada especificación mencionada y tomando como granulometría de referencia la correspondiente a la MDC-2 de las especificaciones Colombianas de diseño, que tiene como TMNA ½ pulgada.

5. TRABAJO DE LABORATORIO.

Con el fin de empezar a correlacionar las relaciones volumétricas de una MAC, con la resistencia de la correspondiente mezcla y poder observar este comportamiento en una CVU, se ha propuesto durante una primera etapa de la investigación, llevar a cabo ensayos Marshall, dado que este método de diseño se continuará usando en Colombia aun durante varios años. La comunidad del asfalto en nuestro país debe ser conciente que este método de diseño ha ido desplazándose poco a poco, especialmente en los países de América del Norte donde la investigación SHRP (Strategic Highway Research Program) dió como resultado el método de diseño de MAC denominado SUPERPAVE[®], el cual tiene implementado actualmente el método volumétrico de diseño (Nivel 1).

La metodología de trabajo en el laboratorio consistió básicamente en preparar 105 briquetas Marshall, siguiendo la norma de ensayo ASTM D 1559, empleando agregados minerales cercanos a la ciudad de Popayán y asfalto proveniente de la refinería de Barrancabermeja. El agregado proviene de la explotación de una cantera de diabasas y basaltos ubicada sobre la carretera Popayán-Coconuco, a la altura del sitio denominado “Patico”. El material es explotado en dicha cantera y triturado en una de las instalaciones de la firma Ecocivil Ltda., ubicada en la Avenida Las Ferias en la ciudad de Popayán. Los materiales cumplen con todas las especificaciones de construcción que exige el INV, tanto para agregados como para el cemento asfáltico, como se observa en los Cuadros 5.1 y 5.2, además, las temperaturas de mezcla y compactación en el laboratorio (Cuadro 5.3), fueron obtenidas de la Figura 5.1.

Se adoptó una gradación de trabajo que corresponde a la media de la especificación del año 98 del INV, que cumple con la más reciente gradación permitida por el INV en el 2002, como se observa en el Cuadro 5.4. Se trabajaron MAC con porcentajes de contenido asfáltico entre 3% y 9%, con incrementos de 1% de contenido de cemento asfáltico, referidos al peso total de la mezcla compactada.

Las briquetas se elaboraron siguiendo la norma ASTM D 1559, pero variando la energía de compactación, tratando de representar diferentes intensidades de carga por tráfico automotor,



desde 10 hasta 400 golpes por cara (donde se presenta en este último caso la densidad de rechazo, [28, 31]). En este intervalo se incluyen las energías solicitadas en las especificaciones del método de diseño Marshall del TAI, que son 35, 50 y 75 golpes en cada cara. De esta manera se prepararon las 105 briquetas que se muestran en el Cuadro 5.5.

Una vez elaborados los especímenes, se les determinó a cada una, la gravedad específica bulk de la mezcla (Gmb), según la norma ASTM D 1188, y se rompieron para medir estabilidad y flujo de acuerdo a la norma ASTM D 1559. Además, para cada dosificación empleada se determinó la gravedad específica máxima medida (Gmm), elaborando dos mezclas y aplicando la norma ASTM D 2041.

Cuadro 5.1. Características del agregado¹ usado vs especificaciones INV.

PROPIEDAD	UNIDAD DE MEDIDA	NORMA DE REFERENCIA INV	VARIABLE DEL ENSAYO	ESPECIFICACIÓN		REPORTE CONTROL DE CALIDAD
				MIN	MAX	
Partículas fracturadas mecánicamente (Agregado Grueso)	%	E-227	-	75	-	98.2
Desgaste en la máquina de Los Angeles	%	E-218	-	-	30	18.1
		E-219				
Pérdida en ensayo de Solidez	%	E-220	Sulf. de sodio	-	12	4.31
	%	E-220	Sulf. De magne.	-	18	4.96
índice de aplanamiento	%	E-230	-	-	35	18
índice de alargamiento	%	E-230	-	-	35	15
I.P.	-	E-125	-	N.P.		N.P.
	-	E-126				
Equivalente de arena	%	E-133	-	50	-	62

¹ La caracterización de los materiales fue suministrada por la Empresa Ecocivil Ltda.



Cuadro 5.2. Características del cemento asfáltico¹ usado vs especificaciones INV.

PROPIEDAD	UNIDAD DE MEDIDA	NORMA DE REFERENCIA INV	ESPECIFICACIÓN		REPORTE CONTROL DE CALIDAD
			MIN	MAX	
Penetración @ 25°C, 100 g, 5 s	0.1mm	E-706	80	100	98.0
Índice de Penetración	IP	E-724	-1	1	-0.64
Viscosidad Absoluta @ 60°C	P	E-716	1000	-	1158
Pérdida por Calentamiento en Película Delgada @ 163°C, 5 horas	%	E-721	-	1	0.26
Ductilidad @ 25°C, 5 cm/min	cm	E-702	100	-	>130
Punto de Chispa	°C	E-709	230	-	264
Solubilidad en Tricloroetileno	%	E-713	99	-	99.77
Cnotenido de agua	%	E-704	-	0.2	0.1
Penetración del residuo despues de la pérdida por calentamiento	%	E-706	48	-	72.0

VISCOSIDAD vs TEMPERATURA

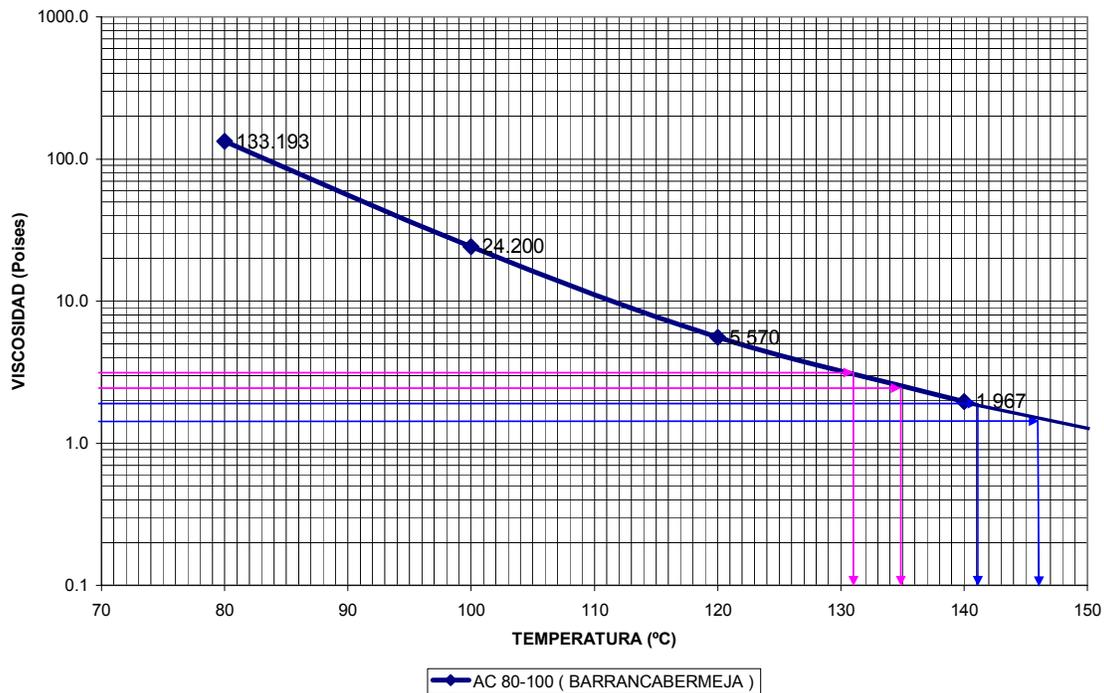


Figura 5.1. Gráfica para la obtención de las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio.

¹ La caracterización de los materiales fue suministrada por la Empresa Ecocivil Ltda.



Cuadro 5.3. Temperaturas de mezcla y compactación en el laboratorio.

Temperaturas, °C	Rango Viscosidad, Poises	Mínimo	Máximo
Mezcla	1.5-1.9	141	146
Compactación	2.5-3.1	131	135

Cuadro 5.4. Granulometría usada vs especificaciones INV-98 e INV-02.

Tamices	Especificación MDC-2 1996			Especificación MDC-2 2002		Porcentajes	
	Inferior	Superior	Intermedio	Inferior	Superior		
3/4	100	100	100	100	100	40.5	Agregado Grueso
1/2	80	100	90	80	100		
3/8	70	88	79	70	88		
No.4	51	68	59.5	49	65		
No.10	38	52	45	29	45	53.5	Agregado Fino
No.40	17	28	22.5	14	25		
No.80	8	17	12.5	8	17		
No.200	4	8	6	4	8		
<200	-	-	-	-	-	6	Llenante

Cuadro 5.5. Designación y composición de las probetas.

GOLPES POR CARA	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO, %																				
	3			4			5			6			7			8			9		
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
35	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
50	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
75	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
400	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105

Los pesos específicos de los agregados minerales se hicieron siguiendo en cada caso la correspondiente norma de ensayo, así: para agregados gruesos, ASTM C 127, para agregados finos, ASTM C 128 y para el llenante mineral se aplicó INV E-128; en tanto que el peso



específico del cemento asfáltico fue evaluado de acuerdo a la práctica estandarizada por la ASTM y designada como D 70.

Los anteriores ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos de la Universidad del Cauca y los resultados están incluidos en el Anexo 1 (Gravedades Específicas de los materiales constituyentes de las mezclas).

Completado el trabajo de laboratorio propuesto para esta etapa de la investigación, se calcularon las relaciones volumétricas VFA, VMA, Va y Vbe, siguiendo los criterios del TAI (Cuadros 5.6 a 5.10). En una segunda fase de la investigación se fabricarán briquetas para la determinación de módulos dinámicos y resistencia al esfuerzo cortante en cámara triaxial, para tratar de establecer una correlación entre las relaciones volumétricas de las mezclas, con su rigidez y los parámetros ϕ y C, de resistencia al esfuerzo cortante.

Cuadro 5.6. Relaciones volumétricas de las briquetas de 10 golpes por cara.

GPC*=10	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO, %																				
	3			4			5			6			7			8			9		
No de Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Va	20.9	20.6	20.3	18.4	19.6	19.6	15.2	16.6	16.9	14.5	14.4	15.5	10.2	10.4	10.5	6.2	3.9	5.5	2.4	2.6	2.9
VMA	24.4	24.1	23.8	24.3	25.4	25.4	23.4	24.7	24.9	24.9	24.8	25.8	23.5	23.6	23.7	21.9	20.0	21.3	20.6	20.8	21.0
Vbe	3.5	3.5	3.5	5.9	5.8	5.8	8.2	8.1	8.0	10.4	10.4	10.3	13.2	13.2	13.2	15.7	16.1	15.8	18.2	18.2	18.1
VFA	14.3	14.6	14.8	24.4	22.9	23.0	35.0	32.7	32.3	41.7	42.0	39.8	56.4	55.9	55.6	71.8	80.5	74.4	88.2	87.3	86.2

Cuadro 5.7. Relaciones volumétricas de las briquetas de 35 golpes por cara.

GPC*=35	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO, %																				
	3			4			5			6			7			8			9		
No de Briqueta	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Va	18.0	17.2	17.9	15.0	14.3	15.6	12.6	11.7	12.0	8.9	8.7	9.1	5.1	6.2	4.6	2.2	2.0	2.0	1.5	1.3	1.2
VMA	21.6	20.8	21.6	21.2	20.5	21.7	21.1	20.2	20.5	19.9	19.8	20.1	19.1	20.1	18.7	18.6	18.4	18.4	19.9	19.7	19.7
Vbe	3.6	3.7	3.6	6.2	6.2	6.1	8.5	8.5	8.5	11.1	11.1	11.0	14.0	13.8	14.1	16.4	16.4	16.4	18.4	18.4	18.4
VFA	16.7	17.6	16.8	29.1	30.3	28.2	40.2	42.3	41.6	55.5	56.0	54.8	73.3	68.9	75.2	88.2	89.1	89.1	92.4	93.3	93.7

* GPC: golpes por cara.



Cuadro 5.8. Relaciones volumétricas de las briquetas de 50 golpes por cara.

GPC*=50	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO, %																				
	3			4			5			6			7			8			9		
No de Briqueta	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Va	16.3	16.8	14.0	12.7	12.7	13.6	9.9	10.9	9.8	6.3	6.8	6.9	3.3	3.8	3.2	1.5	1.7	2.0	1.3	0.8	1.4
VMA	20.0	20.4	17.8	19.0	19.0	19.9	18.6	19.6	18.5	17.7	18.1	18.2	17.6	18.0	17.5	18.0	18.2	18.4	19.7	19.3	19.8
Vbe	3.7	3.7	3.8	6.3	6.3	6.3	8.7	8.6	8.7	11.4	11.3	11.3	14.3	14.2	14.3	16.5	16.5	16.4	18.4	18.5	18.4
VFA	18.5	18.0	21.3	33.3	33.3	31.6	46.8	44.1	47.1	64.4	62.5	62.1	81.2	78.9	81.6	91.6	90.5	89.4	93.6	95.7	93.0

Cuadro 5.9. Relaciones volumétricas de las briquetas de 75 golpes por cara.

GPC*=75	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO, %																				
	3			4			5			6			7			8			9		
No de Briqueta	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Va	15.6	16.6	14.8	12.2	12.7	11.5	9.4	10.4	9.1	6.4	6.7	5.6	3.3	4.4	3.8	1.8	2.1	1.5	1.4	1.3	1.2
VMA	19.3	20.3	18.6	18.6	19.1	18.0	18.1	19.1	17.9	17.8	18.0	17.0	17.5	18.5	18.0	18.3	18.5	18.0	19.8	19.7	19.7
Vbe	3.7	3.7	3.8	6.4	6.3	6.4	8.8	8.7	8.8	11.4	11.3	11.5	14.3	14.1	14.2	16.4	16.4	16.5	18.4	18.4	18.4
VFA	19.3	18.1	20.2	34.3	33.2	35.7	48.3	45.5	49.1	64.0	62.9	67.2	81.3	76.2	78.9	90.1	88.5	91.5	92.8	93.6	93.7

Cuadro 5.10. Relaciones volumétricas de las briquetas de 400 golpes por cara.

GPC*=400	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO, %																				
	3			4			5			6			7			8			9		
No de Briqueta	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
Va	14.1	14.1	12.9	11.2	10.4	10.0	7.8	7.7	8.9	3.6	3.7	5.0	1.8	1.7	1.4	0.9	1.1	1.0	0.9	0.4	0.8
VMA	17.9	17.9	16.8	17.6	16.9	16.6	16.7	16.6	17.7	15.3	15.4	16.5	16.3	16.2	15.9	17.5	17.6	17.6	19.4	19.0	19.3
Vbe	3.8	3.8	3.8	6.4	6.5	6.5	8.9	8.9	8.8	11.7	11.7	11.5	14.5	14.5	14.5	16.6	16.6	16.6	18.5	18.6	18.5
VFA	21.2	21.1	22.9	36.6	38.5	39.4	53.3	53.9	49.9	76.3	75.8	69.9	88.8	89.4	91.1	94.9	93.9	94.4	95.2	98.1	95.9

* GPC: golpes por cara.

6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MARSHALL.

Como consecuencia de la fase de los ensayos de laboratorio realizados a las 105 briquetas y a las 14 mezclas preparadas para Gmm, en el Cuadro 6.1 se presentan todos los resultados obtenidos, relacionados con gravedad específica bulk de las mezclas compactadas (Gmb), estabilidad y flujo de las probetas, y en el Cuadro 6.2, los promedios de las tres briquetas elaboradas con el mismo contenido de asfalto y cantidad de golpes por cara; en el Cuadro 6.3, las gravedades específicas máximas medidas (Gmm), de las mezclas sin compactar y en el cuadro 6.4, los promedios de las relaciones volumétricas de las mismas briquetas anteriores. Los cálculos necesarios para la obtención de todos estos resultados están descritos en el Anexo 3, junto con una explicación para solucionar toda la parte volumétrica de un diagrama de fases, luego de obtener la información de laboratorio requerida.

Todas las relaciones volumétricas de los Cuadros 5.6 a 5.10, se muestran en la CVU que se ilustra en la Figura 6.1, en donde se observan claramente dos tipos de líneas: las denominadas trayectorias de compactación, que describen como evoluciona volumétricamente una mezcla en función de la energía de compactación, y las líneas de igual energía de compactación, que describen cómo evolucionan volumétricamente diferentes mezclas agregado-asfalto, cuando se incrementa el contenido de bitumen. Otro uso importante de la CVU, adicional a los mencionados en el capítulo número tres, es que sobre cada punto que representa una mezcla, es posible superponer otras características, como lo es en este caso la estabilidad Marshall. Esto se muestra en la Figura 6.2, donde los puntos representan el promedio de los tres valores calculados¹ para las relaciones volumétricas de una única composición energía-asfalto mostrados en el Cuadro 6.4, y cada número junto a las trayectorias de compactación indica el valor promedio¹ del ensayo de estabilidad, medido para las tres briquetas de esa misma combinación, que están incluidos en el Cuadro 6.3.

¹ Cuando la tolerancia del ensayos lo permite, de lo contrario sólo se promedian los valores que están dentro de la tolerancia permitida.

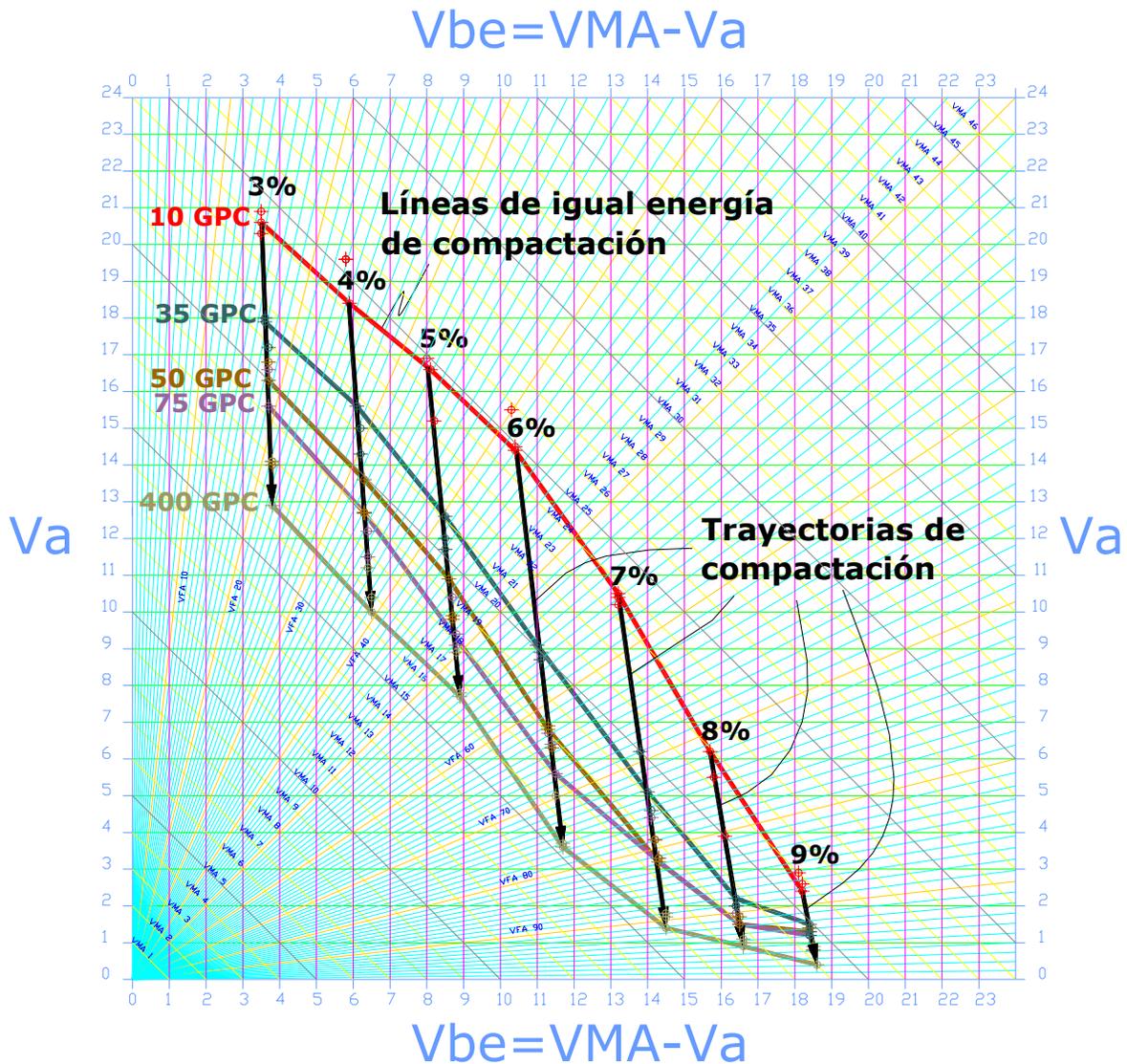


Figura 6.1. Curvas típicas en la CVU, trayectorias de compactación y líneas de igual energía de compactación.



Cuadro 6.1. Resultados de gravedad específica bulk, estabilidad y flujo de las 105 probetas elaboradas.

TODOS	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO, %AC																				
	3			4			5			6			7			8			9		
No de Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Gmb (g/cm ³)	2.019	2.027	2.034	2.043	2.011	2.012	2.087	2.053	2.047	2.070	2.073	2.045	2.131	2.127	2.124	2.198	2.252	2.215	2.258	2.253	2.247
Estabilidad (KN)	1.4	1.1	1.6	1.8	1.0	1.3	2.4	1.9	1.4	1.6	2.4	1.7	2.5	3.0	2.5	2.8	4.8	3.5	4.7	4.9	4.7
Flujo (mm)	3.0	3.0	2.8	3.0	3.6	2.8	4.3	3.8	4.1	3.3	4.6	3.8	4.1	6.4	4.1	4.6	4.1	4.6	5.8	5.8	5.6
No de Briqueta	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Gmb (g/cm ³)	2.137	2.124	2.194	2.184	2.184	2.162	2.218	2.193	2.220	2.268	2.256	2.253	2.296	2.284	2.298	2.308	2.303	2.297	2.286	2.295	2.283
Estabilidad (KN)	3.0	3.5	3.6	3.7	5.8	3.6	4.1	5.4	4.1	5.0	6.9	4.9	6.6	4.9	8.4	6.6	8.3	7.4	6.1	7.3	6.5
Flujo (mm)	3.3	2.5	3.0	3.6	2.8	3.6	3.6	3.6	3.0	3.6	3.6	3.3	3.6	3.3	3.6	3.8	4.3	4.6	6.4	6.6	5.8
No de Briqueta	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Gmb (g/cm ³)	2.093	2.114	2.094	2.126	2.144	2.112	2.152	2.175	2.167	2.206	2.209	2.200	2.253	2.226	2.264	2.292	2.296	2.296	2.280	2.284	2.286
Estabilidad (KN)	4.0	3.3	4.6	6.7	7.4	5.1	6.5	4.9	6.1	8.2	6.5	6.3	8.2	8.0	8.1	7.5	7.2	6.7	6.0	6.4	5.9
Flujo (mm)	3.3	3.4	4.3	3.3	3.6	3.7	3.3	3.6	3.8	3.4	3.4	3.6	3.8	3.8	4.3	5.1	5.1	5.1	7.9	6.6	6.6
No de Briqueta	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Gmb (g/cm ³)	2.155	2.128	2.174	2.197	2.183	2.213	2.231	2.206	2.238	2.266	2.258	2.285	2.296	2.269	2.284	2.301	2.293	2.307	2.282	2.286	2.286
Estabilidad (KN)	6.4	4.4	6.2	7.1	6.5	7.6	7.0	6.5	8.8	9.0	7.2	9.3	7.9	6.7	9.0	7.3	6.7	7.2	7.0	5.9	7.1
Flujo (mm)	4.1	4.7	3.9	4.3	4.8	4.3	3.8	4.0	4.6	3.6	4.1	3.2	4.6	3.7	3.6	5.1	4.6	5.6	6.4	6.9	7.4
No de Briqueta	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
Gmb (g/cm ³)	2.192	2.191	2.222	2.222	2.242	2.251	2.270	2.274	2.244	2.332	2.330	2.300	2.331	2.333	2.340	2.322	2.318	2.320	2.293	2.306	2.296
Estabilidad (KN)	8.4	8.0	10.7	9.6	9.8	9.2	12.6	12.4	9.4	15.2	14.7	14.2	11.0	10.2	12.2	8.8	7.7	8.3	7.3	7.6	6.7
Flujo (mm)	3.0	3.0	3.3	3.0	3.0	3.6	3.3	3.6	3.8	3.0	3.3	3.3	3.8	3.6	3.8	4.3	4.6	4.6	6.1	5.6	6.4



Cuadro 6.2. Promedio de los resultados de gravedad específica bulk, estabilidad y flujo para cada terna de briquetas de igual composición.

