

DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO ELABORADAS CON ASFALTO–CAUCHO

INV E – 824 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma se refiere al diseño de mezclas de concreto asfáltico empleando asfalto–caucho como ligante, y utilizando los moldes Marshall de 101.6 mm (4") de diámetro para la fabricación de las probetas de ensayo.

2 EQUIPO

- 2.1** Se requiere el equipo descrito en la norma INV–748, *Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall*, más el necesario para obtener los diferentes datos adicionales requeridos para realizar los cálculos del diseño.

Nota 1: El uso de una mezcladora mecánica para la elaboración de las mezclas con asfalto–caucho es obligatorio.

3 PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

- 3.1** *Preparación de los agregados pétreos* – Los agregados, individualmente y en conjunto, deberán satisfacer los requisitos de calidad exigidos por la especificación de construcción aplicable.
- 3.2** *Preparación del llenante mineral* – La mezclas con asfalto–caucho requieren la incorporación de un llenante mineral de aporte, que puede ser cemento hidráulico o cal hidratada. Deberá satisfacer los requisitos de calidad exigidos por la especificación de construcción aplicable.

- 3.3** *Determinación de la gradación compuesta:*

- 3.3.1** La gradación combinada se determina usando los porcentajes de cada componente basados en el análisis granulométrico por lavado. Las mezclas de diseño se deben desarrollar con base en materiales de pilas o tolvas, según se vayan a emplear en la fabricación de la mezcla. La gradación compuesta deberá cumplir la exigencia de la especificación de construcción aplicable.

3.4 Gravedad específica:

3.4.1 Se determina la gravedad específica bulk (gravedad específica seca al horno) del agregado fino de acuerdo con la norma INV E-222 y la del agregado grueso según la norma INV E-223. Asimismo, se determina la gravedad específica del llenante mineral aplicando la norma INV E-128.

3.4.2 Determinadas las gravedades específicas individuales, se calcula la gravedad específica del agregado combinado (incluyendo el llenante mineral) con la expresión:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad [824.1]$$

Donde: G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado combinado;

P_1, P_2, P_n : Porcentajes individuales de los distintos agregados (y llenante) que intervienen en el agregado combinado;

G_1, G_2, G_n : Gravedades específicas bulk de las diferentes fracciones del agregado.

3.5 Preparación del material bituminoso – El material bituminoso empleado para el diseño deberá ser asfalto-caucho, del mismo tipo a emplear en la elaboración de la mezcla a escala industrial, el cual deberá cumplir los requerimientos de la especificación de construcción aplicable. Su gravedad específica se deberá determinar de acuerdo con la norma INV E-707

4 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

4.1 Número de probetas – Para una gradación particular del agregado, original o mezclada, se deberá preparar una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto, de manera que los resultados se puedan graficar en curvas que indiquen un contenido "óptimo" definido, con puntos de cada lado de este valor. Normalmente, un rango de tres contenidos de ligante, con incrementos de 1 %, suministra la información necesaria para definir el óptimo, aunque, en

algunos casos, puede resultar necesario preparar juegos adicionales con otros contenidos de ligante (Ver numeral 9.3). Los contenidos de ligante generalmente utilizados, en relación con la masa de la mezcla, son 6.0 %, 7.0 % y 8.0 %, o 6.5 %, 7.5 % y 8.5 %. Se deberán preparar tres probetas para cada contenido de asfalto-caucho.

Nota 2: Generalmente, se requieren 3000 g de agregados combinados para elaborar tres probetas de altura aceptable. Si la cantidad resulta insuficiente, la masa se puede ajustar de acuerdo con la ecuación:

$$\text{Masa ajustada del agregado} = \frac{\text{Gravedad específica del agregado combinado}}{2.65} \times 3000 \quad [824.2]$$

- 4.2** La mezcla de agregados más el llenante mineral de aporte se deben calentar a $160 \pm 2^\circ \text{C}$ ($325 \pm 3^\circ \text{F}$) y se debe mantener a esta temperatura hasta el momento de la elaboración de la mezcla con el asfalto – caucho.
- 4.3** Antes de la elaboración de cada amasada, el asfalto-caucho se debe colocar en un recipiente cubierto con la tapa floja y mantener durante unas 2 horas en un horno de ventilación forzada a una temperatura de $165 \pm 3^\circ \text{C}$ ($330 \pm 5^\circ \text{F}$). Una vez retirado del horno, el asfalto-caucho se agita perfectamente empleando una espátula de hoja blanda de unos 25 mm (1") de ancho y 3 mm ($1/8$ ") de espesor, y de longitud suficiente para alcanzar el fondo del recipiente (Como alternativa a esta espátula, se puede emplear una barra plana que cumpla los requisitos dimensionales). Se deben aplicar movimientos combinados circulares, verticales y de rotación para distribuir uniformemente las partículas de caucho en el ligante, antes de proceder a la adición de éste a la mezcla de agregados. Si se presenta alguna demora en el mezclado con el agregado, el asfalto-caucho se deberá volver a agitar inmediatamente antes de su incorporación al agregado.