TODOS	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO, %AC																				
	3			4			5			6			7			8			9		
Promedio de	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Gmb (g/cm ³)	2.027			2.012			2.050			2.071			2.128			2.207			2.253		
Estabilidad (KN)	1.5			1.2			1.7			1.6			2.5			3.2			4.8		
Flujo (mm)	3.0			3.1			4.1			3.9			4.8			4.4			5.8		
Promedio de	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Gmb (g/cm ³)	2.093			2.119			2.171			2.205			2.259			2.295			2.283		
Estabilidad (KN)	3.4			3.6			4.1			4.9			7.5			7.0			6.3		
Flujo (mm)	3.0			3.3			3.4			3.5			3.5			4.2			6.3		
Promedio de	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Gmb (g/cm ³)	2.130			2.184			2.219			2.259			2.292			2.303			2.288		
Estabilidad (KN)	3.6			5.9			6.3			6.4			8.1			7.4			5.9		
Flujo (mm)	3.7			3.5			3.6			3.5			4.0			5.1			7.0		
Promedio de	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Gmb (g/cm ³)	2.164			2.190			2.235			2.262			2.290			2.300			2.284		
Estabilidad (KN)	6.3			6.8			6.8			9.2			9.0			7.3			6.7		
Flujo (mm)	4.2			4.5			4.1			3.6			3.9			5.1			6.9		
Promedio de	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
Gmb (g/cm ³)	2.191			2.246			2.272			2.331			2.335			2.320			2.299		
Estabilidad (KN)	8.2			9.6			12.5			14.7			11.1			8.5			7.4		
Flujo (mm)	3.1			3.2			3.6			3.2			3.7			4.5			6.0		



Cuadro 6.3. Resultados de gravedad específica máxima medida para las mezclas de cada porcentaje de cemento asfáltico, y el promedio de los dos ensayos.

%AC	Gmm	Promedio
9	2.316	2.315
9	2.313	
8	2.344	2.343
8	2.343	
7	2.374	2.374
7	2.374	
6	2.417	2.420
6	2.424	
5	2.456	2.462
5	2.468	
4	2.500	2.502
4	2.504	
3	2.544	2.552
3	2.560	



Cuadro 6.4. Promedio de las relaciones volumétricas para cada terna de briquetas de igual composición.

TODOS	CONTENIDOS DE CEMENTO ASFÁLTICO																				
	3			4			5			6			7			8			9		
Promedio de	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Va	20.6			19.6			16.7			14.4			10.4			5.8			2.7		
VMA	24.1			25.4			24.8			24.8			23.6			21.6			20.8		
Vbe	3.5			5.8			8.1			10.4			13.2			15.8			18.2		
VFA	14.6			22.9			32.5			41.9			56.0			73.1			87.2		
Promedio de	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Va	18.0			15.3			11.8			8.9			4.9			2.1			1.4		
VMA	21.6			21.4			20.3			20.0			18.9			18.5			19.8		
Vbe	3.6			6.1			8.5			11.1			14.0			16.4			18.4		
VFA	16.8			28.6			41.9			55.4			74.2			88.8			93.2		
Promedio de	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Va	16.5			12.7			9.9			6.7			3.4			1.7			1.2		
VMA	20.2			19.0			18.6			18.0			17.7			18.2			19.6		
Vbe	3.7			6.3			8.7			11.3			14.2			16.5			18.4		
VFA	18.2			33.3			46.9			63.0			80.5			90.5			94.1		
Promedio de	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Va	15.2			12.5			9.2			6.5			3.5			1.8			1.3		
VMA	18.9			18.8			18.0			17.9			17.8			18.3			19.7		
Vbe	3.7			6.3			8.8			11.3			14.2			16.4			18.4		
VFA	19.8			33.7			48.7			63.4			80.1			90.0			93.4		
Promedio de	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
Va	14.1			10.2			7.7			3.7			1.7			1.0			0.7		
VMA	17.9			16.7			16.7			15.4			16.2			17.6			19.2		
Vbe	3.8			6.5			8.9			11.7			14.5			16.6			18.5		
VFA	21.1			38.9			53.6			76.0			89.7			94.4			96.4		

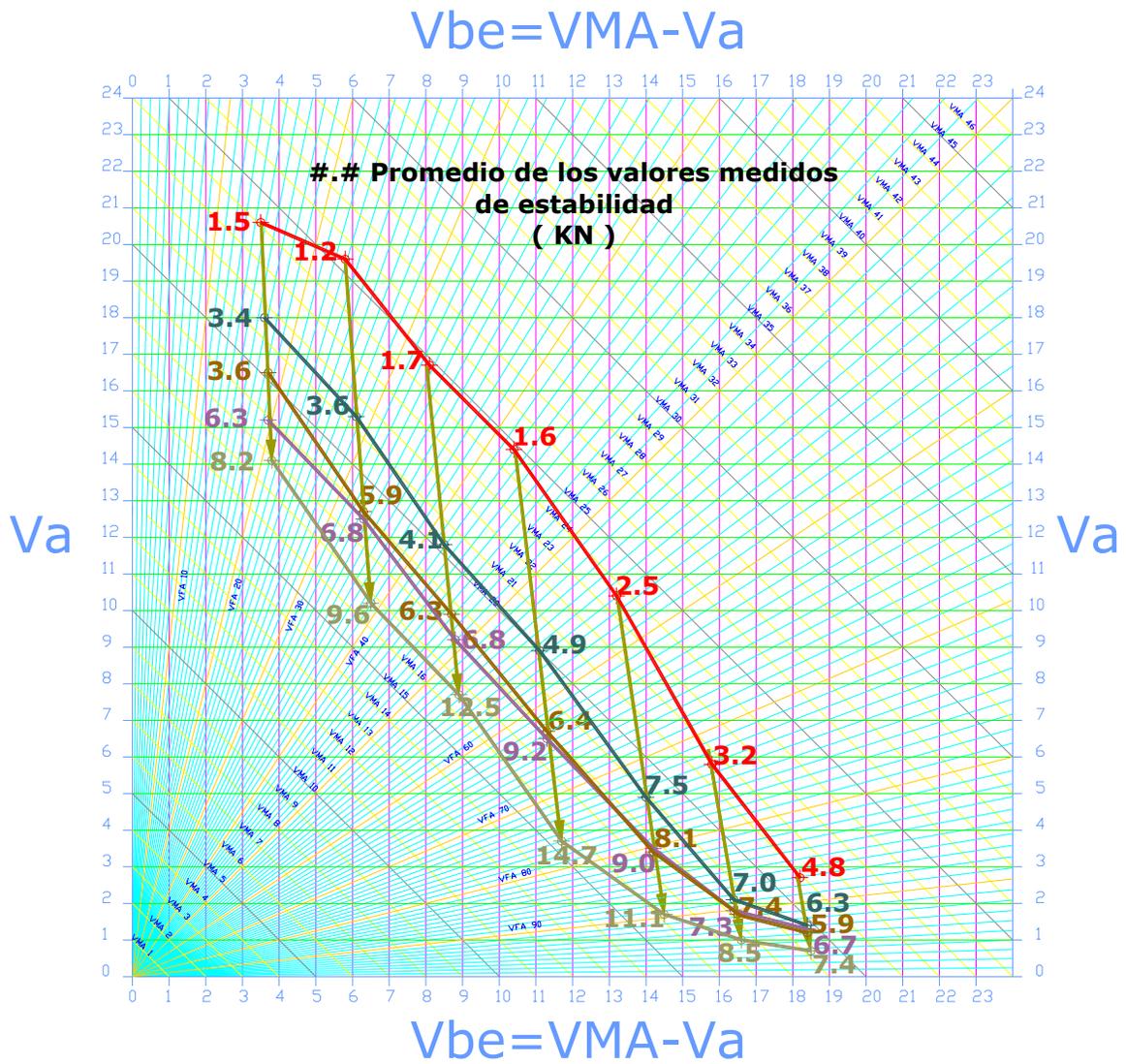


Figura 6.2. Valores promedio de estabilidad para cada terna de briquetas de igual composición.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos realizados, los cálculos de las relaciones volumétricas y la ubicación de estas en las figuras de cartas volumétricas correspondientes, pueden hacerse las siguientes observaciones:

1. Al ubicar los resultados de las relaciones volumétricas en la CVU, para una misma mezcla (o sea una igual combinación de agregado y contenido de asfalto), pero variando la energía de compactación, debe resultar una línea recta denominada trayectoria de compactación.
2. Para una misma trayectoria de compactación un punto ubicado debajo de otro indica que dicho punto es originado por la misma mezcla, pero con una energía de compactación mayor.
3. Las trayectorias de compactación originadas por las relaciones volumétricas de las mezclas con bajos contenidos de cemento asfáltico, tienen mayores pendientes que aquellas con contenidos de bitumen superiores. Esto indica que en contenidos bajos de cemento asfáltico, la energía de compactación (que es un equivalente del tráfico acumulado), influye notoriamente en la variación volumétrica de las mezclas asfálticas, principalmente en lo que respecta al contenido de vacíos.
4. Hay un punto límite para la energía de compactación, luego del cual no variarán las relaciones volumétricas de las mezclas, obteniéndose la llamada “densidad de rechazo”. Dentro de esta investigación y para el método de compactación con el martillo Marshall, el valor de esa energía es cuatrocientos golpes por cara.
5. La longitud de las trayectorias de compactación de las mezclas con bajo porcentaje de cemento asfáltico, es más larga que la longitud de las trayectorias de compactación de mezclas con mayores contenidos de bitumen, lo cual significa que las mezclas con bajo



porcentaje de cemento asfáltico son susceptibles a la variación volumétrica, en mayor grado que aquellas con contenidos superiores de ligante.

6. La estabilidad de las mezclas aumenta en la dirección de las trayectorias de compactación, o visto de otra manera, la misma mezcla tiene una mayor estabilidad cuando es compactada con una energía de compactación superior, esto es, cuando se densifica.
7. Las líneas de igual energía de compactación para las especificaciones del año 94, del TAI (35, 50 y 75 golpes por cara), están cercanas (en especial las de 50 y 75 golpes); sin embargo, hay significativas diferencias en las estabilidades medidas para dichas mezclas.
8. Las líneas de igual energía de compactación muestran igual evolución que las gráficas tradicionales del diseño Marshall. Por lo tanto, al sobreponer los valores de estabilidad y flujo, en las líneas de igual energía de compactación, en las CVU, se obtiene en una sola gráfica, toda la información necesaria para encontrar el contenido óptimo de asfalto, para el método de diseño de MAC, llamado Método Marshall.
9. De acuerdo con la Figura 7.1, en contenidos de aire entre el 3 y el 6 %, se presentan los mayores valores de estabilidad, para todas las energías de compactación. Valores menores (comúnmente no practicados en Colombia), y valores mayores, corresponden a estabilidades más bajas.
10. La Figura 7.2, muestra que los valores mayores de estabilidad se presentan cuando los contenidos de Vbe están entre 10 y el 16 %; estabilidades fuera de ese intervalo, tienen valores más bajos. Lo anterior es cierto para las energías de compactación de 35, 50, 75 y 400 golpes por cara, en tanto que para 10 golpes por cara, aun en el 18 % de Vbe, no se ha alcanzado un valor máximo de estabilidad, por lo tanto se puede decir que, bajas energías de compactación necesitan altos contenidos de bitumen para alcanzar valores aceptables de estabilidad.

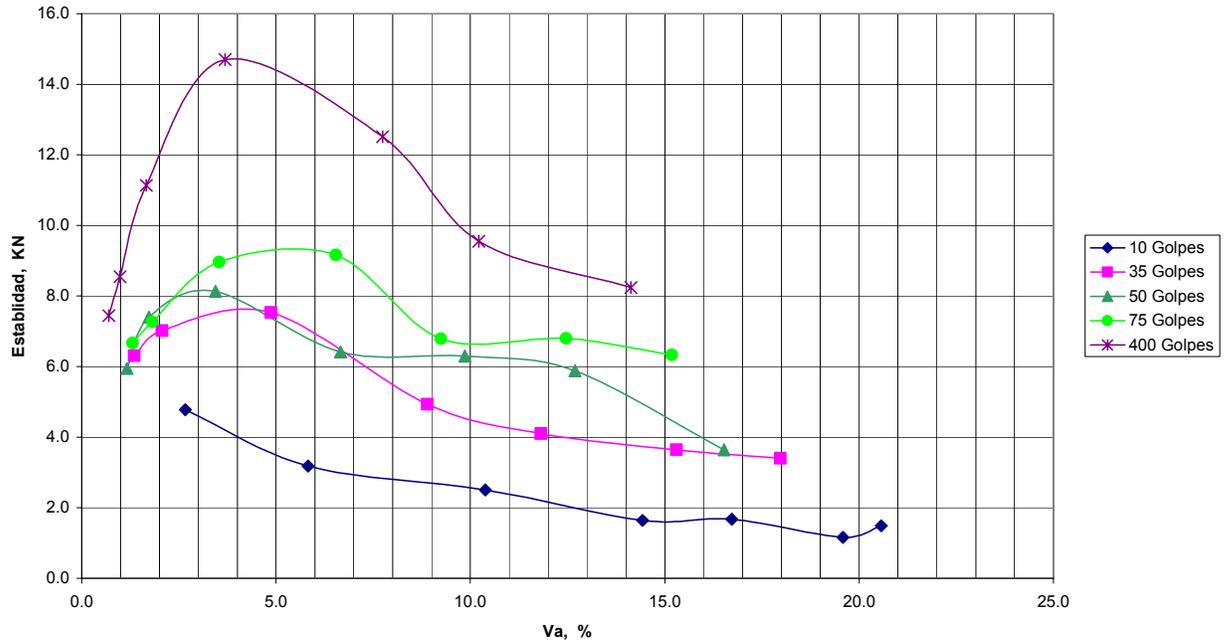


Figura 7.1. Estabilidad vs Vacíos llenos con aire (V_a) para diferentes energías de compactación.

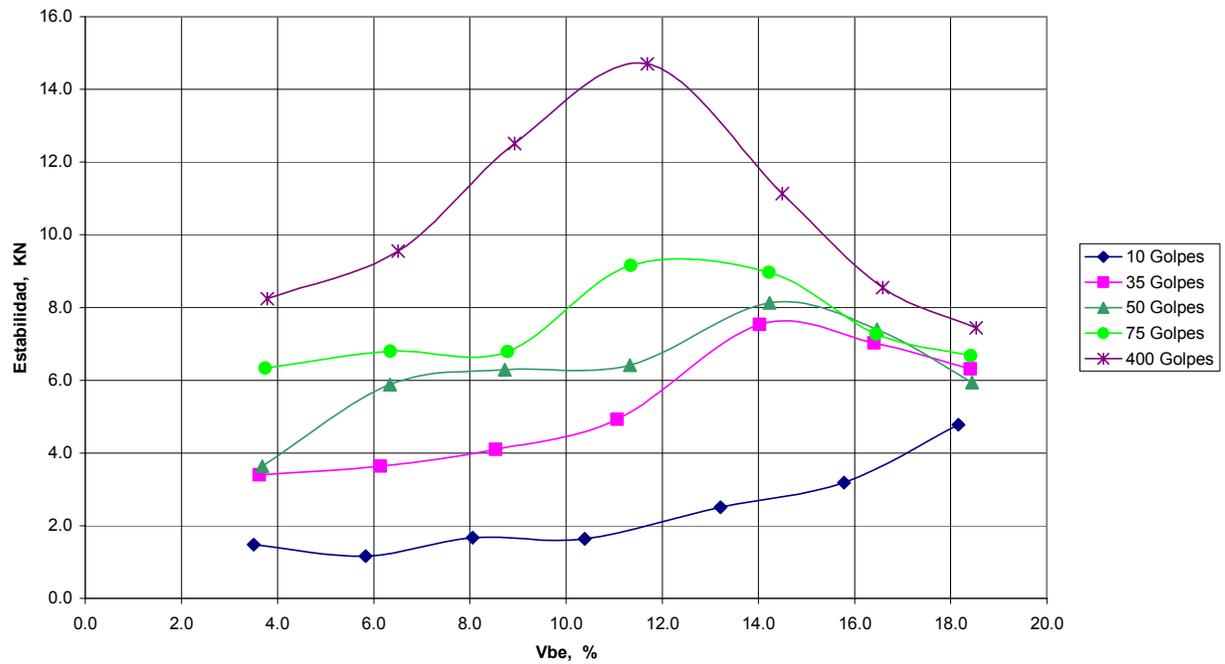


Figura 7.2. Estabilidad vs Volumen de asfalto efectivo (V_{be}) para diferentes energías de compactación.



11. Con valores de VFA entre 60 y 90 %, se obtienen los máximos valores de estabilidad, para todas las energías de compactación (Figura 7.3), excepto para 10 golpes por cara, en donde aun en el 87 % no se ha logrado una máxima estabilidad.

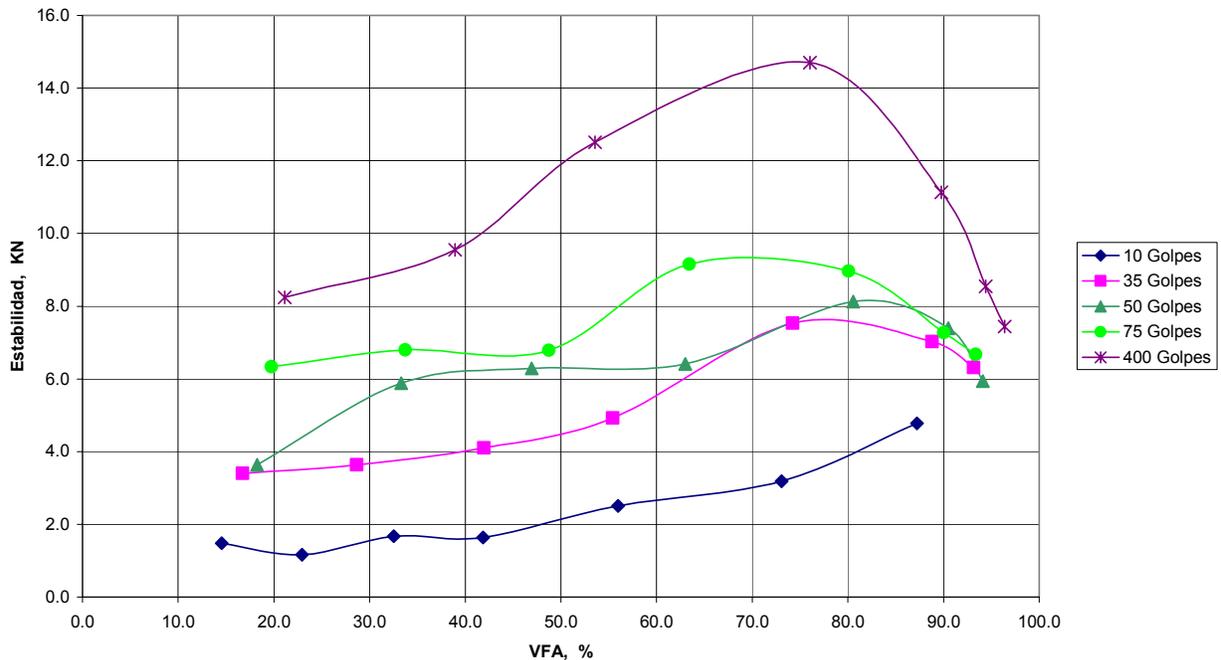


Figura 7.3. Estabilidad vs Vacíos llenos con asfalto (VFA) para diferentes energías de compactación.

12. Como se observa en la Figura 7.4, y a diferencia de las otras características volumétricas, existe una relación clara entre la estabilidad y el VMA, que describe la siguiente tendencia: a menor VMA, mayor estabilidad, y a mayor VMA, menor estabilidad.

13. Para una mezcla con cualquier contenido de asfalto, se obtiene que a mayor contenido de aire se presenta una estabilidad menor, o desde un punto de vista práctico, a medida que una mezcla se densifica (o sea que disminuye su contenido de aire), se incrementa su estabilidad. (Figura 7.5).

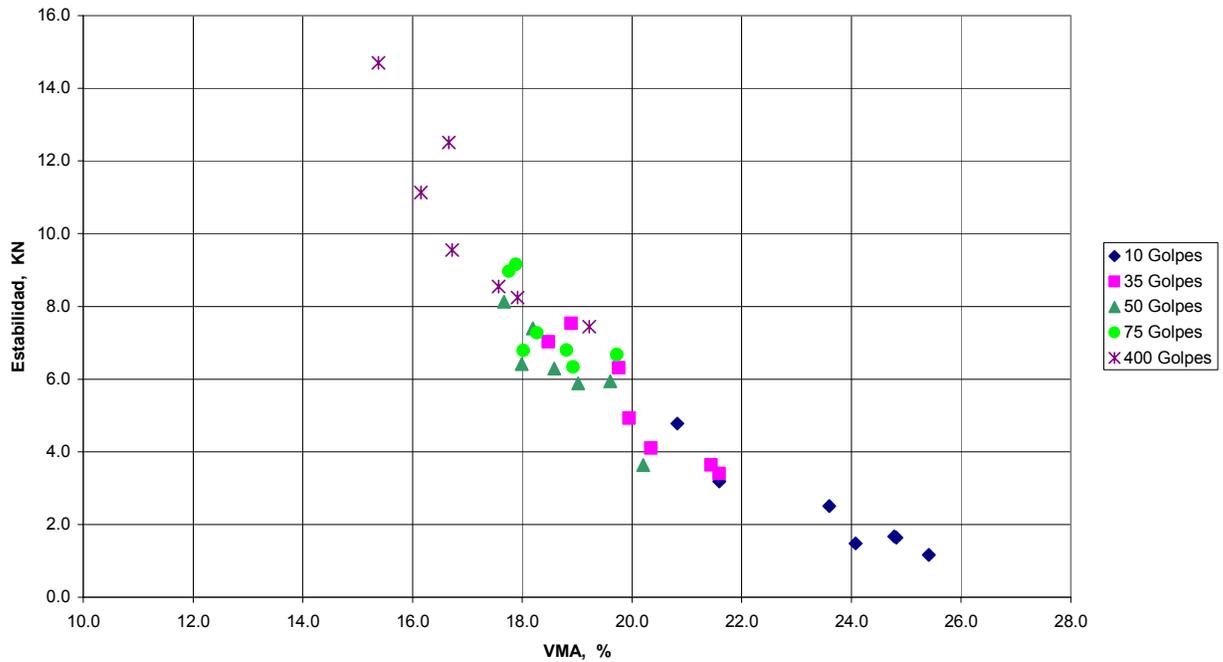


Figura 7.4. Estabilidad vs Vacíos en los agregados minerales (VMA) para diferentes energías de compactación.

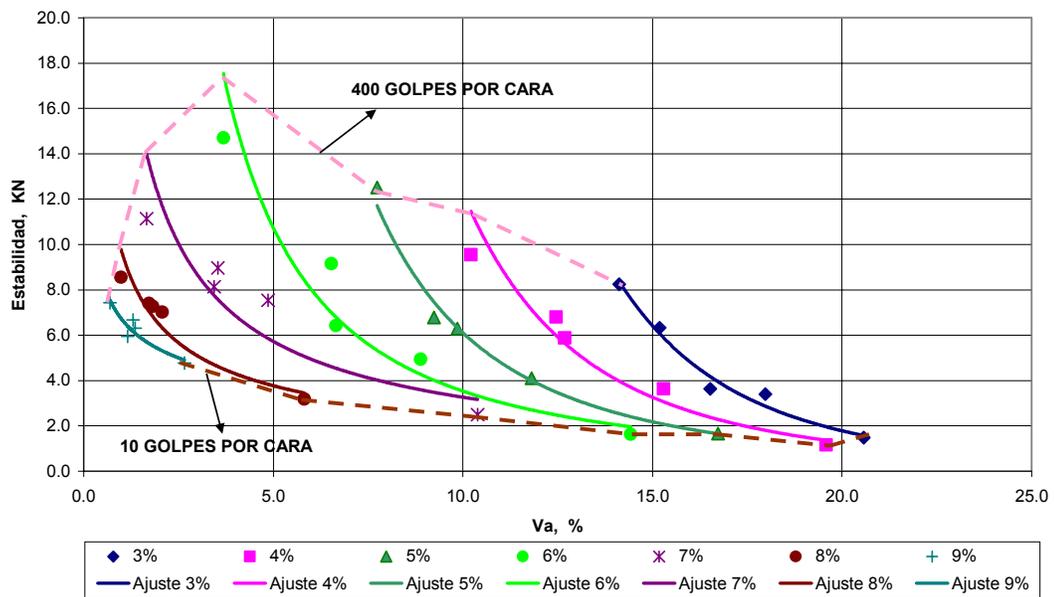


Figura 7.5. Estabilidad vs Vacíos llenos con aire (V_a) para mezclas con diferentes contenidos de cemento asfáltico.

14. Como se observa en la Figura 7.6, para una misma mezcla, sin importar el contenido de asfalto de ésta, la variación en el porcentaje de Vbe es mínima cuando se incrementa la energía de compactación; ésto, sumado al hecho que las mayores estabilidades se obtienen con los contenidos óptimos de bitumen¹, da fundamento para controlar en un método de diseño de MAC, este parámetro volumétrico. (Como lo hace actualmente, de manera indirecta, el TAI).

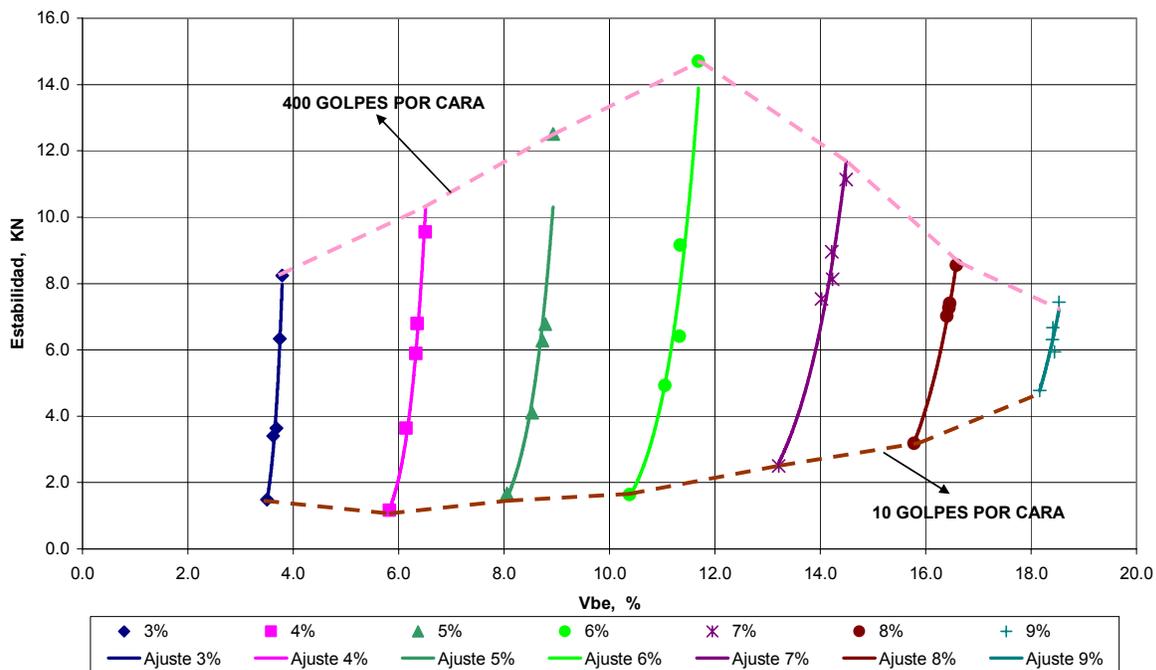


Figura 7.6. Estabilidad vs Volumen de asfalto efectivo (Vbe) para mezclas con diferentes contenidos de cemento asfáltico.

15. Para una misma combinación agregado-asfalto, como se ve en la Figura 7.7, el incremento en el contenido de VFA da como resultado un incremento en la estabilidad de la mezcla. Además, los mayores valores de estabilidad se encuentran cercanos a los contenidos óptimos de asfalto, pero teniendo una alta variabilidad en los valores de VFA.

¹ Los contenidos óptimos de bitumen varían entre 6.4 y 7.0 % dados por peso total de la mezcla, (observar el Anexo # 2), lo que corresponde a contenidos de Vbe de aproximadamente entre 10 y 14 %.

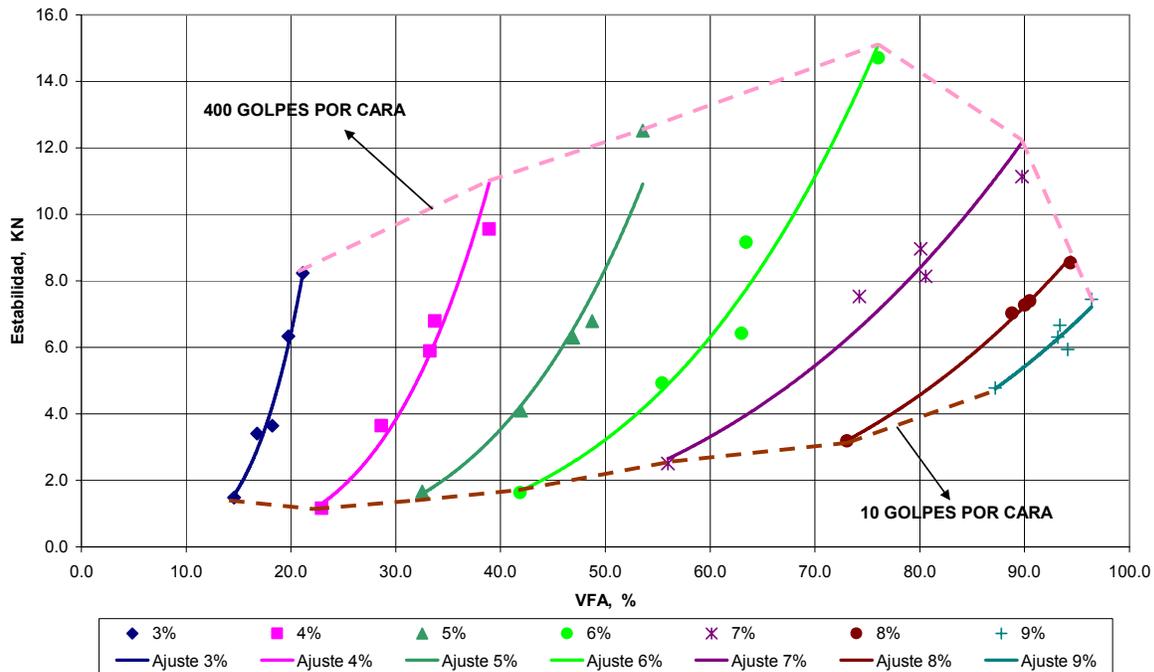


Figura 7.7. Estabilidad vs Vacíos llenos con asfalto (VFA) para mezclas con diferentes contenidos de cemento asfáltico.

16. La compactación es más eficiente desde el punto de vista de la reducción de vacíos, en las mezclas con contenidos de cemento asfáltico bajos. Además, es más eficiente desde el punto de vista del comportamiento mecánico (mayores valores de estabilidad), en los puntos cercanos a los contenidos óptimos de bitumen¹.

17. Observando la Figura 7.8, se puede concluir que independientemente del contenido de bitumen (o sea para cualquier mezcla), la relación entre VMA y estabilidad es única. O expresado de una forma diferente, la relación entre VMA y estabilidad, es independiente tanto del contenido de asfalto, como de la energía de compactación, mostrando una sola tendencia, así: a menor estabilidad, mayor VMA, y a mayor estabilidad, menor VMA. En consecuencia, un límite superior para esta parámetro volumétrico, podría sugerirse para garantizar un valor mínimo de estabilidad. En la Figura 7.9, se ilustra la correlación entre VMA y estabilidad, surgida del ajuste

¹ Los contenidos óptimos de bitumen varían entre 6.4 y 7.0 % dados por peso total de la mezcla, (Anexo # 2)



estadístico de los resultados obtenidos en el laboratorio, al elaborar y evaluar las 105 briquetas fabricadas durante esta primera fase de la investigación.

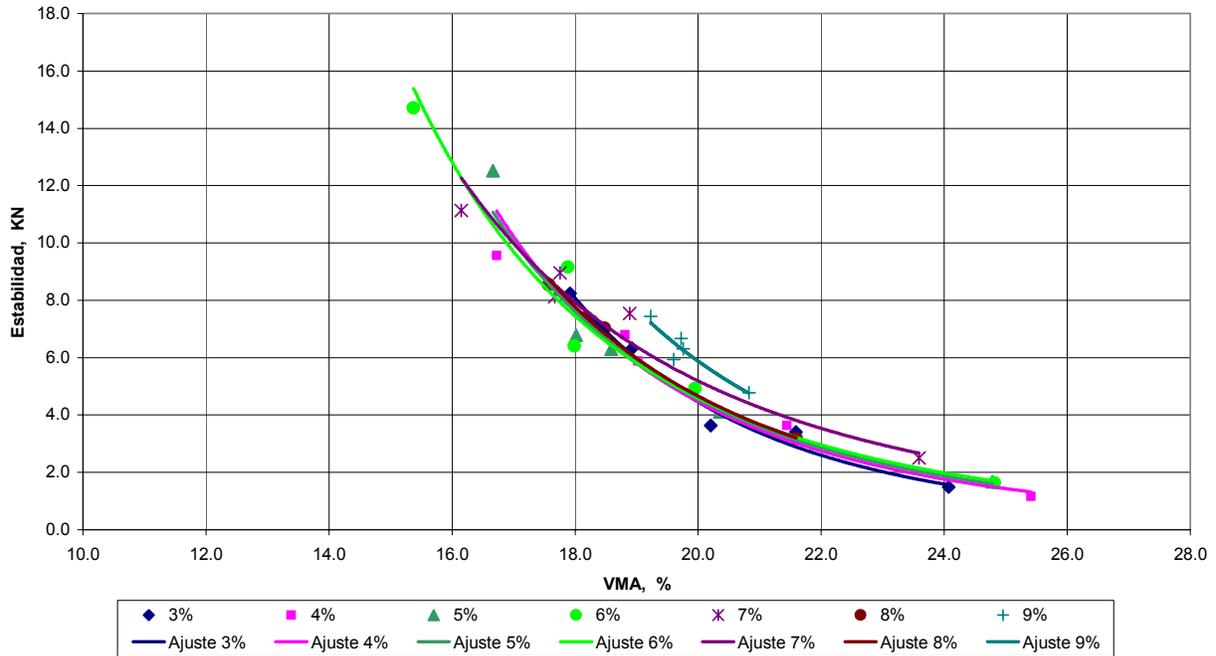


Figura 7.8. Estabilidad vs Vacíos en los agregados minerales (VMA) para mezclas con diferentes contenidos de cemento asfáltico.

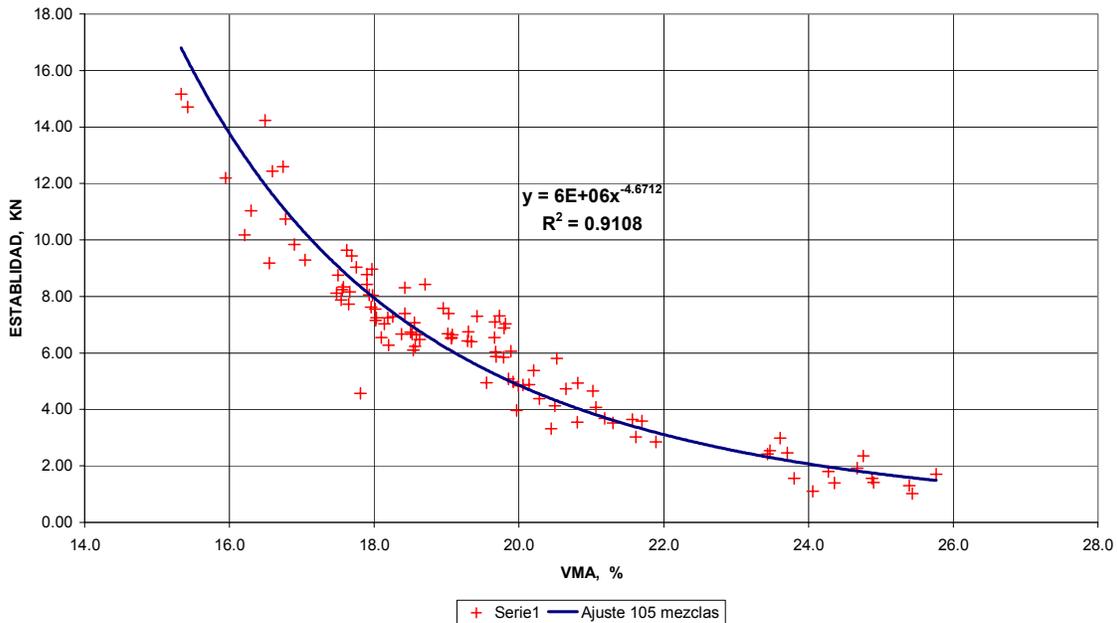


Figura 7.9. Estabilidad vs Vacíos en los agregados minerales para las 105 briquetas elaboradas.



18. La relación volumétrica que mejor correlaciona con la estabilidad, es la de vacíos en el agregado mineral (VMA); además, los mayores valores de estabilidad se encuentran en los valores más bajos de VMA. Lo anterior, sumado al hecho que este parámetro volumétrico es una medida directa de la concentración de agregado en una mezcla (Observar en el Anexo 3 la deducción de la fórmula para el VMA), permite concluir que la “resistencia mecánica” de las MAC está principalmente influenciada por las características y la cantidad del agregado mineral, que puede ser controlado a través del VMA.

19. Al ubicar simultáneamente en la CVU, las trayectorias de compactación y las especificaciones de diseño actualmente vigentes en Colombia, (Cuadros 7.1 y 7.2 y Figuras 7.10 y 7.11), puede deducirse que desde el punto de vista de la estabilidad de las MAC, mezclas de comportamientos apreciablemente diferentes, cumplen los requisitos volumétricos. Por lo tanto, parámetros complementarios (diferentes a los volumétricos), podrían hacer parte del criterio para la elección adecuada de una mezcla.

Cuadro 7.1. Especificaciones Colombianas de diseño, Tráfico medio y 1/2'' de TMNA.

Especificaciones INV-02 (Tráfico medio y 1/2" de TMNA)			
Vbe	Va	VMA	VFA
10.0	5.0	15.0	66.7
11.7	3.3	15.0	78.0
17.7	5.0	22.7	78.0

Cuadro 7.2. Estabilidades calculadas a partir de las correlaciones encontradas.

ESTABILIDADES CALCULADAS				PROMEDIO
Vbe	Va	VMA	VFA	
14.5	25.6	19.2	17.2	19.1
15.0	20.9	19.2	18.7	18.5
2.9	4.0	2.8	3.0	3.2

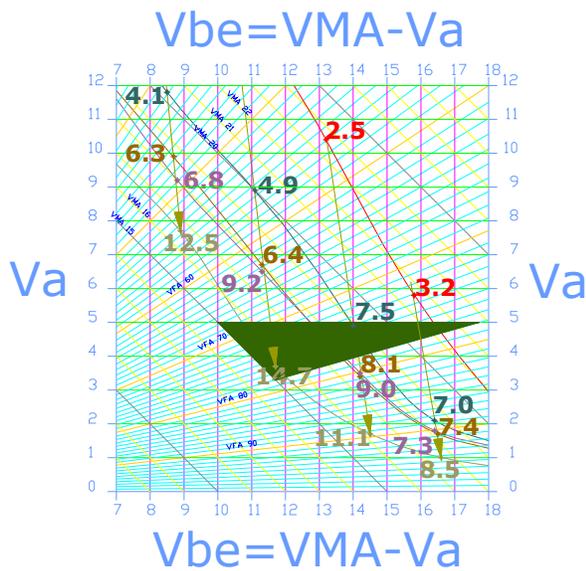


Figura 7.10. Valores medidos de estabilidad y especificaciones INV-2002.

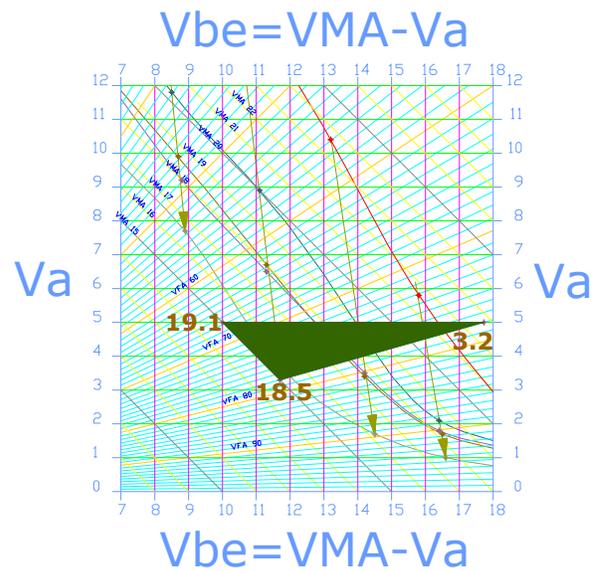


Figura 7.11. Valores calculados de estabilidad a partir de las correlaciones encontradas y especificaciones INV-2002.

20. Las especificaciones de diseño de MAC, Finlandesas y Norteamericanas son diferentes, sin embargo las mezclas funcionan adecuadamente en cada ambiente de trabajo en el cual están implementadas. Una parte de la explicación para esta diferencia radica en los distintos climas de estas dos regiones y en el uso desigual de cadenas metálicas -que tienen efectos abrasivos sobre las carpetas asfálticas de rodadura-durante el invierno. Esto sumado al hecho que los métodos actuales de diseño empíricos, tienen aun una relevante importancia, ha llevado a establecer criterios de diseño, de acuerdo al uso principal de las carpetas asfálticas en cada región. En los Estados Unidos, país de clima más benigno que el de Finlandia, para mezclas de gradación densa es permitido usar entre 3 y 5% de contenido de aire, (evitando un mecanismo de falla de las MAC denominado ahuellamiento por densificación); además, las especificaciones de construcción recomiendan compactar la mezcla para obtener un promedio de V_a , del 7 al 8%, para que la compactación adicional provocada por el tráfico en los primeros años de servicio de la vía, de como resultado un contenido de aire dentro del intervalo permitido por las especificaciones. En contraste con lo anterior, en Finlandia, país de clima



extremadamente frío, las mezclas para carpetas asfálticas pueden tener un contenido de aire entre 1 y 3%, (siendo mezclas más rígidas que las que se obtienen al cumplir las especificaciones Norteamericanas y evitando el principal factor de deterioro de las MAC en climas fríos, que es el desgaste ocasionado por las llantas con cadenas, de uso común en la estación de invierno), en tanto que las especificaciones de construcción recomiendan colocar la mezcla con un V_a entre 1 y 7%, dependiendo tanto del tráfico como del tamaño máximo del agregado, y considerando la compactación ocasionada por el tráfico como insignificante.

21. Las diferencias volumétricas para las especificaciones citadas antes, son evidentes; sin embargo al colocar en la CVU algunas características mecánicas como los módulos dinámicos¹ calculadas con base en el modelo Hirsch², a partir de la información volumétrica de mezclas hipotéticas ubicadas en los límites permitidos por estas especificaciones, Cuadros 7.3 y 7.4 y Figuras 7.12 y 7.13,

Cuadro 7.3. Especificaciones TAI-94, mezcla densa, tráfico medio y 1/2'' de TMNA.

Especificaciones TAI-94 (Tráfico medio y 1/2" de TMNA)			
Vbe	Va	VMA	VFA
10.0	5.0	15.0	66.7
10.0	3.0	13.0	76.9
10.6	3.0	13.6	78.0
17.7	5.0	22.7	78.0

Cuadro 7.4. Especificaciones PANK-00, para AC.

Especificaciones PANK (Para AC*)			
Vbe	Va	VMA	VFA
10.4	2.6	13.0	80.0
11.7	1.3	13.0	90.0
15.3	1.7	17.0	90.0
14	3	17.0	82.4
12	3	15.0	80.0

* Concreto asfáltico con una curva de gradación continua y un bitumen que tiene una penetración de menos de 330 1/10 mm a 25°C.

¹ E* módulo dinámico axial y G* módulo dinámico cortante.

² La fundamentación teórica para E* y G* de las MAC, junto con la presentación y aplicación del modelo Hirsch se encuentran en el Anexo # 5.

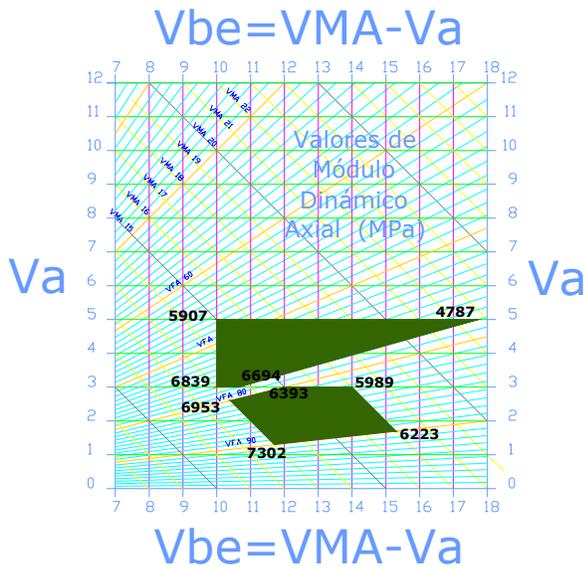


Figura 7.12. Valores de E^* calculados con el modelo Hirsch y especificaciones PANK 2000 y TAI 1994.