Nota 3: Para evitar el daño del asfalto-caucho, no se deben emplear una placa caliente o una llama abierta para calentarlo. Una vez que se ha alcanzado en el horno la temperatura de $165 \pm 3^\circ \text{C}$ ($330 \pm 5^\circ \text{F}$), el recipiente se puede trasladar muy brevemente a una placa caliente por un período no mayor de 5 min, para conservar la temperatura. Si se usa la placa, el asfalto-caucho se debe agitar constantemente para evitar el apelmazamiento del caucho. El asfalto-caucho no se debe calentar más de lo necesario (no más de tres horas) para evitar su deterioro.

Nota 4: Antes de elaborar cada amasada, se deben calentar a $160 \pm 2^\circ \text{C}$ ($325 \pm 3^\circ \text{F}$) el recipiente de mezcla y el elemento mezclador. También, se deberá calcular la cantidad de asfalto-caucho por añadir.

- 4.4** La mezcla de agregados y asfalto-caucho se debe elaborar tan rápidamente como sea posible, con el fin de mantener una temperatura de mezclado de $160 \pm 2^\circ \text{C}$ ($325 \pm 3^\circ \text{F}$), hasta lograr un cubrimiento homogéneo. El mezclado mecánico es obligatorio (nota 1).

Nota 5: Luego del mezclado mecánico, se puede mezclar manualmente para mejorar el cubrimiento del agregado.

- 4.5** Inmediatamente después del mezclado, cada amasada se coloca sobre una lona o un papel grueso y se somete a un proceso de enrollado (empleando la lona o el papel), seguido por su extensión en forma de círculo. La masa circularse corta en seis segmentos iguales. Se toman segmentos opuestos para cada espécimen individual y se utiliza toda la amasada para elaborar los tres especímenes.
- 4.6** Cada espécimen de mezcla se extiende en una bandeja grande en un espesor igual al tamaño máximo nominal del agregado. Hasta donde sea posible, se debe evitar que las partículas se apelmacen. Se somete el espécimen a curado en el horno durante dos horas a $150 \pm 3^\circ \text{C}$ ($300 \pm 5^\circ \text{F}$).
- 4.7** Se calientan a $160 \pm 2^\circ \text{C}$ ($325 \pm 3^\circ \text{F}$) el conjunto de moldeo (molde propiamente dicho, placa de base y collar) y la base del martillo de compactación.
- 4.8** Se arma el conjunto de moldeo y, antes de verter la mezcla, se coloca en el fondo del molde un disco de papel de tamaño ajustado al área interna del molde. A continuación, se coloca toda la porción de mezcla dentro del molde y se la golpea vigorosamente con una espátula o palustre caliente, 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior. Se redondea ligeramente la superficie de la mezcla.
- Nota 6: Para la fácil remoción de los papeles luego de la compactación, ellos se pueden rociar con una ligera aplicación de aerosol a base de aceite vegetal.*
- 4.9** Antes de la compactación, se coloca el molde con la muestra dentro del horno durante una hora, aproximadamente, o el tiempo que sea necesario para calentar el espécimen a la temperatura apropiada de compactación de $160 \pm 2^\circ \text{C}$ ($325 \pm 3^\circ \text{F}$).
- 4.10** Inmediatamente después de remover el molde del horno, se coloca otro disco de papel sobre la mezcla, se acomoda el conjunto en el pedestal de compactación y se aplican 75 golpes con el martillo. En seguida, se remueven la placa de base y el collar y se colocan en los extremos opuestos del molde; se vuelve a montar éste en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la muestra.
- 4.11** Terminada la compactación, se retiran el collar, la placa de base y los discos de papel. Se vuelve a colocar la placa de base, teniendo cuidado de mantener el

molde y el espécimen orientados de manera que la cara inferior del espécimen compactado permanezca en contacto directo con la placa de base.

Nota 7: Los discos de papel se deben remover mientras la mezcla se encuentre caliente, ya que es muy difícil retirarlos si ella se ha enfriado.