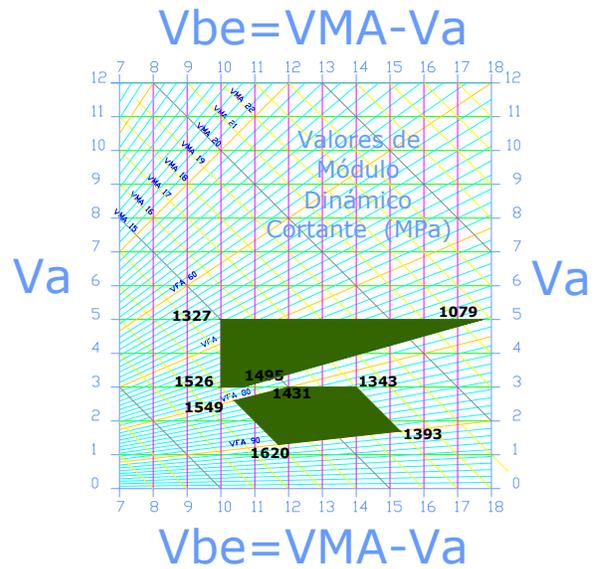


Figura 7.13. Valores de G^* calculados con el modelo Hirsch y especificaciones PANK 2000 y TAI 1994.

se puede observar un comportamiento común para estas mezclas, como es que dichas características mecánicas tienen valores de magnitud semejante, alrededor de las líneas de igual VMA. Estas mezclas hipotéticas, obviamente serían exitosas en su contexto. Esto coincide con el mensaje que plantea la Profesora Terhi Pellinen, de la Universidad de Purdue, quien bosqueja de forma teórica (como se observa en la Figura 7.14) la relación entre los mecanismos de falla de las MAC y las propiedades mecánicas de estas. Obteniendo un criterio universal y racional que después de ser probado se podría incluir en los métodos de diseño actuales para las MAC. Además, estas propiedades mecánicas pueden ser evaluadas con los parámetros volumétricos de las mezclas.

22. De manera conceptual, un método de diseño futuro buscaría primero predecir el mecanismo típico de falla de la mezcla en su contexto, establecer un criterio límite en donde la carpeta asfáltica no pierda su funcionalidad, encontrar el concepto de temperatura de ensayo que semeje mejor el ambiente de trabajo de la mezcla, escoger una característica mecánica fundamental de la misma, que refleje su comportamiento, y



finalmente escoger el modelo matemático adecuado que correlacione su comportamiento, con la característica mecánica y con la intensidad del tráfico (Figura 7.15). Después, examinar varios sitios con diferentes climas, para establecer un criterio general (Figura 7.16). Por lo tanto, el hacer una correlación entre las propiedades volumétricas de las mezclas y sus características mecánicas es un paso fundamental para la solución de los futuros diseños, dado que los equipos de laboratorio requeridos para la evaluación de dichas características son costosos y de difícil consecución.

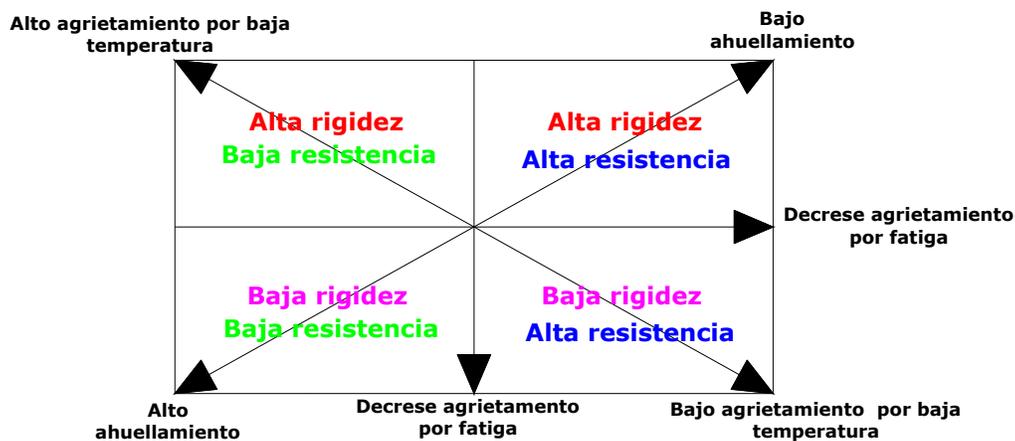


Figura 7.14. Rigidez y esfuerzo vs. varios mecanismos de falla de las MAC.

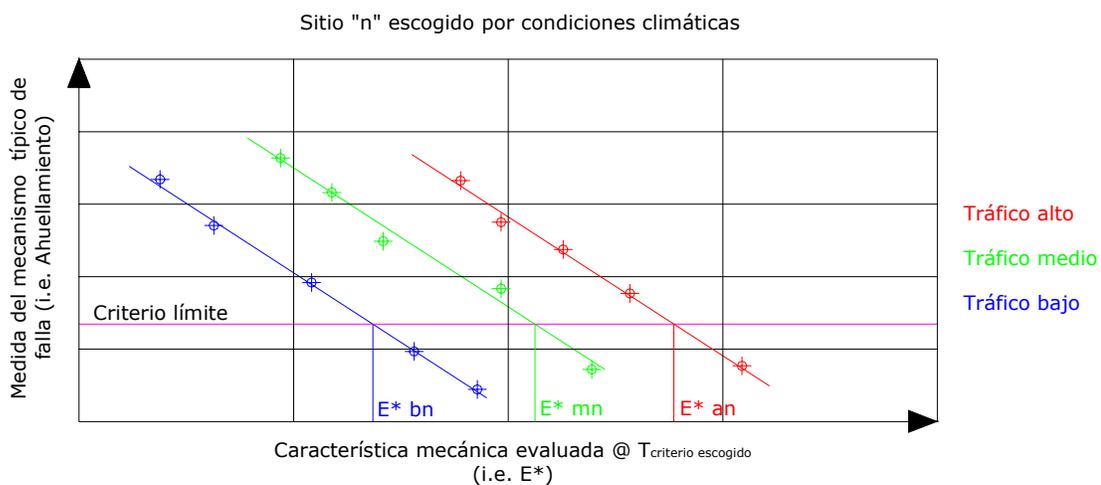


Figura 7.15. Gráfica para obtener la característica mecánica mínima para el sitio “n”, en función de los diferentes niveles de tráfico.

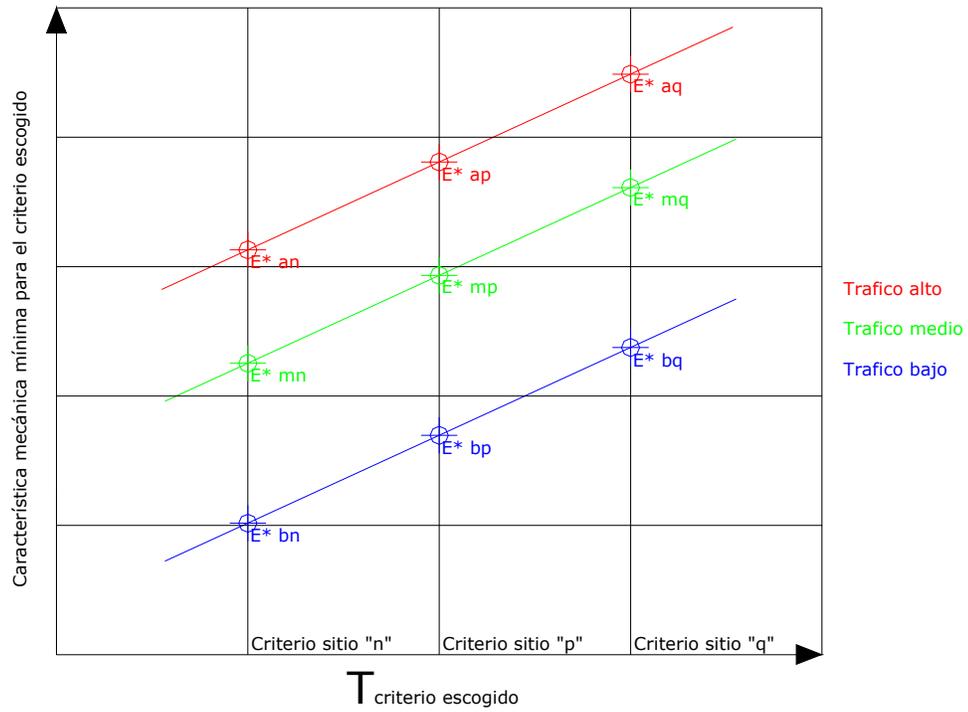


Figura 7.16. Gráfica final para el diseño en diferentes climas y tráfico.

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

1. De manera análoga a como se han cambiado en las últimas décadas, los métodos de diseño de estructuras de pavimento, pasando de técnicas empíricas a procedimientos mecanístico-empíricos, existe también una tendencia internacional sobre métodos modernos de diseño de MAC, basados en el funcionamiento mecánico de la mezcla, el cual está íntimamente relacionado con sus características volumétricas.
2. Hay actualmente métodos de diseño de mezclas basados exclusivamente en características volumétricas de las mezclas, tales como V_a , V_{be} , VMA, VFA, cuyos valores inciden notoriamente en la magnitud de las propiedades mecánicas de las MAC.
3. La CVU es una sencilla y valiosa herramienta que además de tener características pedagógicas, permite mostrar de manera simplificada, la ubicación y movilidad de los parámetros mecánicos de las MAC, que pueden asociarse con los parámetros volumétricos de éstas.
4. En esta primera etapa de la investigación, se realizaron mediciones de estabilidad Marshall como “característica mecánica” de las mezclas, a las mismas briquetas a las cuales se les determinaron sus relaciones volumétricas (V_a , V_{be} , VMA, VFA), sobre el principio de que el Método de Diseño Marshall tiene aun relevancia en el medio de los pavimentadores asfálticos colombianos.
5. La estabilidad de las MAC tiene una relación directa con la energía de compactación, proporcionada por el martillo Marshall; sin embargo, desde el punto de vista volumétrico las diferencias no son fácilmente apreciables, cuando la energía de compactación no presenta una alta variación. En contraste con esto, la especificación Colombiana para el Diseño Marshall, tiene una sola energía de compactación para los diferentes niveles de tráfico, pero diferentes valores límites para los parámetros volumétricos y de estabilidad.



6. El VMA es un parámetro clave en el diseño de las MAC, dado que es un factor volumétrico que controla la concentración del agregado en la mezcla y éste a su vez determina en alto porcentaje el comportamiento mecánico de la misma.
7. Cuando el VMA es muy grande la estabilidad disminuye bastante, lo cual induce a pensar que sería conveniente establecer un valor límite superior de este parámetro
8. El volumen de asfalto efectivo (V_{be}) es una medida del asfalto que realmente está aportando al funcionamiento de la mezcla; es un parámetro fácilmente calculable y de poca variabilidad en función de la energía de compactación para una misma mezcla; por lo tanto establecer un criterio límite explícito para este parámetro volumétrico, podría sugerirse para los métodos de diseño de las MAC.
9. La estabilidad Marshall es un parámetro mecánico en desuso. En el futuro se considerará prioritario determinar la rigidez de las mezclas mediante su módulo dinámico axial $|E^*|$ y/o los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante, como son el ángulo de fricción interna ϕ y la cohesión C . Después han de encontrarse, probarse y calibrarse los modelos matemáticos que correlacionen estos parámetros – que están asociados a las relaciones volumétricas -, con los mecanismos típicos de falla en las mezclas asfálticas en caliente, para establecer criterios mínimos de rigidez y resistencia, de acuerdo a los requerimientos (tráfico y temperatura de trabajo) de las MAC.

BIBLIOGRAFÍA.

1. B. Amit, J. Button, y A. Chowdhury, “Evaluation of Simple Performance Test on HMA Mixtures”, Texas Transportation Institute, TTI, Agosto 2005.
2. R. Brown, “Density of asphalt concrete- how much is needed?”, National Center for Asphalt Technology, NCAT, Enero 1990.
3. R. Brown, y S. Cross, “Comparison of Laboratory and Field Density of Asphalt Mixtures”, National Center for Asphalt Technology, NCAT, Enero 1991.
4. R. Brown, y S. Cross, “A national Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements”, National Center for Asphalt Technology, NCAT, 1992.
5. D. Christensen, y R. Bonaquist, “Ternary property maps for asphalt concrete”, Proceedings, de Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 72, p. 27, Marzo 2003.
6. D. Christensen, T. Pellinen y R. Bonaquist, “Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete”, Proceedings, de Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 72, p. 97. Marzo 2003.
7. D. Christensen, y R. Bonaquist, “VMA: one key to mixture performance”, Advance Asphalt Technologies, LLC, Febrero 2005.
8. T. Clyne y M. Marasteanu, “Dynamic and resilient modulus of Mn/DOT asphalt mixtures”, Department of transportation Minnesota, Septiembre 2003.

9. R. Cominsky, G. Huber, T. Kennedy, y M. Anderson, The Superpave mix design manual for new construction and overlays, Strategic Highway Research Program, 1994.
10. B. Coree, y W. Hislop, The difficult nature of minimum VMA: A historical perspective, Center for Transportation Research and Education, CTTRE, y Iowa State University, Noviembre 1998.
11. B. Coree, HMA Volumetrics revisited – A new paradigm, Center for Transportation Research and Education, CTTRE, y Iowa State University, 1999.
12. B. Coree, y W. Hislop, VMA as a design parameter in hot-mix asphalt, Proceedings de Simposio de Transporte del continente medio, 2000.
13. B. Coree, y W. Hislop, A laboratory investigation into the effects of aggregate-related factors of critical VMA in asphalt paving mixtures, Center for Transportation Research and Education, CTTRE, y Iowa State University, Junio 2000.
14. A. Faheem, Using the gyratory compactor to measure mechanical stability asphalt mixtures, Wisconsin Highway Research Program, Octubre 2004.
15. P. Garnica, H. Delgado, J. Gómez, S. Romero, y otros, Aspectos del diseño volumétrico de mezclas, Instituto Mexicano del Transporte, IMT, 2004.
16. J. Gould, Y. Nanagiri, R. Mallick, J. Petrucell, y otros, An evaluation of use of rapid triaxial in quality of hot mix asphalt (HMA), Transportation Research Board, TRB, 2003.
17. T. Harman, Using the dynamic modulus test to assess the mix strength of HMA, Public Roads, Mayo-Junio 2001.

18. E. Harrigan, The superpave mix design system manual of specification, test methods, and practices, Strategic Highway Research Program, Noviembre 1994.
19. M. Huner y R. Brown, Effects of re-heating and compactation temperature on hot mix asphalt volumetrics, National Center for Asphalt Technology, NCAT, Noviembre 2001.
20. P. Khandal, K. Foo, J. D'Angelo, Field management of hot mix asphalt volumetric properties, National Center for Asphalt Technology, NCAT, Diciembre 1995.
21. P. Khandal, y S. Chakraborty, Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures, National Center for Asphalt Technology, NCAT, Marzo 1996.
22. P. Khandal, K. Foo, R. Mallick, A critical review of VMA requirements in Superpave, National Center for Asphalt Technology, NCAT, Enero 1998.
23. D. Lee, P. Khandal, J. Guinn, R. Dunning, Absorption of asphalt into porous aggregates, Strategic Highway Research Program, 1990.
24. T. Masada, S. Sargand, B. Abdalla, L. Figueroa, Material properties for implementation of mechanistic-empirical (M-E) pavement design procedures, Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, ORITE, Febrero 2004.
25. D. Newcomb, y J. Epps, Statistical specifications for hot mix asphalt: What do we need to know?, Hot mix asphalt technology, Enero-Febrero 2001.
26. D. Newcomb, y J. Epps, Statistical specifications for hot mix asphalt: What do we need to know?, Hot mix asphalt technology, Marzo-Abril 2001.
27. D. Newcomb, y J. Epps, Performance related specifications, Hot mix asphalt technology, Mayo-Junio 2001.

28. T. Pellinen, Investigation of use of dynamic modulus as an indicator of hot-mix asphalt performance, Disertación presentada como requerimiento parcial para optar al título de Doctor of Philosophy, Arizona State University, Mayo 2001.
29. T. Pellinen, D. Christensen, G. Rowe, M. Sharrock, Fatigue transfer functions – How do they compare?, Transportation Research Board, TRB, 2004.
30. T. Pellinen, J. Song, S. Xiao, Characterization of hot mix asphalt with varying air voids contents using Triaxial shear strength test, Proceedings de Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Septiembre 2004.
31. T. Pellinen, Conceptual performance criteria for asphalt mixtures, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 72, p. 337, 2004.
32. S. Saadeh, E. Masad, K. Stuart, A. Abbas, Comparative analysis of axial and shear viscoelastic properties of asphalt mixes, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 72, AAPT, p. 337, 2004.
33. M. Witczak, K. Kaloush, T. Pellinen, M. El-Basyouny, y otros, Simple performance test, National Cooperative Highway Research Program, 2002.
34. J. Zaniewsky y J. Nelson, Comparison of 9.5mm Superpave and Marshall wearing 1 mixes in West Virginia, Asphalt Technology Program Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, Junio 2003.
35. J. Zaniewsky y V. Kanneganti, Comparison of 19mm Superpave and Marshall base 2 mixes in West Virginia, Asphalt Technology Program Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia, Junio 2003.

36. J. Zhang, A. Cooley, P. Kandhal, Comparison of fundamental and simulative test methods for evaluating permanent deformation of hot mix asphalt, National Center for Asphalt Technology, Octubre 2002.

AUTORES CORPORATIVOS.

37. ____, A guide to the design of hot-mix asphalt in tropical and sub-tropical countries, Department for International Development, DFID, Primera Edición, Londres 2002.

38. ____, Annual books of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, ASTM, 1991.

39. ____, Finnish asphalt specifications, Finnish pavement technology advisory council, PANK, Helsinki 2000.

40. ____, Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types, The Asphalt Institute, TAI, Segunda edición, Maryland 1962.

41. ____, Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types, The Asphalt Institute, TAI, Sexta edición, Kentucky 1996.

42. ____, National asphalt specification, Australian Asphalt Pavement Association, Segunda edición, Kew Victoria 2004.

43. ____, Standard specification for Superpave volumetric mix design, American Association of State Highway and Transportation Officials, Designación M-323, 2005.

44. ____, Superpave 2000 – Improved standards for new millennium, Canadian Strategic Highway Research Program, Lectura técnica # 17, Canadá Septiembre 1999.

45. ____, Superpave mixture design guide, Westrack Forensic Team, Washington D.C.,
Febrero 2001.

ANEXO 1

GRAVEDADES ESPECÍFICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE LAS MEZCLAS



Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos

DESCRIPCIÓN: Investigación

SONDEO N° _____

PROCEDENCIA Ecocivil Ltda

FECHA octubre 31 de 2005

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO

PRUEBAS	1	2	3	4	PROMEDIO
A. (g)	734.4	723.8	717.6	686.0	
B. (g)	751.4	740.2	733.6	703.1	
C. (g)	463.0	457.7	453.6	434.7	
B - C	288.4	282.5	280.0	268.4	
A - C	271.4	266.1	264.0	251.3	
B - A	17.0	16.4	16.0	17.1	
Gs, BULK=A/(B-C)	2.546	2.562	2.563	2.556	2.557
Gs, BULK SSS=B/(B-C)	2.605	2.620	2.620	2.620	2.616
Gs, APARENTE=A/(A-C)	2.706	2.720	2.718	2.730	2.718
ABSORCIÓN, % =(B-A)/A*100	2.315	2.266	2.230	2.493	2.326

- A PESO EN EL ALRE DE LA MUESTRA SECA EN GRAMOS
B PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN GRAMOS
C PESO EN EL AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA
Gs GRAVEDAD ESPECÍFICA

OBSERVACIONES: _____

JEFE DE LABORATORIO

LABORATORISTA



DESCRIPCIÓN: Investigación

SONDEO N° _____

PROCEDENCIA Ecocivil Ltda

FECHA noviembre 3 de 2005

**GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN
AGREGADO FINO**

PRUEBAS	1	2	3	PROMEDIO	DESCRIPCIÓN	
MATRAZ N°	3	7	19			
TEMPERATURA °c	20.5	20.5	20.5			
Wpa (g)	647.3	656.2	667.1			PESO DE AGUA Y PICNÓMETRO
Wpas (g)	802.7	811.7	822.7			PESO PICNÓMETRO SUELO Y AGUA
Ws (g)	244.9	245.0	245.0			PESO SECO DEL SUELO=PESO DE SÓLIDOS
Vs=Wpa-(Wpas-Ws) (cm ³)	89.5	89.5	89.4			VOLUMEN DE SÓLIDOS
Ww=(250-Ws) (g)	5.1	5.0	5.0			AGUA EN LOS POROS DE LAS PARTÍCULAS
Vss=(Vs+Ww) (g)	94.6	94.5	94.4		94.5	VOL. DE SÓLIDOS SATURADOS CON LA HUMEDAD EQUIVALENTE
Gs=Ws/Vss	2.589	2.593	2.595		2.592	PESO BULK O DENSIDAD SECA
Gss=250/Vss	2.643	2.646	2.648	2.646	DENSIDAD APARENTE	
G=Ws/(Vss-Ww)	2.736	2.737	2.740	2.738	GRAVEDAD ESPECÍFICA O RELATIVA	
Aos. % =Ww/Ws*100	2.082	2.041	2.041	2.055	ABSORCIÓN	

OBSERVACIONES: _____

JEFE DE LABORATORIO

LABORATORISTA



DESCRIPCIÓN: Investigación

SONDEO N° _____

PROCEDENCIA Ecocivil Ltda

FECHA octubre 31 de 2005

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SUELOS FINOS

PRUEBA	1	2	3	PROMEDIO
T °c	19.1	19.1	20.0	
MATRAZ	3	7	19	
Wfw (g)	647.4	656.3	667.1	
Wfsw (g)	679.6	688.5	699.3	
Ws	50.0	50.0	50.0	
K	1.0002	1.0002	1.0000	
Ws/Wfw-Wfs	17.8	17.8	17.8	
Ss*G	2.810	2.810	2.809	

Wfw PESO MATRAZ+AGUA A T °C HASTA EL NIVEL DE ENRASE (CURVA DE CALBRACIÓN)

Wfsw PESO MATRAZ +AGUA+SUELO

Ws PESO SUELO SECO

Ws+Wfw+Wfsw Vol. Desalojado

$$S = \frac{W_s * K}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}}$$

S PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SÓLIDOS

T °C	18	19	20	21	22	23	24
DENSIDAD RELATIVA DEL AGUA	0.9986244	0.9984347	0.9982343	0.9980233	0.9978018	0.9975702	0.9973286
FACTOR DE CORRECCIÓN K	1.0004	1.0002	1.0000	0.9998	0.9996	0.9993	0.9991
T °C	25	26	27	28	29	30	
DENSIDAD RELATIVA DEL AGUA	0.9970770	0.9968156	0.9965451	0.9962652	0.9959761	0.9956780	
FACTOR DE CORRECCIÓN K	0.9989	0.9986	0.9983	0.9980	0.9977	0.9974	

OBSERVACIONES: _____

 JEFE DE LABORATORIO

 LABORATORISTA



Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos

DESCRIPCIÓN: Investigación _____ ORIGEN AC 80-100 Barrancabermeja

PROCEDENCIA Ecocivil Ltda FECHA enero 15 de 2006

PESO ESPECÍFICO CEMENTO ASFÁLTICO

PRUEBA	1	2	PROMEDIO
PICNÓMETRO	5.0	742.0	
A	22.605	31.66	
B	47.5	58.2	
C	43.3	51.4	
D	47.7	58.4	
PESO ESPECÍFICO	1.010	1.011	1.010

$$PESO_ESPECÍFICO = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

- A: PESO DEL PICNÓMETRO (INCLUIDO EL TAPÓN), (g)
B: PESO DEL PICNÓMETRO EN EL PROGRAMA, (g)
C: PESO DEL PICNÓMETRO PARCIALMENTE CON ASFALTO, (g)
D: PESO DEL PICNÓMETRO CON ASFALTO Y CON AGUA, (g)

OBSERVACIONES: _____

JEFE DE LABORATORIO

LABORATORIS

ANEXO 2

DISEÑOS MARSHALL PARA LAS ENERGÍAS DE COMPACTACIÓN DE 35, 50 Y 75 GOLPES POR CARA

**FÓRMULAS DE THE ASPHALT INSTITUTE
PARA LA SOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL
DISEÑO MARSHALL**

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DEL AGREGADO TOTAL (G_{sb})

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (1)$$

P₁, P₂, ..., P_n: porcentajes individuales de agregado por peso
G₁, G₂, ..., G_n: gravedades específicas bulk individuales

GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL AGREGADO (G_{se})

$$G_{se} = \frac{\frac{P_{mm} - P_b}{P_{mm}}}{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (2)$$

G_{mm}: gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica medida en el ensayo ASTM D 2041 de la mezcla asfáltica
P_{mm}: porcentaje total de la mezcla, por peso=100
P_b: contenido de asfalto con el cual fue realizado el ensayo ASTM D 2041, porcentaje por peso total de la mezcla
G_b: gravedad específica del cemento asfáltico

**GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA DE MEZCLAS CON DIFERENTES
CONTENIDOS DE ASFALTO (G_{mm})**

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

P_{mm}: porcentaje total de la mezcla, por peso=100
P_s: contenido de agregado, porcentaje por peso total de la mezcla
P_b: contenido de asfalto, porcentaje por peso total de la mezcla
G_{se}: gravedad específica efectiva del agregado

Gb: gravedad específica del asfalto
ABSORCIÓN DE ASFALTO (Pba)
 (Porcentaje por peso total del agregado)

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} * Gb \quad (4)$$

Gse: gravedad específica efectiva del agregado
 Gsb: gravedad específica bulk del agregado
 Gb: gravedad específica del asfalto

CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA (Pbe)
 (Porcentaje por peso total de la mezcla)

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps \quad (5)$$

Pb: contenido de asfalto, porcentaje por peso total de la mezcla
 Pba: asfalto absorbido, porcentaje por peso de agregado
 Ps: contenido de agregado, porcentaje por peso del total de la mezcla

PORCENTAJE DE VMA EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA (VMA)
 (Vacíos en el Agregado Mineral, porcentaje del volumen total de la mezcla)

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb} \quad (6)$$

Gsb: gravedad específica bulk del agregado total
 Gmb: gravedad específica bulk de la mezcla compactada ASTM D 1188
 Ps: contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla

**PORCENTAJE DE VACÍOS CON AIRE EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA
 COMPACTADA (Va)**
 (Porcentaje del volumen total de la mezcla)

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (7)$$

Gmm: gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica, determinada de x o medida mediante ASTM D 2041
 Gmb: gravedad específica bulk de la mezcla compactada

PORCENTAJE DE VFA EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA (VFA)
 (Vacíos LLenos con Asfalto, porcentaje de los VMA)

$$VFA = 100 * \frac{VMA - Va}{VMA} \quad (8)$$

VMA: vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk de la mezcla
 Va: vacíos llenos con aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total de la mezcla

VOLUMEN DE ASFALTO EFECTIVO (Vbe)
 (Porcentaje del volumen total de la mezcla)

$$Vbe = VMA - Va \quad (9)$$

La ecuación anterior no la presenta el TAI en su texto dedicado a las mezclas asfálticas, dado que dicho instituto no tiene actualmente ninguna especificación explícita para el volumen efectivo de asfalto

Cuadro A.2.1 Gravedades específicas de los materiales constituyentes de la mezcla.

MATERIAL	GRAVEDADES ESPECÍFICAS	COMPOSICIÓN DEL AGREGADO
CEMENTO ASFÁLTICO	(G b)	-
AGREGADO GRUESO	G1	40.5
AGREGADO FINO	G2	53.5
LLENANTE MINERAL	G3	6

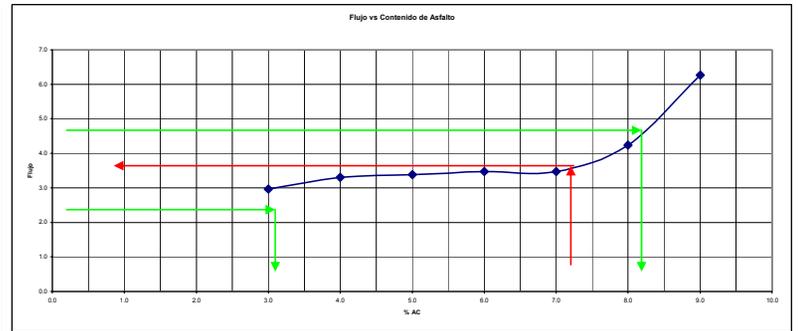
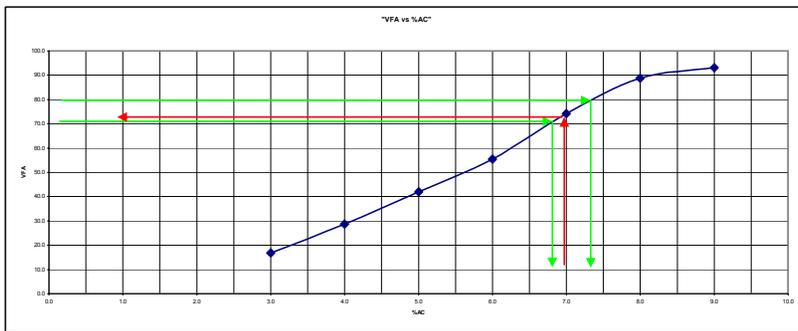
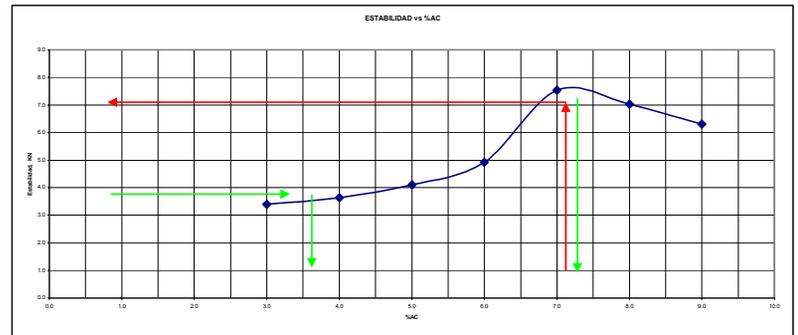
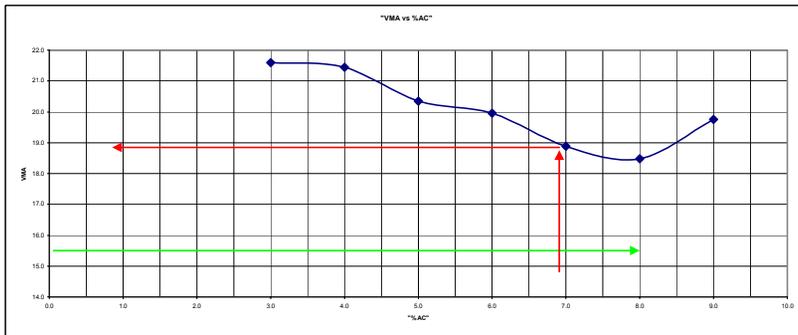
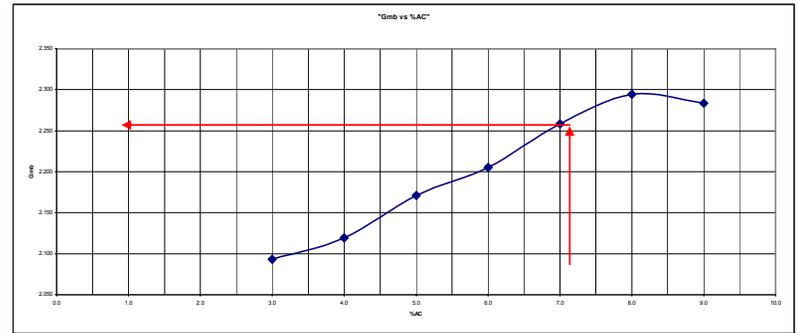
Cuadro A.2.2. Especificaciones del TAI para un TMNA de 1/2", correspondiente a una MDC-2 de las especificaciones del INV.

País Especificaciones para TMNA de 1/2 "	Estados Unidos		
	TAI-94		
	Tráfico Bajo	Tráfico Medio	Tráfico Alto
Compactación	35	50	75
Estabilidad (Kgf)	339	543	814
Estabilidad (KN)	3.3	5.3	8.0
Flujo (mm)			
Mínimo	2	2	2
Máximo	4.6	4.1	3.6
Va (%)			
Mínimo	3	3	3
Fijo	-	-	-
Máximo	5	5	5
VMA (%)			
Mínimo	13,15	13,15	13,15
Máximo	-	-	-
VFA (%)			
Mínimo	70	65	65
Fijo	-	-	-
Máximo	80	78	75

Cuadro A.2.3. Hoja de trabajo para diseño Marshall, tráfico bajo (35 golpes por cara).

HOJA DE TRABAJO PARA ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS DE PAVIMENTO COMPACTADAS (ANALISIS POR PESO TOTAL DE LA MEZCLA)													
Muestra:		agregados Ecocivil Ltda AC 80-100 Barrancabermeja						Fecha: noviembre de 2005					
Identificacion:		35 golpes por cara											
Indicador	Gravedad específica			Datos composición del agregado	Composición de la mezcla, % por peso total de la mezcla, P								
			Bulk		Número de mezcla o prueba								
						1	2	3	4	5	6	7	
1	Agregado grueso	G1		2.557	40.5	P1	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3
2	Agregado fino	G2		2.592	53.5	P2	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9
3	Lienante mineral	G3		2.809	6	P3	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
4	Agregado total	Gs			100	Ps	97	96	95	94	93	92	91
5	Cemento asfáltico	Gb	1.010			Pb	3	4	5	6	7	8	9
6	Gravedad específica bulk de todo el agregado				Gsb	1	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590
7	Gravedad específica máxima medida de la mezcla compactada				Gmm	-	2.552	2.502	2.462	2.420	2.374	2.343	2.315
8	Gravedad específica bulk de la muestra compactada				Gmb	-	2.093	2.119	2.171	2.205	2.259	2.295	2.283
9	Gravedad específica efectiva de todo el agregado				Gse	2	2.678	2.666	2.663	2.657	2.642	2.647	2.653
10	Asfalto absorbido, % por peso total del agregado				Pba	4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.8	0.8	0.9
Calculos													
11	Contenido de asfalto efectivo				Pbe	5	1.7	2.9	4.0	5.1	6.3	7.2	8.1
12	Vacíos en el agregado mineral				VMA	6	21.6	21.4	20.3	20.0	18.9	18.5	19.8
13	Vacíos llenos de aire				Va	7	18.0	15.3	11.8	8.9	4.9	2.1	1.4
14	Vacíos llenos con asfalto				VFA	8	16.8	28.6	41.9	55.4	74.2	88.8	93.2
15	Volumen efectivo de asfalto				Vbe	9	3.6	6.1	8.5	11.1	14.0	16.4	18.4
						Fórm.							
16	Estabilidad				-	-	3.4	3.6	4.1	4.9	7.5	7.0	6.3

Figuras A.2.1. Gráficas típicas para el diseño Marshall, tráfico bajo (35 golpes por cara).



Cuadro A.2.4. Chequeo de especificaciones del diseño Marshall, tráfico bajo (35 golpes por cara).

Mínimo	3.0	3.0	7.0	3.0	6.7	OK TODAS LAS ESPECIFICACIONES
Máximo	7.0	8.0	7.6	9.0	7.3	
%AC	Estabilidad	Flujo	Va	VMA	VFA	
3.1	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.2	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.3	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.4	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.5	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.6	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.7	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.8	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.9	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.1	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.2	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.3	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.4	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.5	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.6	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.7	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.8	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.9	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.1	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.2	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.3	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.4	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.5	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.6	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.7	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.8	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.9	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6.1	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6.2	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6.3	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6.4	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6.5	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6.6	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6.7	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.8	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.9	SI	SI	NO	SI	SI	NO
7	SI	SI	SI	SI	SI	SI
7.1	NO	SI	SI	SI	SI	NO
7.2	NO	SI	SI	SI	SI	NO
7.3	NO	SI	SI	SI	SI	NO
7.4	NO	SI	SI	SI	NO	NO
7.5	NO	SI	SI	SI	NO	NO
7.6	NO	SI	SI	SI	NO	NO
7.7	NO	SI	NO	SI	NO	NO
7.8	NO	SI	NO	SI	NO	NO
7.9	NO	SI	NO	SI	NO	NO
8	NO	SI	NO	SI	NO	NO
8.1	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.2	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.3	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.5	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.6	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.7	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.9	NO	NO	NO	SI	NO	NO
9	NO	NO	NO	NO	NO	NO

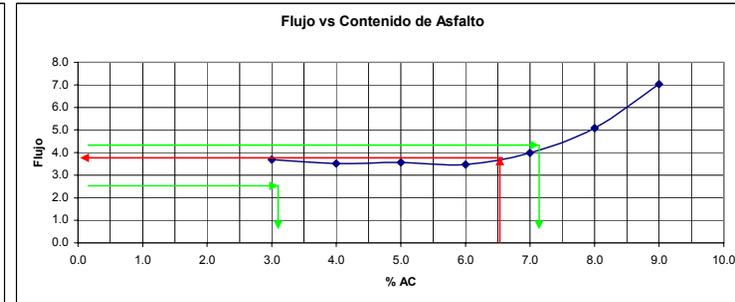
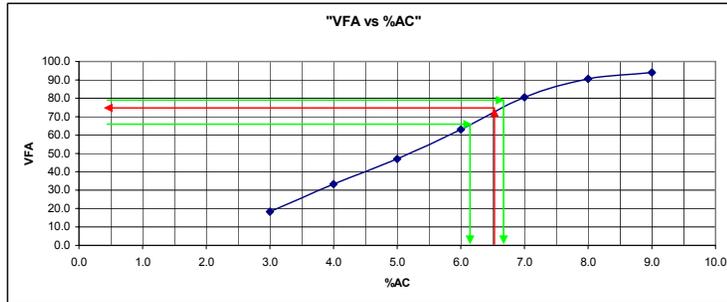
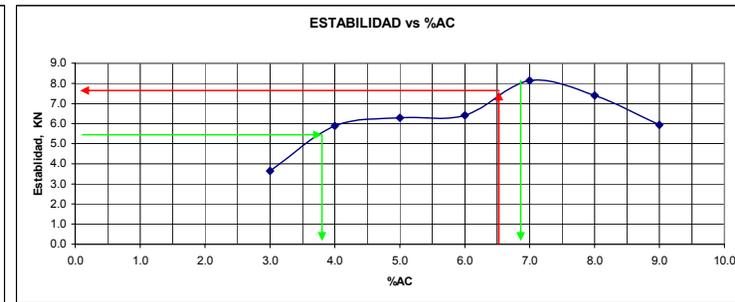
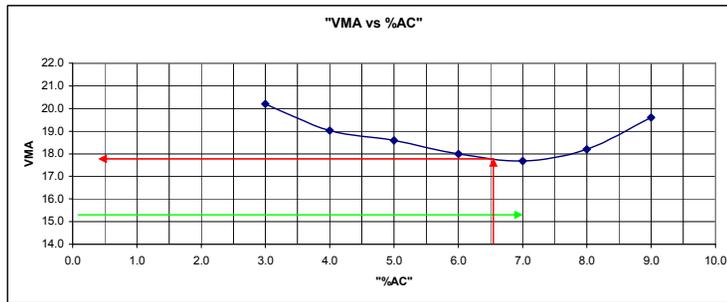
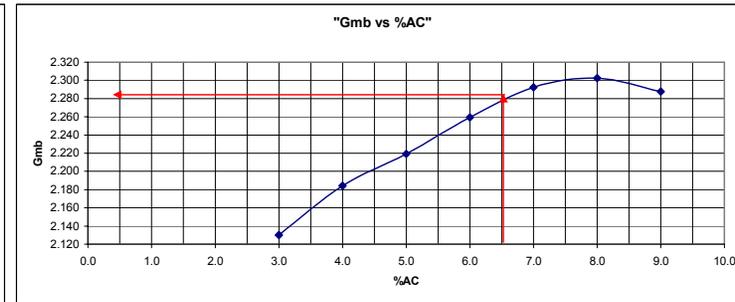
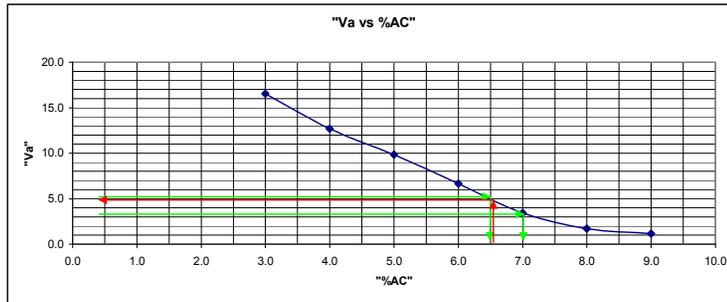
Cuadro A.2.5. Valores obtenidos para el porcentaje de asfalto escogido para el diseño Marshall, tráfico bajo (35 golpes por cara).

VALORES PARA UN CONTENIDO DE AC DE 7%				
Característica	ESPECIFICACIÓN		MEZCLA DISEÑADA	OK
	MIN	MAX		
Estabilidad (KN)	3.3	-	7.3	SI
Flujo	2	4.6	3.5	SI
Va	3	5	5	SI
VMA	15	-	18.9	SI
VFA	70	80	76	SI
Gmb	-	-	2.260	-

Cuadro A.2.6. Hoja de trabajo para diseño Marshall, tráfico medio (50 golpes por cara).

HOJA DE TRABAJO PARA ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS DE PAVIMENTO COMPACTADAS (ANALISIS POR PESO TOTAL DE LA MEZCLA)												
Muestra:		agregados Ecocivil Ltda AC 80-100 Barrancabermeja				Fecha: diciembre de 2005						
Identificacion		50 golpes por cara										
Indicador	Gravedad específica			Datos composición del agregado	Composición de la mezcla, % por peso total de la mezcla, P							
		Bulk			Número de mezcla o prueba							
					1	2	3	4	5	6	7	
1	Agregado grueso	G1		2.557	40.5	P1	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3
2	Agregado fino	G2		2.592	53.5	P2	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9
3	Llenante mineral	G3		2.809	6	P3	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
4	Agregado total	Gs			100	Ps	97	96	95	94	93	92
5	Cemento asfáltico	Gb	1.010			Pb	3	4	5	6	7	8
6	Gravedad específica bulk de todo el agregado				Gsb	1	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590
7	Gravedad específica máxima medida de la mezcla compactada				Gmm	-	2.552	2.502	2.462	2.420	2.374	2.343
8	Gravedad específica bulk de la muestra compactada				Gmb	-	2.130	2.184	2.219	2.259	2.292	2.303
9	Gravedad específica efectiva de todo el agregado				Gse	2	2.678	2.666	2.663	2.657	2.642	2.647
10	Asfalto absorbido, % por peso total del agregado				Pba	4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.8	0.8
Calculos												
11	Contenido de asfalto efectivo				Pbe	5	1.7	2.9	4.0	5.1	6.3	7.2
12	Vacíos en el agregado mineral				VMA	6	20.2	19.0	18.6	18.0	17.7	18.2
13	Vacíos llenos de aire				Va	7	16.5	12.7	9.9	6.7	3.4	1.7
14	Vacíos llenos con asfalto				VFA	8	18.2	33.3	46.9	63.0	80.5	90.5
15	Volumen efectivo de asfalto				Vbe	9	3.7	6.3	8.7	11.3	14.2	16.5
						Fórm.						
16	Estabilidad				-	-	3.6	5.9	6.3	6.4	8.1	7.4

Figuras A.2.2. Gráficas típicas para el diseño Marshall, tráfico medio (50 golpes por cara).



Cuadro A.2.7. Chequeo de especificaciones del diseño Marshall, tráfico medio (50 golpes por cara).

Mínimo	3.7	3.0	6.5	3.0	6.0	OK TODAS LAS ESPECIFICACIONES
Máximo	7.0	7.1	7.2	9.0	6.7	
%AC	Estabilidad	Flujo	Va	VMA	VFA	
3.1	NO	SI	NO	SI	NO	NO
3.2	NO	SI	NO	SI	NO	NO
3.3	NO	SI	NO	SI	NO	NO
3.4	NO	SI	NO	SI	NO	NO
3.5	NO	SI	NO	SI	NO	NO
3.6	NO	SI	NO	SI	NO	NO
3.7	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.8	SI	SI	NO	SI	NO	NO
3.9	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.1	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.2	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.3	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.4	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.5	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.6	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.7	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.8	SI	SI	NO	SI	NO	NO
4.9	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.1	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.2	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.3	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.4	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.5	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.6	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.7	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.8	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.9	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.1	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.2	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.3	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.4	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.5	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6.6	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6.7	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6.8	SI	SI	SI	SI	NO	NO
6.9	SI	SI	SI	SI	NO	NO
7	SI	SI	SI	SI	NO	NO
7.1	NO	SI	SI	SI	NO	NO
7.2	NO	NO	SI	SI	NO	NO
7.3	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.5	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.6	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.7	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.9	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.1	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.2	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.3	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.5	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.6	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.7	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.9	NO	NO	NO	SI	NO	NO
9	NO	NO	NO	NO	NO	NO

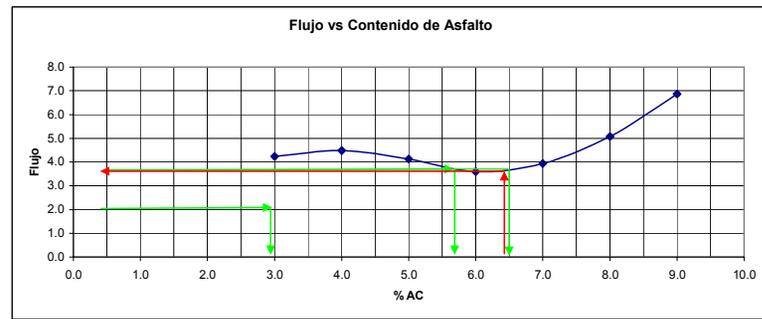
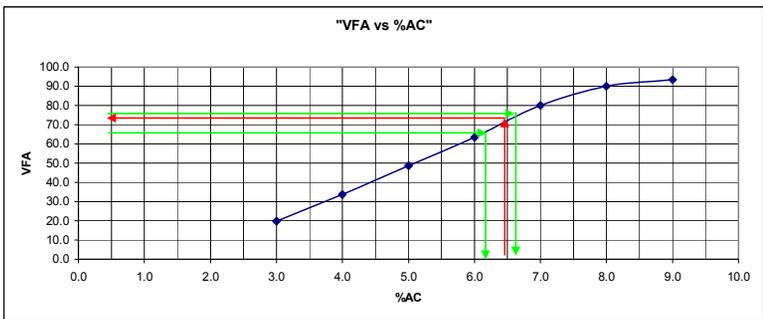
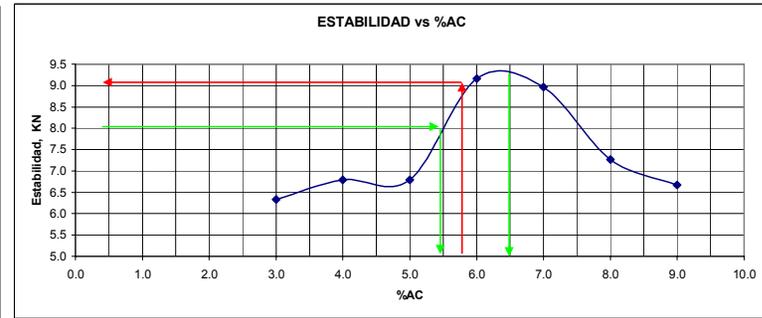
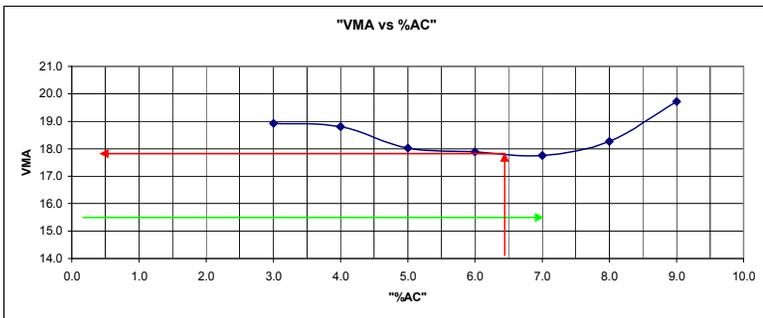
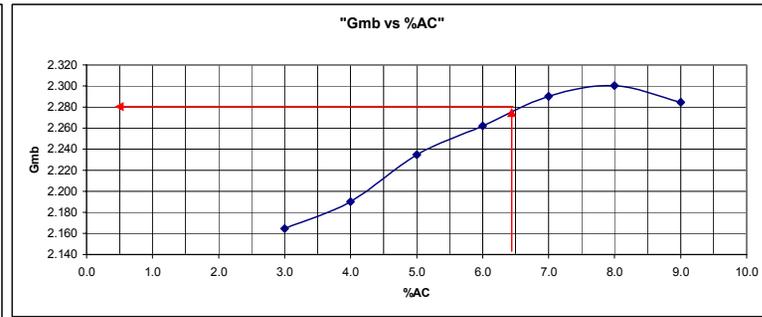
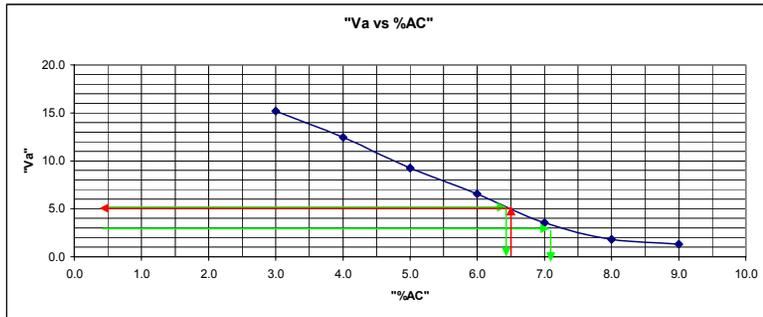
Cuadro A.2.8. Valores obtenidos para el porcentaje de asfalto escogido para el diseño Marshall, tráfico medio (50 golpes por cara).