4.12 Si se observa que alguna parte de la probeta compactada aumenta de altura luego de la compactación, se detiene el ensayo y se descartan los especímenes preparados con ese contenido de asfalto-caucho. Entonces, se ajusta la gradación del agregado mineral para suministrar un vacío adicional para acomodar debidamente el asfalto-caucho y, a continuación, se elaboran y compactan nuevos especímenes. Si no se produce un aumento visible de altura, se procede como se indica en los numerales 4.13 a 4.16.

4.13 Se deja enfriar cada probeta dentro del molde en posición vertical (con la placa de base en la parte inferior y la superficie superior expuesta al aire) hasta que se enfríe lo suficiente para permitir su extracción del molde sin sufrir daño. La placa de base se debe rotar ocasionalmente para evitar que la probeta se adhiera a ella.

Nota 8: Generalmente, las probetas se pueden extraer sin daño cuando su temperatura se encuentra entre 25 y 32° C (77 y 90° F).

Nota 9: El enfriamiento se puede hacer a temperatura ambiente o en un baño de aire a 25° C (77° F). Se pueden utilizar ventiladores de mesa cuando se desee un enfriamiento más rápido, pero teniendo el cuidado de no voltear el molde sobre su costado.

4.14 Se retira la placa de base y se orientan el molde y la probeta de manera que ésta se pueda extraer siendo empujada desde su base inferior.

Nota 10: Se debe tener cuidado al extraer la probeta del molde, para evitar que se deforme. Si la probeta se deforma o daña durante la extrusión, se deberá descartar todo el juego de especímenes preparados con ese porcentaje de asfalto-caucho.

4.15 Inmediatamente después de la extracción, se mide y anota la altura de la probeta con aproximación a 0.25 mm (0.01") y se determina su masa en el aire con aproximación a 0.1 g.

Nota 11: Las probetas deben tener una altura de 2.5 ± 0.2 ". Si los especímenes preparados con un determinado contenido de asfalto-caucho no cumplen este criterio, se deberán descartar y preparar nuevamente, luego de efectuar los ajustes pertinentes en la masa de los agregados (nota 2).

4.16 Se repite el procedimiento indicado en los numerales 4.6 a 4.15 para todos los juegos de especímenes requeridos.

5 GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE LAS PROBETAS

- 5.1** Se determina la gravedad específica bulk de las tres probetas compactadas con cada contenido de ligante, por los métodos de las normas INV E-733 o INV E-802.

Nota 12: En caso de emplear la norma INV E-733, las masas de una probeta sumergida en agua y en el aire saturada y superficialmente seca, se deben determinar antes de sumergir en el agua la siguiente probeta.

- 5.2** Se determina la densidad de la probeta con la expresión:

$$\text{Densidad} = \text{Gravedad específica bulk} \times \gamma \quad [824.3]$$

Donde: γ : Densidad del agua a 25°C (77°F) (997.0 kg/m³, 0.997 g/cm³ o 62.4 lb/pie³).

Nota 13: Para cada contenido de asfalto-caucho, las densidades de las probetas no deben variar en más de 30 kg/m³ (2 lb/pie³). Si este requisito no se cumple, el juego entero de probetas elaborado con este contenido de ligante se debe descartar y se deberá preparar uno nuevo.

- 5.3** Se determina la gravedad específica bulk promedio (o la densidad promedio) de las probetas con cada contenido de asfalto-caucho y se elabora una gráfica que las relacione (ordenadas) con el contenido de asfalto-caucho (abscisas). Ver Figura 824 - 1.

6 DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y EL FLUJO

- 6.1** La estabilidad, la estabilidad corregida por la altura y el flujo, se determinan como se indica en la norma INV E-748. La estabilidad se expresará con aproximación a 50 N (10 lb) y el flujo a 0.25 mm (0.01"), tanto para las probetas individuales como para los promedios de los valores de las tres probetas elaboradas con cada contenido de asfalto-caucho.
- 6.2** Se elaboran curvas relacionando la estabilidad corregida y el flujo de cada juego contra el contenido respectivo de asfalto-caucho. Ver Figura 824 - 1.

Nota 14: Los flujos de las probetas elaboradas con asfalto-caucho son, generalmente, mayores que los obtenidos en mezclas con asfaltos convencionales.