VALORES PARA ON CONTENIDO DE AC DE 6.6%				
Característica	ESPECIFICACIÓN		MEZCLA DISEÑADA	OK
	MIN	MAX		
Estabilidad (KN)	5.3	-	7.5	SI
Flujo	2	4.1	3.7	SI
Va	3	5	5	SI
VMA	15	-	17.8	SI
VFA	65	78	73	SI
Gmb	-	-	2.281	-

Cuadro A.2.9. Hoja de trabajo para diseño Marshall, para tráfico alto (75 golpes por cara).

HOJA DE TRABAJO PARA ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS DE PAVIMENTO COMPACTADAS (ANALISIS POR PESO TOTAL DE LA MEZCLA)													
Muestra:		agregados Ecocivil Ltda					Fecha: enero de 2006						
Identificacion		75 golpes por cara											
Indicador		Gravedad específica		Bulk	Datos composición del agregado		Composición de la mezcla, % por peso total de la mezcla, P						
							Número de mezcla o prueba						
							1	2	3	4	5	6	7
1	Agregado grueso	G1		2.557	40.5	P1	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3
2	Agregado fino	G2		2.592	53.5	P2	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9
3	Llenante mineral	G3		2.809	6	P3	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
4	Agregado total	Gs			100	Ps	97	96	95	94	93	92	91
5	Cemento asfáltico	Gb	1.010			Pb	3	4	5	6	7	8	9
6	Gravedad específica bulk de todo el agregado				Gsb	1	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590
7	Gravedad específica máxima medida de la mezcla compactada				Gmm	-	2.552	2.502	2.462	2.420	2.374	2.343	2.315
8	Gravedad específica bulk de la muestra compactada				Gmb	-	2.164	2.190	2.235	2.262	2.290	2.300	2.284
9	Gravedad específica efectiva de todo el agregado				Gse	2	2.678	2.666	2.663	2.657	2.642	2.647	2.653
10	Asfalto absorbido, % por peso total del agregado				Pba	4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.8	0.8	0.9
Calculos													
11	Contenido de asfalto efectivo				Pbe	5	1.7	2.9	4.0	5.1	6.3	7.2	8.1
12	Vacíos en el agregado mineral				VMA	6	18.9	18.8	18.0	17.9	17.8	18.3	19.7
13	Vacíos llenos de aire				Va	7	15.2	12.5	9.2	6.5	3.5	1.8	1.3
14	Vacíos llenos con asfalto				VFA	8	19.8	33.7	48.7	63.4	80.1	90.0	93.4
15	Volumen efectivo de asfalto				Vbe	9	3.7	6.3	8.8	11.3	14.2	16.4	18.4
						Fórm.:							
16	Estabilidad				-	-	6.3	6.8	6.8	9.2	9.0	7.3	6.7

Figuras A.2.3. Gráficas típicas para el diseño Marshall, tráfico alto (75 golpes por cara).



Cuadro A.2.10. Chequeo de especificaciones del diseño Marshall, para tráfico alto (75 golpes por cara).

Mínimo	5.5	5.8	6.4	3.0	6.1	OK TODAS LAS ESPECIFICACIONES
Máximo	6.5	6.5	7.3	9.0	6.7	
%AC	Estabilidad	Flujo	Va	VMA	VFA	
3.1	NO	NO	NO	SI	NO	NO
3.2	NO	NO	NO	SI	NO	NO
3.3	NO	NO	NO	SI	NO	NO
3.4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
3.5	NO	NO	NO	SI	NO	NO
3.6	NO	NO	NO	SI	NO	NO
3.7	NO	NO	NO	SI	NO	NO
3.8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
3.9	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.1	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.2	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.3	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.5	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.6	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.7	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
4.9	NO	NO	NO	SI	NO	NO
5	NO	NO	NO	SI	NO	NO
5.1	NO	NO	NO	SI	NO	NO
5.2	NO	NO	NO	SI	NO	NO
5.3	NO	NO	NO	SI	NO	NO
5.4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
5.5	SI	NO	NO	SI	NO	NO
5.6	SI	NO	NO	SI	NO	NO
5.7	SI	NO	NO	SI	NO	NO
5.8	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5.9	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6	SI	SI	NO	SI	NO	NO
6.1	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.2	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.3	SI	SI	NO	SI	SI	NO
6.4	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6.5	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6.6	NO	NO	SI	SI	SI	NO
6.7	NO	NO	SI	SI	SI	NO
6.8	NO	NO	SI	SI	NO	NO
6.9	NO	NO	SI	SI	NO	NO
7	NO	NO	SI	SI	NO	NO
7.1	NO	NO	SI	SI	NO	NO
7.2	NO	NO	SI	SI	NO	NO
7.3	NO	NO	SI	SI	NO	NO
7.4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.5	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.6	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.7	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
7.9	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.1	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.2	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.3	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.4	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.5	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.6	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.7	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.8	NO	NO	NO	SI	NO	NO
8.9	NO	NO	NO	SI	NO	NO
9	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Cuadro A.2.11. Valores obtenidos para el porcentaje de asfalto escogido para el diseño Marshall, tráfico alto (75 golpes por cara).

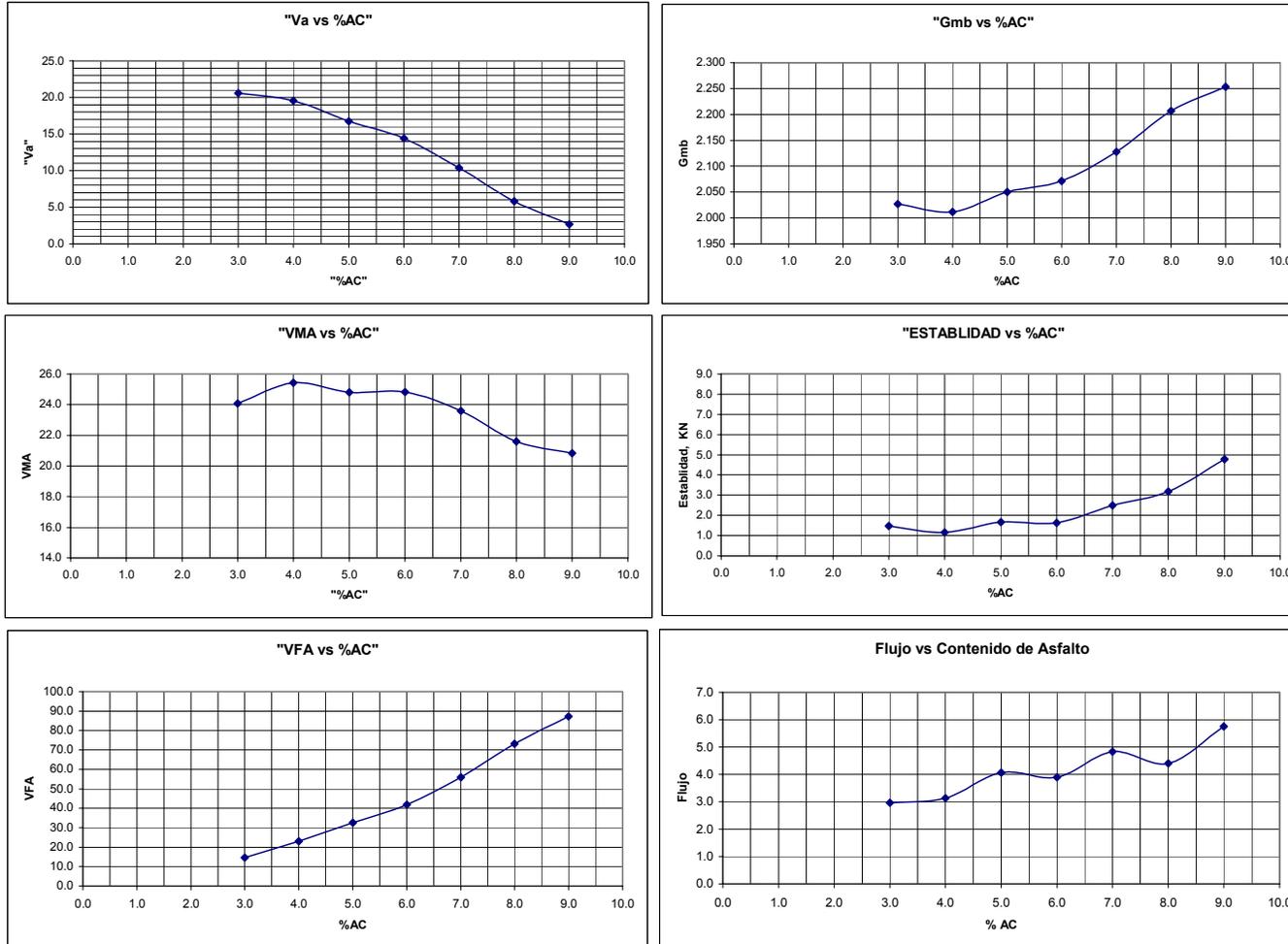
VALORES PARA ON CONTENIDO DE AC DE 6.4%				
Característica	ESPECIFICACIÓN		MEZCLA DISEÑADA	OK
	MIN	MAX		
Estabilidad (KN)	8.0	-	9.0	SI
Flujo	2	3.6	3.5	SI
Va	3	5	5	SI
VMA	15	-	17.8	SI
VFA	65	75	71	SI
Gmb	-	-	2.280	-

Cuadro A.2.12. Hoja de trabajo para diseño Marshall, 10 golpes por cara.

HOJA DE TRABAJO PARA ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS DE PAVIMENTO COMPACTADAS (ANALISIS POR PESO TOTAL DE LA MEZCLA)												
Muestra:		agregados Ecocivil Ltda AC 80-100 Barrancabermeja					Fecha: noviembre de 2005					
Identificación		10 golpes por cara										
Indicador	Gravedad específica		Bulk	Datos composición agregado		Composición de la mezcla, % por peso total de la mezcla, P						
						Número de mezcla o prueba						
						1	2	3	4	5	6	7
1	Agregado grueso	G1		2.557	40.5	P1	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3
2	Agregado fino	G2		2.592	53.5	P2	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9
3	Llenante mineral	G3		2.809	6	P3	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
4	Agregado total	Gs			100	Ps	97	96	95	94	93	92
5	Cemento asfáltico	Gb	1.010			Pb	3	4	5	6	7	8
6	Gravedad específica bulk de todo el agregado				Gsb	1	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590
7	Gravedad específica máxima medida de la mezcla compactada				Gmm	-	2.552	2.502	2.462	2.420	2.374	2.343
8	Gravedad específica bulk de la muestra compactada				Gmb	-	2.027	2.012	2.050	2.071	2.128	2.207
9	Gravedad específica efectiva de todo el agregado				Gse	2	2.678	2.666	2.663	2.657	2.642	2.647
10	Asfalto absorbido, % por peso total del agregado				Pba	4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.8	0.8
Calculos												
11	Contenido de asfalto efectivo				Pbe	5	1.7	2.9	4.0	5.1	6.3	7.2
12	Vacíos en el agregado mineral				VMA	6	24.1	25.4	24.8	24.8	23.6	21.6
13	Vacíos llenos de aire				Va	7	20.6	19.6	16.7	14.4	10.4	5.8
14	Vacíos llenos con asfalto				VFA	8	14.6	22.9	32.5	41.9	56.0	73.1
15	Volumen efectivo de asfalto				Vbe	9	3.5	5.8	8.1	10.4	13.2	15.8
						Fórm.						
16	Estabilidad				-	-	1.5	1.2	1.7	1.6	2.5	3.2

Figuras A.2.4. Gráficas típicas para el diseño Marshall, 10 golpes por cara).

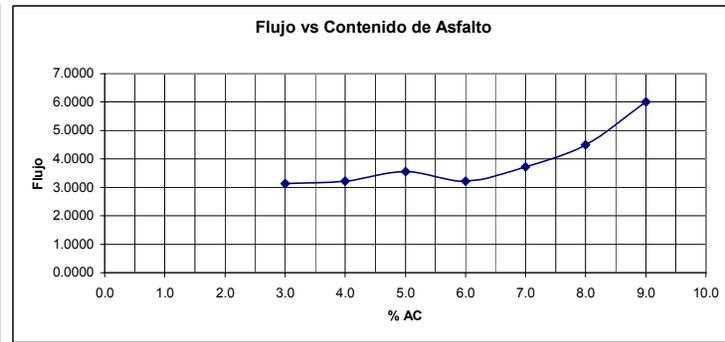
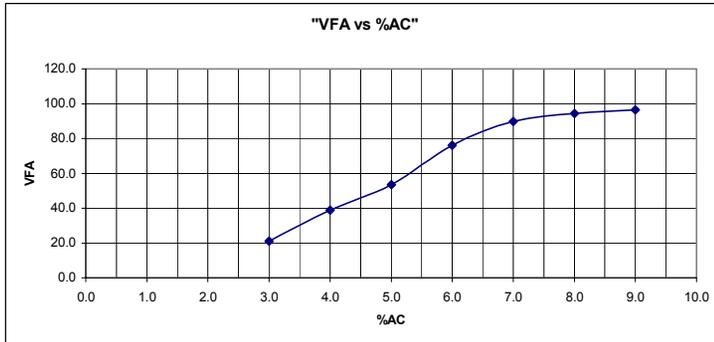
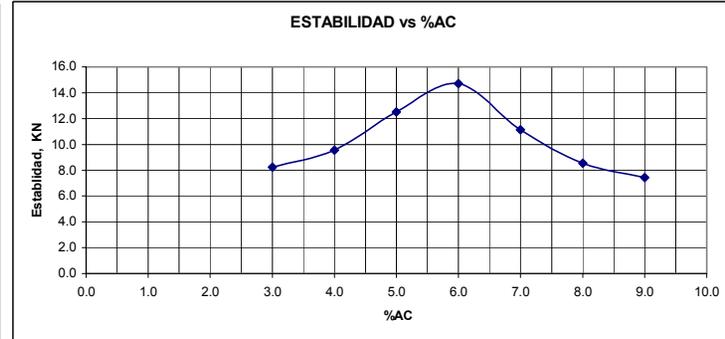
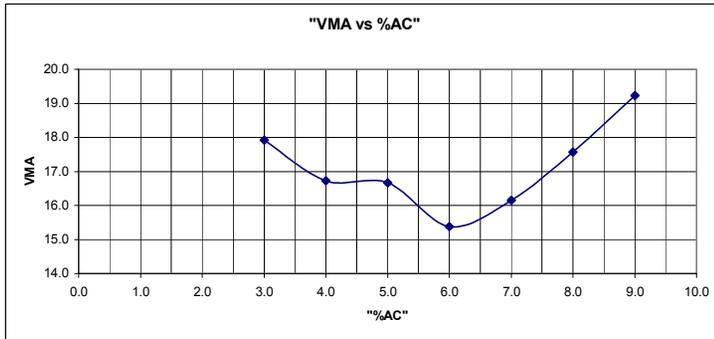
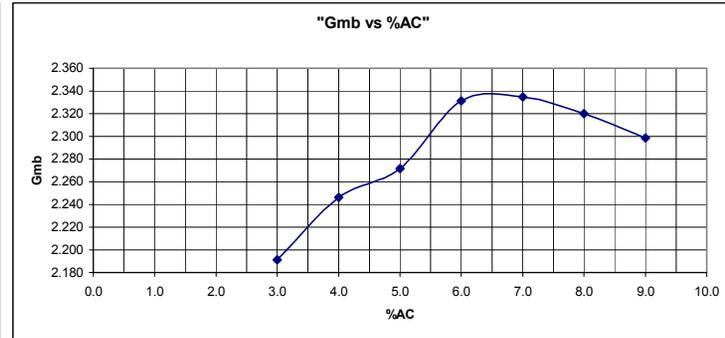
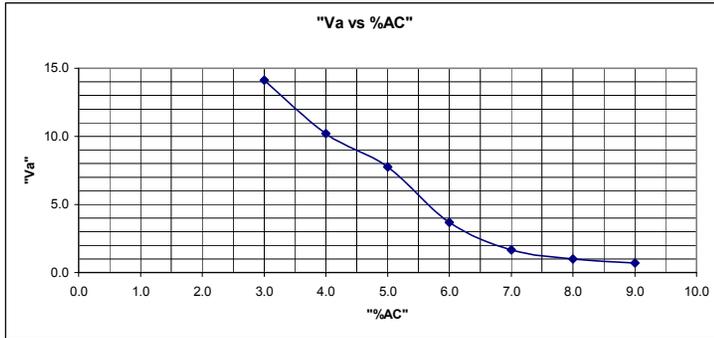
Curvas típicas para briquetas de 10 golpes por cara



Cuadro A.2.13. Hoja de trabajo para diseño Marshall, 400 golpes por cara.

HOJA DE TRABAJO PARA ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS DE PAVIMENTO COMPACTADAS (ANALISIS POR PESO TOTAL DE LA MEZCLA)													
Muestra: agregados Ecocivil Ltda AC 80-100 Barrancabermeja					Fecha: febrero de 2006								
Identificación 400 golpes por cara													
Indicador	Gravedad específica				Datos composición del agregado		Composición de la mezcla, % por peso total de la mezcla, P						
				Bulk			Número de mezcla o prueba						
					1	2	3	4	5	6	7		
1	Agregado grueso	G1		2.557	40.5	P1	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	
2	Agregado fino	G2		2.592	53.5	P2	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	
3	Llenante mineral	G3		2.809	6	P3	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	
4	Agregado total	Gs			100	Ps	97	96	95	94	93	92	
5	Cemento asfáltico	Gb	1.010			Pb	3	4	5	6	7	8	
6	Gravedad específica bulk de todo el agregado				Gsb	1	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590	2.590	
7	Gravedad específica máxima medida de la mezcla compactada				Gmm	-	2.552	2.502	2.462	2.420	2.374	2.343	
8	Gravedad específica bulk de la muestra compactada				Gmb	-	2.191	2.246	2.272	2.331	2.335	2.320	
9	Gravedad específica efectiva de todo el agregado				Gse	2	2.678	2.666	2.663	2.657	2.642	2.647	
10	Asfalto absorbido, % por peso total del agregado				Pba	4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.8	0.8	
Calculos													
11	Contenido de asfalto efectivo				Pbe	5	1.7	2.9	4.0	5.1	6.3	7.2	
12	Vacíos en el agregado mineral				VMA	6	17.9	16.7	16.7	15.4	16.2	17.6	
13	Vacíos llenos de aire				Va	7	14.1	10.2	7.7	3.7	1.7	1.0	
14	Vacíos llenos con asfalto				VFA	8	21.1	38.9	53.6	76.0	89.7	94.4	
15	Volumen efectivo de asfalto				Vbe	9	3.8	6.5	8.9	11.7	14.5	16.6	
						Fórm.							
16	Estabilidad				-	-	8.2	9.6	12.5	14.7	11.1	8.5	

Figuras A.2.5. Gráficas típicas para el diseño Marshall, 400 golpes por cara.



ANEXO 3

SOLUCIÓN DE LA FASE VOLUMÉTRICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS

PROPORCIONES VOLUMÉTRICAS.

“Las proporciones volumétricas de los materiales constituyentes en un espécimen compactado, son expresadas como porcentajes del volumen total del espécimen. Sin embargo, se debe enfatizar que el volumen total del espécimen compactado consiste en la suma de los volúmenes del contenido de asfalto efectivo, agregado y aire, donde el contenido de asfalto efectivo es igual al contenido total de asfalto menos el asfalto absorbido. La porción del contenido total de asfalto que ha sido perdida por absorción dentro de las partículas del agregado, no contribuye al volumen total del espécimen, porque eso ha desaparecido dentro de la porosidad capilar de las partículas individuales del agregado.”¹.

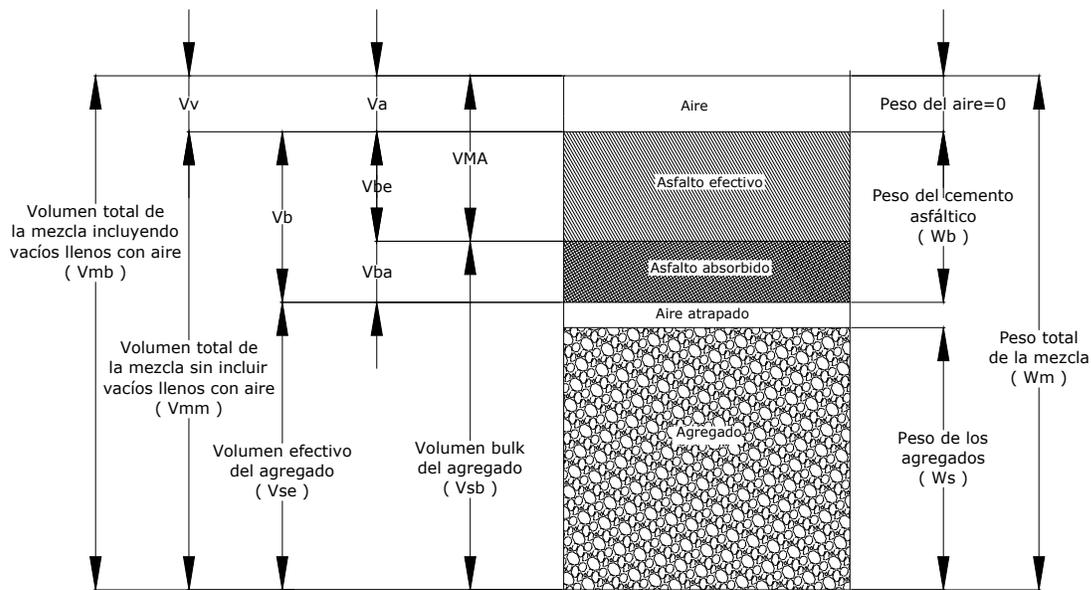


Figura A.3.1. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada.

¹ Traducción de una porción del numeral B.13 del Anexo B, escrito por el Dr. Norman McLeod para la segunda edición del libro de The Asphalt Institute, Mix Design Methods for Asphalt Concrete and other hot-mix types 1962.

DESARROLLO MATEMÁTICO DEL CONCEPTO DE LAS PROPORCIONES DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE LAS MEZCLAS, CON RESPECTO AL VOLUMEN TOTAL DEL ESPECIMEN.

La gravedad específica de cualquier material es la densidad del material referida a la densidad del agua. Solo para simplificar la notación, las gravedades específicas del anexo se expresarán tomando como temperatura de referencia, 25°C (donde la densidad del agua es $1 \frac{g}{cm^3}$), así:

$$Gx = \frac{Wx}{Vx}$$

Gx: gravedad específica del material "x" de un espécimen de una mezcla asfáltica compactada

Wx: peso del material "x" de un espécimen

Vx: volumen del material "x" de un espécimen

$$\frac{Wm}{100} = \frac{Wx}{Px}$$

Wm: peso total del espécimen

Px: porcentaje de material con respecto al peso total del espécimen

Reacomodando, obtenemos:

$$Wx = Px * \frac{Wm}{100}$$

Y reemplazando:

$$Gx = \left(Px * \frac{Wm}{100} \right) * \frac{1}{Vx} \Rightarrow Vx = \left(Px * \frac{Wm}{100} \right) * \frac{1}{Gx}$$

Por otra parte:

$$\frac{V_x}{V_{x\%}} = \frac{V_{bm}}{100}$$

V_{bm} : volumen bulk o total del espécimen

$V_{x\%}$: volumen del material "x" expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada

Entonces, despejando $V_{x\%}$:

$$V_{x\%} = \frac{V_x}{V_{bm}} * 100$$

Y reemplazando V_x :

$$V_{x\%} = \frac{100}{V_{bm}} * \left(P_x * \frac{W_m}{100} \right) * \frac{1}{G_x}$$

Recordando la definición de gravedad específica bulk de la mezcla:

$$\text{Pero: } G_{mb} = \frac{W_m}{V_{mb}} \Rightarrow W_m = G_{mb} * V_{mb}$$

G_{mb} : gravedad específica bulk o total de la mezcla

W_m : peso total de la muestra

V_{mb} : volumen bulk o total de la muestra

Reemplazando W_m :

$$V_{x\%} = \frac{1}{V_{mb}} * (P_x * G_{mb} * V_{mb}) * \frac{1}{G_x}$$

Por lo tanto:

$$V_{x\%} = Px * \frac{Gmb}{Gx} \quad (1)$$

$V_{x\%}$: volumen del material "x" expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada

Px : porcentaje de material con respecto al peso total del espécimen

Gmb : gravedad específica bulk o total de la mezcla asfáltica compactada

Gx : gravedad específica del material "x" de un espécimen de una mezcla asfáltica compactada

La anterior expresión permite calcular el volumen que ocupa cualquier material constituyente de la mezcla y expresarlo en porcentaje con respecto al volumen total de la mezcla asfáltica compactada.

DESARROLLO MATEMÁTICO DEL CONCEPTO DEL VOLUMEN DE ASFALTO ABSORBIDO.

Teniendo en cuenta las definiciones de gravedades específicas de los agregados, dadas en el Capítulo 2, se puede de manera conceptual explicar matemáticamente el origen de la expresión dada por el TAI para obtener el porcentaje de asfalto absorbido (Pba), dada en porcentaje del peso de los agregados, que a la postre sirve como base para obtener el contenido de asfalto efectivo:

$$Vba = Vsb - Vse$$

Vba : volumen de asfalto absorbido

Vsb : volumen bulk o total del agregado

Vse : volumen efectivo del agregado

$$Gsb = \frac{Ws}{Vsb} \Rightarrow Vsb = \frac{Ws}{Gsb}$$

Gsb: gravedad específica bulk del agregado

Ws: peso del agregado

$$Gse = \frac{Ws}{Vse} \Rightarrow Vse = \frac{Ws}{Gse}$$

Gse: gravedad específica efectiva del agregado

Ws: peso del agregado

Reemplazando los volúmenes del agregado:

$$Vba = Ws * \left(\frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse} \right)$$

La gravedad del cemento asfáltico se expresa de la siguiente forma:

$$Gb = \frac{Wb}{Vb}$$

Gb: Gravedad específica del cemento asfáltico

Wb: peso del cemento asfáltico

Vb: volumen del cemento asfáltico

Y esa expresión se transforma convenientemente así:

$$Gb = \frac{Wb}{Vb} \Rightarrow Wb = Vb * Gb, \text{ para el caso particular } \Rightarrow Wb = Vba * Gb$$

Entonces, para convertir este volumen a peso, multiplicamos ambos lados de la igualdad por G_b :

$$V_{ba} * G_b = W_s * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right) * G_b$$

De donde obtenemos el peso del asfalto absorbido:

$$W_{ba} = W_s * \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} \right) * G_b$$

Y para expresar el peso del asfalto absorbido, como porcentaje del peso total de los agregados, multiplicamos ambos lados de la igualdad por $\frac{100}{W_s}$:

$$W_{ba} * \frac{100}{W_s} = \left(W_s * \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} \right) * G_b \right) * \frac{100}{W_s}$$

$$P_{ba} = 100 * \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} \right) * G_b \quad (2)$$

P_{ba} : porcentaje de asfalto absorbido en porcentaje del peso total de los agregados

G_{se} : gravedad específica efectiva del agregado

G_{sb} : gravedad específica bulk del agregado

G_b : Gravedad específica del cemento asfáltico

Y para expresar el peso del asfalto absorbido, como porcentaje del peso total de la mezcla, multiplicamos la expresión dada en (2), por $\frac{P_s}{100}$:

$$P_{ba_ \%_ w_m} = P_{ba} * \frac{P_s}{100}$$

$P_{ba_ \%_ w_m}$: porcentaje de asfalto absorbido en porcentaje con respecto al peso total de la mezcla

Luego, si al contenido total de asfalto expresado como porcentaje del peso total de la mezcla, le quitamos la cantidad de asfalto que ha sido absorbida dentro de la estructura porosa externa del agregado, obtenemos el porcentaje de asfalto efectivo, así:

$$Pbe = Pb - Pba_{\%_w_m} \quad (3)$$

Pbe: porcentaje efectivo de asfalto, en porcentaje con respecto al peso total de la mezcla

Pb: porcentaje total de asfalto contenido en la mezcla, en porcentaje del peso total

Pba_{%_wm}: porcentaje de asfalto absorbido, en porcentaje con respecto al peso total de la mezcla

Las ecuaciones 2 y 3, hacen parte del conjunto de fórmulas utilizadas por el TAI.

DESARROLLO MATEMÁTICO DEL CONCEPTO DE PORCENTAJE DE VACÍOS LLENOS CON AIRE.

El volumen bulk (Vmb) es el volumen total de la mezcla y el volumen mínimo (Vmm) es el volumen sin vacíos de la mezcla, entonces la cantidad de vacíos (Vv) es hallada así:

$$Vv = Vmb - Vmm$$

Cuando se expresa dicho contenido de vacíos con respecto al volumen total de la mezcla, obtenemos:

$$\frac{Vv}{Vmb} * 100 = \frac{Vmb - Vmm}{Vmb} * 100$$

$$Va = \frac{Vmb - Vmm}{Vmb} * 100$$

Va: porcentaje de vacíos con aire expresados como porcentaje del volumen total de la mezcla

Y recordando el concepto de gravedad específica:

$$G_{mm} = \frac{W_m}{V_{mm}} \Rightarrow V_{mm} = \frac{W_m}{G_{mm}}$$

G_{mm} : gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica, determinada de (3) o medida mediante ASTM D 2041

$$G_{mb} = \frac{W_m}{V_{mb}} \Rightarrow V_{mb} = \frac{W_m}{G_{mb}}$$

G_{mb} : gravedad específica bulk de la mezcla compactada ASTM D 1188

Luego reemplazando:

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

Y eliminando los elementos comunes en la fracción:

$$V_a = \frac{\frac{W_m * (G_{mm} - G_{mb})}{G_{mb} * G_{mm}}}{\frac{W_m}{G_{mb}}} * 100$$

Se obtiene finalmente:

$$V_a = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (4)$$

V_a : porcentaje de vacíos con aire expresados como porcentaje del volumen total de la mezcla

G_{mm} : gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica, determinada de (3) o medida mediante ASTM D 2041

G_{mb} : gravedad específica bulk de la mezcla compactada ASTM D 1188

DESARROLLO MATEMÁTICO DEL CONCEPTO DE VOLUMEN EFECTIVO DE ASFALTO.

Una parte del asfalto total (v_b) que es introducido en una mezcla, es absorbida por la estructura porosa externa del agregado (v_{ba}) y otra parte permanece recubriendo la superficie de las partículas de la estructura mineral (v_{be}); si se expresan dichas cantidades con respecto al volumen total de la mezcla, puede decirse que:

$$V_b = V_{ba} + V_{be}$$

Además, si se tiene el porcentaje con respecto al peso total de la mezcla, de cualquier material componente de ésta, y su gravedad específica, entonces se puede obtener el porcentaje que representa dicho material, del volumen total de la mezcla.

$$V_{x\%} = P_x * \frac{G_{mb}}{G_x}$$

Por lo tanto:

$$V_b = P_b * \frac{G_{mb}}{G_b} \quad (5)$$

$$V_{ba} = P_{ba\%_{wm}} * \frac{G_{mb}}{G_b} \quad (6)$$

$$V_{be} = P_{be} * \frac{G_{mb}}{G_b} \quad (7)$$

DESARROLLO MATEMÁTICO DEL CONCEPTO DE VACÍOS EN LOS AGREGADOS MINERALES.

Si al volumen total de la mezcla (V_{mb}) se le sustrae el volumen bulk (V_{sb}) o total del agregado, quedando solamente el volumen de espacio vacío intergranular,

y luego expresando esta cantidad como porcentaje del volumen total de la mezcla, se obtiene:

$$VMA = \left(\frac{Vmb - Vsb}{Vmb} \right) * 100$$

$$VMA = \left(1 - \frac{Vsb}{Vmb} \right) * 100$$

$$VMA = 100 - \frac{Vsb}{Vmb} * 100$$

Recordando que:

$$V_{x\%} = \frac{Vx}{Vmb} * 100 \quad \text{y} \quad V_{x\%} = Px * \frac{Gmb}{Gx}$$

Por lo tanto:

$$VMA = 100 - Ps * \frac{Gmb}{Gsb} \quad (8)$$

DESARROLLO MATEMÁTICO DEL CONCEPTO DE VACÍOS LLENOS CON ASFALTO.

Si se expresa el volumen de asfalto que recubre las partículas del agregado (Vbe), como porcentaje del volumen que generan los espacios vacíos intergranulares (VMA) en una mezcla, entonces obtenemos lo siguiente:

$$VFA = \frac{Vbe}{VMA} * 100$$

Además, ese espacio es ocupado por el aire y por el asfalto efectivo de la mezcla, entonces:

$$VMA = Vbe + Va \Rightarrow Vbe = VMA - Va$$

$$VFA = \frac{VMA - Va}{VMA} * 100 \quad (9)$$

EJEMPLO DE LA SOLUCIÓN DE LA FASE VOLUMÉTRICA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA.

Para solucionar la fase volumétrica de una mezcla, debemos tener la siguiente información de laboratorio:

Composición de la mezcla:

- Ps: contenido de agregado, porcentaje por peso del total de la mezcla
- Pb: contenido de asfalto, porcentaje por peso total de la mezcla
- Gmm: gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica medida en el ensayo ASTM D 2041
- Gmb: gravedad específica bulk de la mezcla compactada ASTM D 1188
- Gsb: gravedad específica bulk del agregado
- Gse: gravedad específica efectiva del agregado
- Gb: gravedad específica del cemento asfáltico

Cuadro A.3.1. Datos necesarios para resolver la fase volumétrica de una mezcla asfáltica compactada y valores para el ejemplo.

Ps (%)	95
Pb (%)	5
Gmm	2.462
Gmb	2.219
Gsb	2.590
Gse	2.663
Gb	1.010

Resolviendo para Va:

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} = 100 * \frac{2.462 - 2.219}{2.462} = 9.87\%$$

Resolviendo para Vb:

$$Vb = Pb * \frac{Gmb}{Gb} = 5 * \frac{2.219}{1.010} = 10.99\%$$

Resolviendo para Vba:

$$Pba = 100 * \left(\frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} \right) * Gb = 100 * \left(\frac{2.663 - 2.590}{2.590 * 2.663} \right) * 1.010 = 1.069\%$$

$$Pba_{\%_{wm}} = Pba * \frac{Ps}{100} = 1.069 * \frac{95}{100} = 1.016\%$$

$$Vba = Pba_{\%_{wm}} * \frac{Gmb}{Gb} = 1.016 * \frac{2.219}{1.010} = 2.23\%$$

Resolviendo para Vbe:

$$Pbe = Pb - Pba_{\%_{wm}} = 5.000 - 1.016 = 3.984\%$$

$$Vbe = Pbe * \frac{Gmb}{Gb} = 3.984 * \frac{2.219}{1.010} = 8.75\%$$

$$Vb = Vba + Vbe = 2.23\% + 8.75\% = 10.98\% \Rightarrow 10.98 \approx 10.99 \Rightarrow _ OK$$

Resolviendo para VMA:

$$VMA = 100 - Ps * \frac{Gmb}{Gsb} = 100 - 95 * \frac{2.219}{2.590} = 18.61\%$$

Resolviendo para VFA:

$$VFA = \frac{VMA - Va}{VMA} * 100 = \frac{18.61 - 9.87}{18.61} * 100 = 46.96\%$$

Resolviendo para los volúmenes del agregado:

$$Vsb = Ps * \frac{Gmb}{Gsb} = 95 * \frac{2.219}{2.590} = 81.39\%$$

$$Vse = Ps * \frac{Gmb}{Gse} = 95 * \frac{2.219}{2.663} = 79.16\%$$

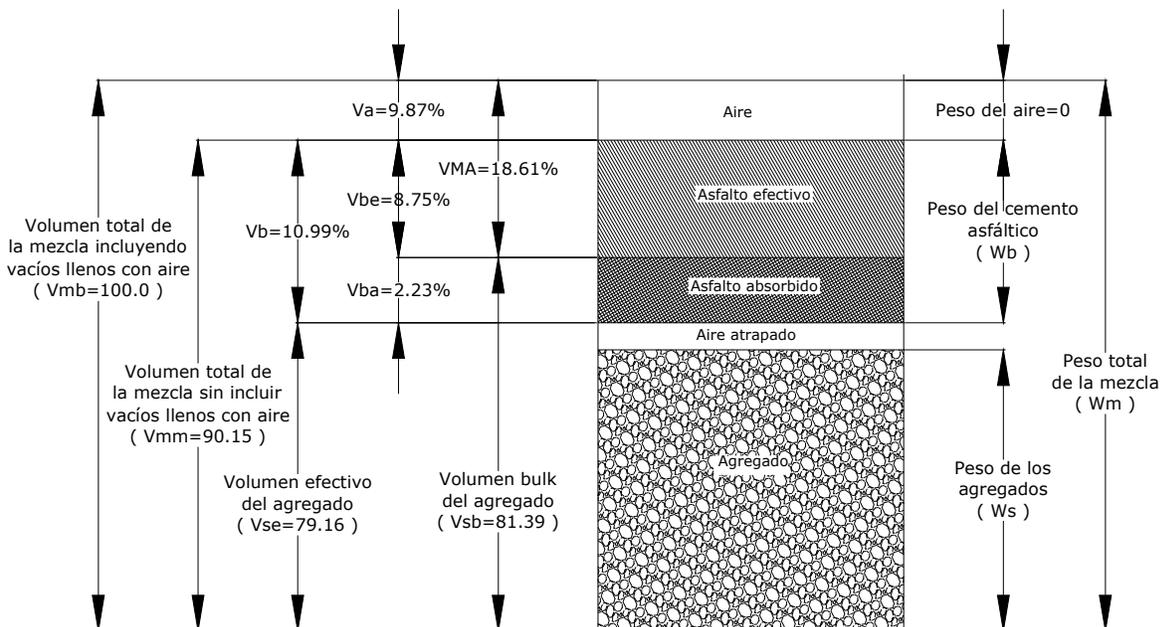


Figura A.3.2. Diagrama de fases, solucionado del ejemplo propuesto.

ANEXO 4

CORRELACIONES DE LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS CON LA ESTABILIDAD MARSHALL

CORRELACIONES DE LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS, CON LA ESTABILIDAD MARSHALL

A continuación se presentan las correlaciones halladas entre las relaciones volumétricas y la estabilidad Marshall, que sirvieron de base para el análisis de resultados y las conclusiones de la primera fase de la investigación. Las siguientes correlaciones están dadas para los contenidos de cemento asfáltico de las briquetas que se fabricaron en el Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos de la Universidad del Cauca, obteniendo en definitiva siete mezclas diferentes (con 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8% y 9% de contenido de cemento asfáltico, en porcentaje del peso total de la mezcla), a las cuales se les aplicaron diferentes energías de compactación (10, 35, 50, 75 y 400 golpes por cara). Se obtuvieron los siguientes resultados:

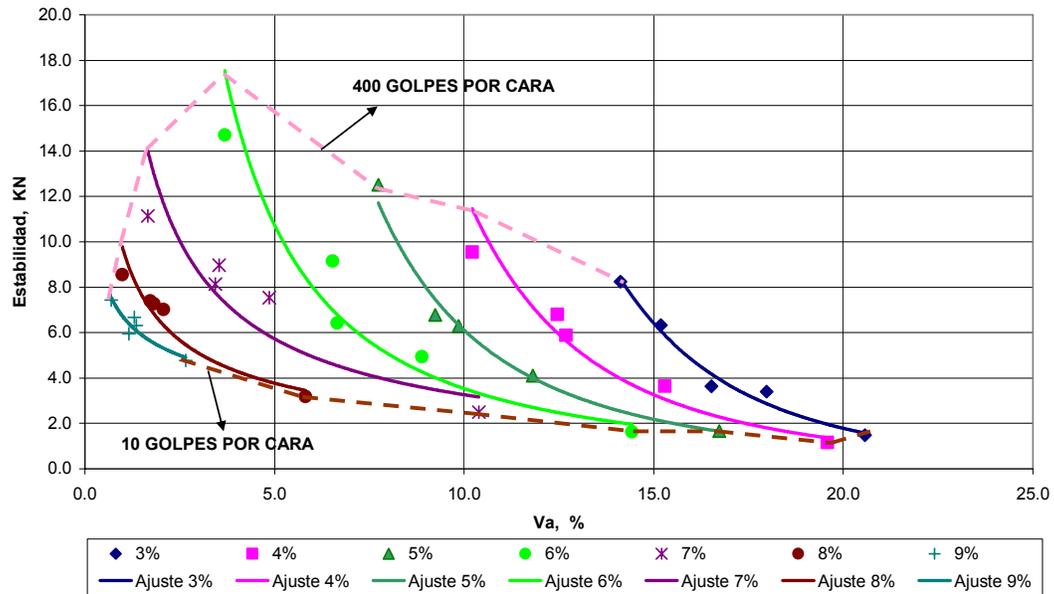


Figura A.4.1. Estabilidad vs Vacíos llenos con aire.

Cuadro A.4.1. Correlaciones halladas entre Estabilidad y Va.

CORRELACIONES DE ESTABILIDAD (Y) CON Va (X)		
%AC	ECUACIÓN	R ²
9	$y = 6.7104x^{-0.3206}$	0.8720
8	$y = 9.7052x^{-0.5872}$	0.9318
7	$y = 21.114x^{-0.8106}$	0.8511
6	$y = 142.24x^{-1.6048}$	0.9404
5	$y = 2115.6x^{-2.5398}$	0.9936
4	$y = 22802x^{-3.2687}$	0.9601
3	$y = 1E+06x^{-4.4448}$	0.9695

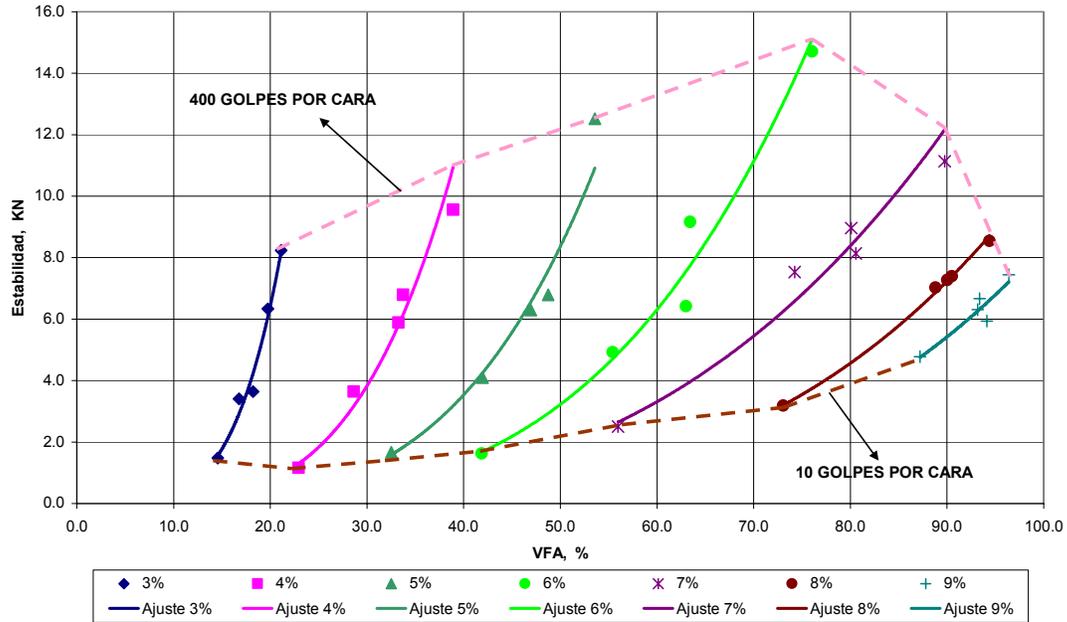


Figura A.4.2. Estabilidad vs Vacíos llenos con asfalto.

Cuadro A.4.2. Correlaciones halladas entre Estabilidad y VFA.

CORRELACIONES DE ESTABILIDAD (Y) CON VFA (X)		
%AC	ECUACIÓN	R ²
9	$y = 4E-08 \cdot x^{4.1659}$	0.8841
8	$y = 2E-07 \cdot x^{3.9094}$	0.9985
7	$y = 6E-06 \cdot x^{3.2291}$	0.9737
6	$y = 2E-06 \cdot x^{3.6846}$	0.9787
5	$y = 2E-06 \cdot x^{3.8569}$	0.9838
4	$y = 4E-06 \cdot x^{4.0368}$	0.9780
3	$y = 1E-05 \cdot x^{4.472}$	0.9709

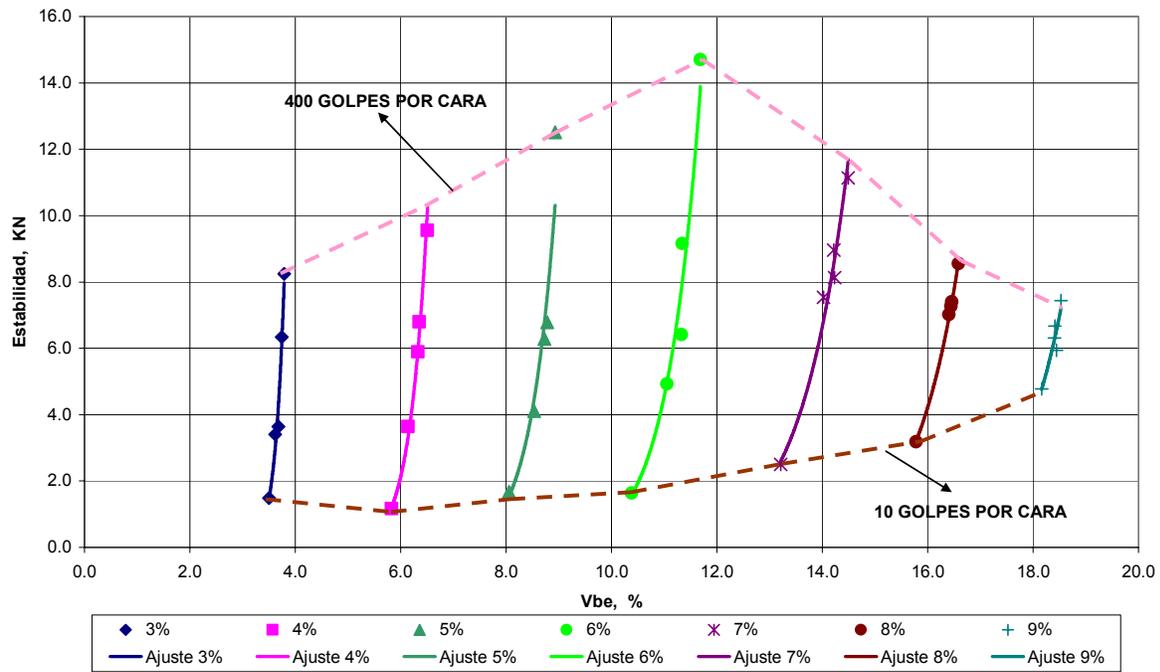


Figura A.4.3. Estabilidad vs Volumen de asfalto efectivo.

Cuadro A.4.3. Correlaciones halladas entre Estabilidad y Vbe.

CORRELACIONES DE ESTABILIDAD (Y) CON Vbe (X)		
%AC	ECUACIÓN	R ²
9	$y = 4E-26 \cdot x^{20.723}$	0.8828
8	$y = 5E-24 \cdot x^{19.84}$	0.9996
7	$y = 2E-18 \cdot x^{16.242}$	0.9853
6	$y = 4E-19 \cdot x^{18.325}$	0.9772
5	$y = 3E-17 \cdot x^{18.451}$	0.9696
4	$y = 2E-15 \cdot x^{19.317}$	0.9920
3	$y = 3E-12 \cdot x^{21.369}$	0.9708

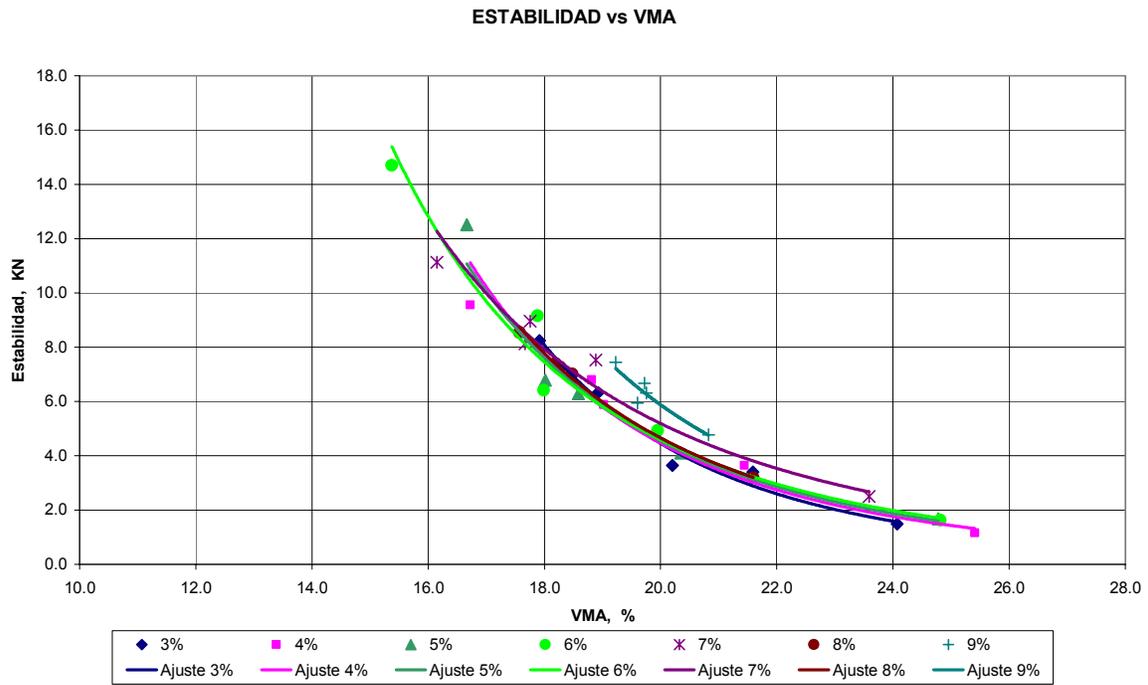


Figura A.4.4. Estabilidad vs Vacíos en los agregados minerales, para diferentes mezclas.

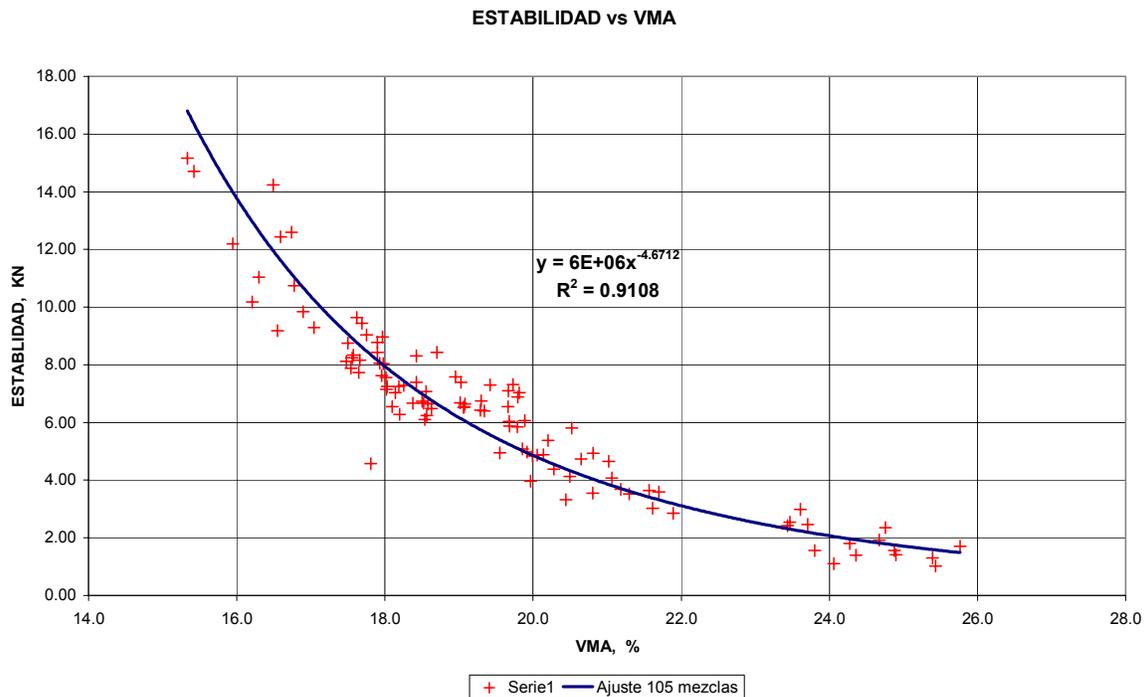


Figura A.4.5. Estabilidad vs Vacíos en los agregados minerales, para todas las mezclas.

Cuadro A.4.4. Correlaciones halladas entre Estabilidad y VMA.

CORRELACIONES DE ESTABILIDAD (Y) CON VMA (X)		
%AC	ECUACIÓN	R^2
9	$y = 4E+07*x^{-5.2138}$	0.8844
8	$y = 1E+07*x^{-4.8681}$	0.9981
7	$y = 899555*x^{-4.0268}$	0.9700
6	$y = 4E+06*x^{-4.6032}$	0.9772
5	$y = 1E+07*x^{-4.8708}$	0.9865
4	$y = 1E+08*x^{-5.6518}$	0.9703
3	$y = 2E+07*x^{-5.096}$	0.9730
T	$y = 6E+06*x^{-4.6712}$	0.9108
T: AJUSTE ESTADÍSTICO DE LAS 105 BRIQUETAS		

ANEXO 5

PRESENTACIÓN DEL MODELO HIRSCH PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS MODULOS DINÁMICOS $|E^*|$ Y $|G^*|$, DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

“La predicción del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente (MAC), ha sido el centro de la investigación en la comunidad de los pavimentos asfálticos. La rigidez ha sido relacionada con el comportamiento, a través de correlaciones empíricas, o por el desarrollo de modelos constitutivos que incorporan algunas medidas de rigidez. (...)

(...) El módulo dinámico axial $|E^|$ es definido como la relación de la amplitud del esfuerzo sinusoidal vertical aplicado sobre el material $\sigma = \sigma_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$ y la amplitud resultante de la deformación unitaria sinusoidal vertical de respuesta $\varepsilon = \varepsilon_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \phi)$. Así, el módulo dinámico axial $|E^*|$ es definido como sigue:*

$$|E^*| = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}$$

Donde σ_1 es la amplitud del esfuerzo axial, y ε_1 es la amplitud de la deformación unitaria axial. El lapso de tiempo comprendido entre los ciclos de esfuerzo y de deformación unitaria, es definido por el ángulo de fase, el cual es dado como sigue:

$$\phi = \omega \cdot \Delta t$$

Donde ω es la velocidad angular (rad/s), Δt es el período de tiempo comprendido entre los ciclos de esfuerzo y deformación unitaria (s). El módulo dinámico cortante $|G^|$ es definido de manera similar al módulo axial. La única diferencia es el uso de los valores del esfuerzo y la deformación unitaria cortante, como sigue:*

$$|G^*| = \frac{\tau_1}{\gamma_1}$$

Donde τ_1 es la amplitud del esfuerzo cortante, y γ_1 es la amplitud de la deformación unitaria recuperable cortante.”¹

Una explicación del concepto anterior es dada en la Figura A.5.1.

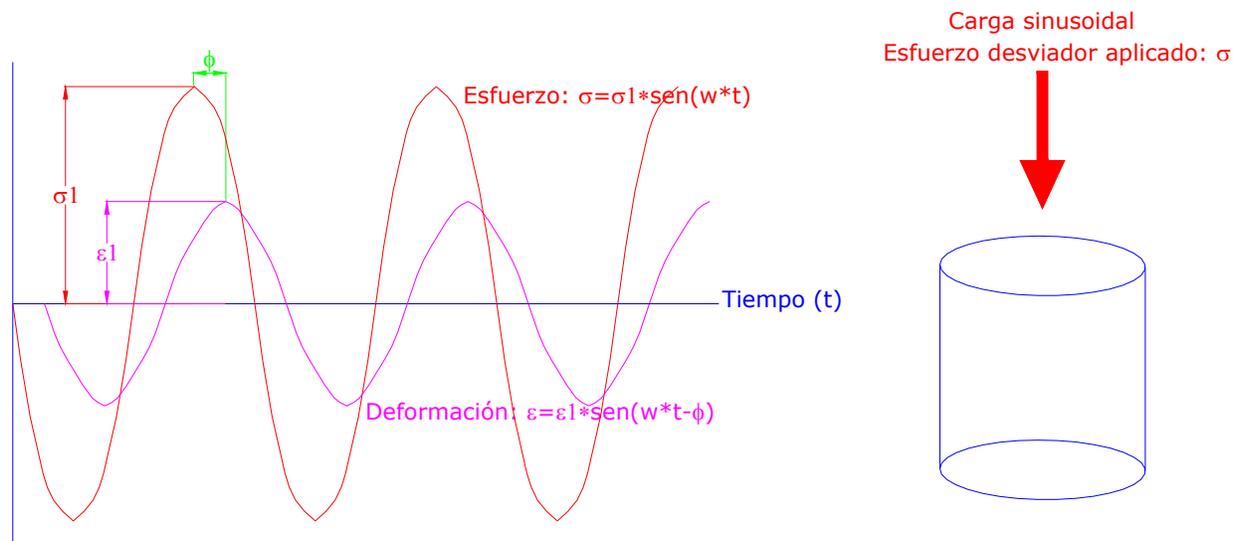


Figura A.5.1. Curvas típicas del ensayo de módulo dinámico de mezclas asfálticas.

Dada la importancia de la determinación de la rigidez en el actual momento se considera importante introducir este nuevo método para la predicción del módulo dinámico de las MAC, por su naturaleza racional y por su sencillez en la aplicación; siendo sólo necesario conocer la composición volumétrica de la mezcla y el módulo dinámico cortante G^* del cemento asfáltico, el cual es un parámetro de uso común en el nuevo sistema de clasificación de asfaltos de Superpave, denominado PG.

El modelo Hirsch para la determinación del módulo dinámico del concreto asfáltico, es el siguiente:

¹ Traducción de la Introducción del artículo “Axial and Shear Viscoelastic Properties”, publicado en Journal of the Association of Asphalt Paving Paving Technologist, Volumen 72, 2003, p 123.

$$|G^*|_{mezcla} = P_c * \left(601000 * \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + |G^*|_{asfalto} * \left(\frac{VFA * VMA}{10000} \right) \right) + (1 - P_c) * \left(\frac{1 - VMA/100}{601000} + \frac{VMA}{VFA * |G^*|_{asfalto}} \right)^{-1}$$

Donde P_c es el llamado factor de contacto y para el módulo dinámico cortante, es calculado con la siguiente expresión:

$$P_c = \frac{\left(3 + \frac{VFA * |G^*|_{asfalto}}{VMA} \right)^{0.678}}{396 + \left(\frac{VFA * |G^*|_{asfalto}}{VMA} \right)^{0.678}}$$

$|G^*|_{mezcla}$ y $|G^*|_{asfalto}$ son los módulos dinámicos cortantes de la mezcla y el cemento asfáltico respectivamente, dados en $\frac{lb}{pul^2}$; VFA y VMA están dados en porcentajes.

Ahora, para la determinación del módulo dinámico axial del cemento asfáltico, el modelo Hirsch toma esta forma:

$$|E^*|_{mezcla} = P_c * \left(4200000 * \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 * |G^*|_{asfalto} * \left(\frac{VFA * VMA}{10000} \right) \right) + (1 - P_c) * \left(\frac{1 - VMA/100}{4200000} + \frac{VMA}{3 * VFA * |G^*|_{asfalto}} \right)^{-1}$$

Y el factor de contacto es:

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA * 3 * |G^*|_{asfalto}}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA * 3 * |G^*|_{asfalto}}{VMA} \right)^{0.58}}$$

$|E^*|_{mezcla}$ es el módulo dinámico axial de la mezcla, $|G^*|_{asfalto}$ es el módulo dinámico cortante del cemento asfáltico, ambos en $\frac{lb}{pul^2}$; y VFA y VMA nuevamente en porcentajes.

NOTA: las condiciones del ensayo para la determinación del $|G^*|_{asfalto}$ serán las mismas condiciones para el módulo de la mezcla (tiempo de carga y temperatura).

EJEMPLO DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HIRSCH PARA PREDECIR EL MÓDULO DINÁMICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Datos necesarios:

VFA: 80%

VMA: 13%

$|G^*|_{asfalto}$: 5 Mpa¹=725 Psi

Primero se resuelve el factor de contacto:

$$Pc = \frac{\left(20 + \frac{VFA * 3 * |G^*|_{asfalto}}{VMA}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA * 3 * |G^*|_{asfalto}}{VMA}\right)^{0.58}} = \frac{\left(20 + \frac{80 * 3 * 725}{13}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{80 * 3 * 725}{13}\right)^{0.58}} = 0.2760$$

Luego se halla el módulo:

$$|E^*|_{mezcla} = Pc * \left((4200000 * \left(1 - \frac{VMA}{100}\right) + 3 * |G^*|_{asfalto} * \left(\frac{VFA * VMA}{10000}\right)) \right) + (1 - Pc) * \left(\frac{1 - VMA/100}{4200000} + \frac{VMA}{3 * VFA * |G^*|_{asfalto}} \right)^{-1}$$

$$|E^*|_{mezcla} = 0.2760 * \left((4.2 * 10^6 * \left(1 - \frac{13}{100}\right) + 3 * 725 * \left(\frac{80 * 13}{10000}\right)) \right) + (1 - 0.2760) * \left(\frac{1 - 13/100}{4.2 * 10^6} + \frac{13}{3 * 80 * 725} \right)^{-1}$$

$$|E^*|_{mezcla} = 1008464 \text{ _Psi} = 6953 \text{ _Mpa}$$

¹ Valor típico obtenido de la bibliografía, para un cemento asfáltico PG 64-22, que es la clasificación correspondiente al AC 80-100 producido en la Refinería de Barrancabermeja, el cual corresponde al utilizado en la elaboración de las mezclas para esta fase de la investigación.

ANEXO 6

GRAVEDADES ESPECÍFICAS MÁXIMAS MEDIDAS, DE LAS MEZCLAS EVALUADAS

GRAVEDADES ESPECÍFICAS MÁXIMAS MEDIDAS, DE LAS MEZCLAS EVALUADAS

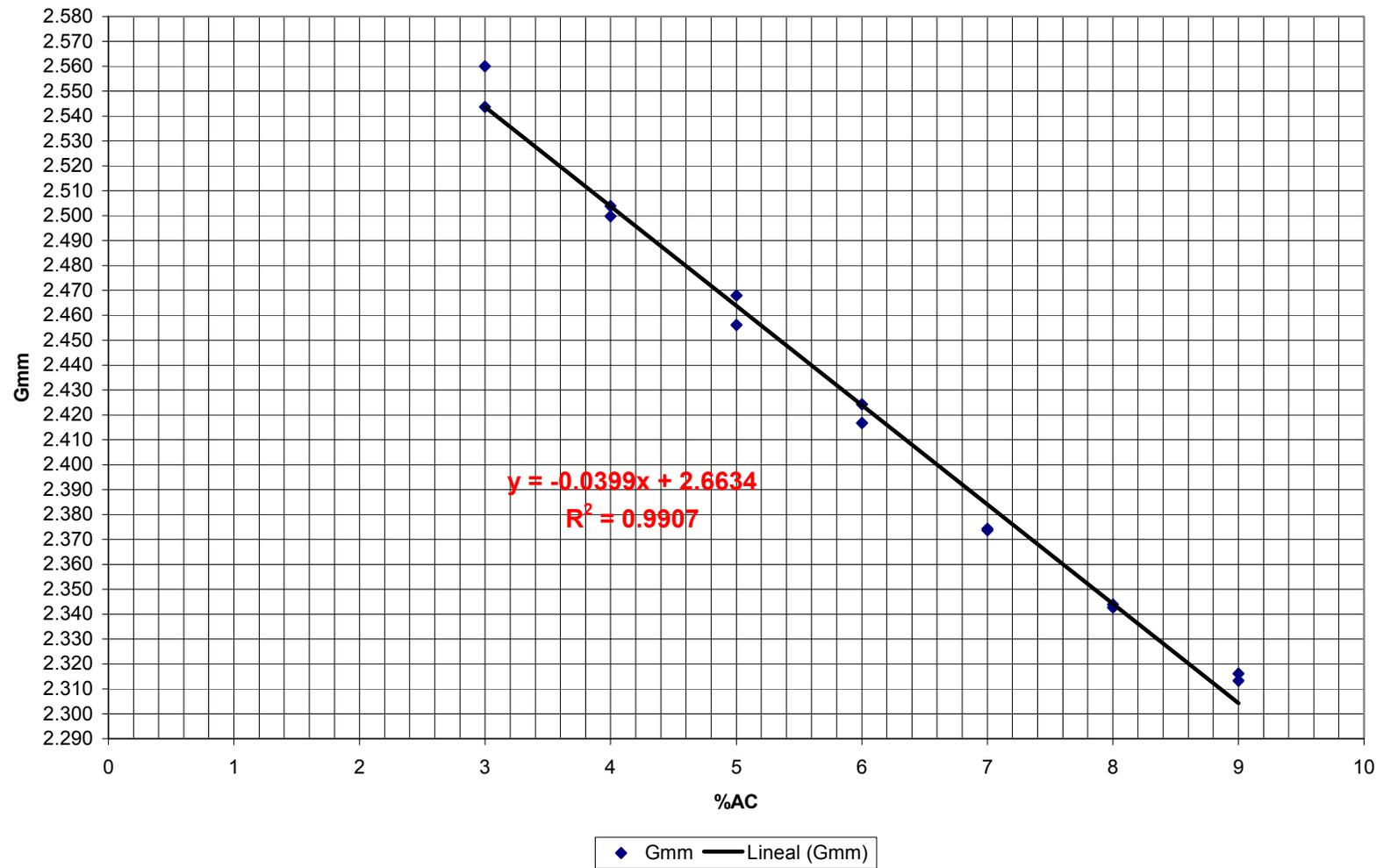
Para la determinación de los parámetros volumétricos de las mezclas ensayadas, se evaluaron las gravedades específicas máximas medidas (Gmm), de todas las mezclas, en dos oportunidades y se promedió el valor resultante, para introducirlo en la determinación de las relaciones volumétricas. A continuación se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio:

A.6.1. Datos de la calibración del picnómetro, para el ensayo de determinación de la Densidad
Máxima Teórica de las mezclas.

Datos de la calibración del picnómetro	
Curva de Calibración del Picnómetro para:	
Densidad Máxima Teórica	
Temperatura (°C)	Peso de recipiente más agua (g)
16.0	7380.8
20.0	7377.0
23.0	7374.0
27.0	7370.0
30.2	7367.0
35.0	7362.3
38.0	7358.8

A.6.2. Datos del ensayo para la determinación de las Gravedades Específicas Máximas de las mezclas, y promedio correspondiente.

Resultados de los ensayos de laboratorio para la determinación de las densidades máximas medidas (sin vacíos), de las mezclas asfálticas ensayadas											
%AC	Recipiente	Recipiente y muestra	Recipiente enrasado con muestra	Temperatura	Recipiente enrasado sin muestra	Masa	Volumen	Gmm	Diferencia	Tolerancia 0.018	Promedio
9	2994.0	5147.8	8591.3	29.6	7367.4	2153.8	929.9	2.316	0.003	OK	2.315
9	2994.0	5171.4	8602.4	30.7	7366.3	2177.4	941.3	2.313			
8	2994.0	5129.9	8589.2	32.5	7364.6	2135.9	911.3	2.344	0.001	OK	2.343
8	2994.0	5119.2	8583.8	31.3	7365.8	2125.2	907.2	2.343			
7	2994.0	5111.7	8592.5	30.3	7366.7	2117.7	891.9	2.374	0.001	OK	2.374
7	2994.0	5112.3	8591.5	31.5	7365.6	2118.3	892.4	2.374			
6	2994.0	5096.3	8598.3	31.1	7365.9	2102.3	869.9	2.417	0.007	OK	2.420
6	2994.0	5096.5	8602.4	29.8	7367.2	2102.5	867.3	2.424			
5	2994.0	5077.5	8601.2	31.0	7366.0	2083.5	848.3	2.456	0.012	OK	2.462
5	2994.0	5082.2	8609.4	29.7	7367.3	2088.2	846.1	2.468			
4	2994.0	5062.3	8606.7	31.2	7365.8	2068.3	827.4	2.500	0.004	OK	2.502
4	2994.0	5073.0	8614.9	30.8	7366.2	2079.0	830.3	2.504			
3	2994.0	5042.7	8612.1	28.2	7368.8	2048.7	805.4	2.544	0.016	OK	2.552
3	2994.0	5046.9	8616.9	31.1	7365.9	2052.9	801.9	2.560			



A.6.1. Gravedad específica máxima medida vs porcentaje de cemento asfáltico