7 GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA DE LA MEZCLA (G_{mm})

- 7.1** Se deberá determinar de acuerdo con las normas INV E-735 o INV E-803, con las siguientes modificaciones:
- 7.1.1** Se elabora una mezcla que contenga el 6 % de asfalto-caucho en relación con la masa de la mezcla. No se permite la inclusión de activadores de adherencia líquidos.
 - 7.1.2** Se extiende la mezcla sobre una bandeja grande, en el espesor correspondiente al tamaño máximo nominal de partículas, impidiendo la formación de grumos.
 - 7.1.3** Se cura la mezcla en el horno por $2 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$, a $150 \pm 3^\circ \text{ C}$ ($300 \pm 5^\circ \text{ F}$).
 - 7.1.4** Inmediatamente después de su remoción del horno, se coloca la muestra sobre una lona o un papel grueso y se somete a un proceso de enrollado seguido por su extensión en forma de círculo. La masa circular se corta en seis segmentos iguales. Se toman segmentos opuestos para cada espécimen individual y se utiliza toda la amasada.
 - 7.1.5** Luego de la ejecución del ensayo sobre los tres especímenes y de determinar el G_{mm} promedio, se calcula la gravedad específica efectiva del agregado combinado, con la expresión:

$$G_{se} = \frac{100 - P_{br}}{100 - \frac{P_{br}}{G_b}} \quad [824.4]$$

Donde: G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado combinado;

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla;

P_{br} : Porcentaje de asfalto-caucho en la mezcla con la cual se determinó la G_{mm} (6.0 %);

G_b : Gravedad específica del asfalto-caucho.

- 7.1.6** Se calcula la G_{mm} para los diferentes contenidos de asfalto-caucho con los cuales se elaboraron las probetas, empleando la fórmula:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad [824.5]$$

Donde: G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla (sin vacíos con aire);

P_s : Porcentaje de agregado en la mezcla ($100 - P_b$);

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado combinado (numeral 7.1.5);

P_b : Porcentaje de asfalto-caucho en la mezcla;

G_b : Gravedad específica del asfalto-caucho.

8 CÁLCULO DE VACÍOS Y DEL PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO

8.1 Para cada contenido de asfalto-caucho usado, se calculan los vacíos con aire efectivos (V_a), el porcentaje de ligante absorbido (P_{ba}), los vacíos en los agregados minerales (VAM) y los vacíos llenos de asfalto (VFA), de la siguiente manera:

8.1.1 Vacíos con aire efectivos (V_a):

$$V_a = 100 \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad [824.6]$$

Donde: V_a : Vacíos efectivos en la mezcla compactada con un contenido de asfalto-caucho, % del volumen total;

G_{mm} : Gravedad específica máxima medida con un contenido de asfalto-caucho;

G_{mb} : Gravedad específica bulk promedio de las probetas compactadas con un contenido de asfalto-caucho.

8.1.2 Porcentaje de ligante absorbido (P_{ba}):

$$P_{ba} = 100 \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} G_b \quad [824.7]$$

Donde: P_{ba} : Ligante asfáltico (asfalto-caucho) absorbido, % respecto de la masa de la mezcla total;

G_{se} : Gravedad específica del agregado combinado;

G_b : Gravedad específica del ligante (asfalto-caucho);

G_{sb} : Gravedad específica bulk de los agregados combinados, secada al horno (numeral 3.4.2).

Nota 15: El porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba}) y la gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}) no varían con el contenido de asfalto en la mezcla.

8.1.3 Vacíos en los agregados minerales (VAM):

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sa}} P_s \quad [824.8]$$

Donde: VAM: Vacíos en los agregados minerales, % del volumen total;

G_{sb} : Gravedad específica bulk de los agregados combinados, secada al horno (numeral 3.4.2);

G_{mb} : Gravedad específica bulk promedio de las probetas compactadas con un contenido de asfalto-caucho;

P_s : Porcentaje de agregado dentro del total de la mezcla ($100 - P_b$);

8.1.4 Vacíos llenos de asfalto (VFA):

$$VFA = 100 \frac{VAM - V_a}{V_{AM}} \quad [824.9]$$

Donde: VFA: Vacíos llenos de asfalto, %;

VAM: Vacíos en los agregados minerales, % del volumen total (numeral 8.1.3);

V_a: Vacíos con aire efectivos en la mezcla compactada, % del volumen total (numeral 8.1.1).

9 DIBUJO DE CURVAS Y SELECCIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE LIGANTE (ASFALTO–CAUCHO)

- 9.1 Usando una gráfica separada para cada uno de los parámetros calculados según se menciona en los numerales 5.3, 6.2, 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3 y 8.1.4, se dibujan curvas con los respectivos valores promedio para cada juego de tres probetas contra el contenido de ligante (asfalto–caucho), como se muestra en la Figura 824 - 1.
- 9.2 El contenido de ligante de diseño será aquel que satisfaga los criterios establecidos para el diseño y que, simultáneamente dé lugar a un volumen de vacíos con aire lo más cercano posible al valor medio del rango especificado.
- 9.3 Si no es posible lograr el cumplimiento de las especificaciones de diseño dentro del rango de los contenidos de asfalto–caucho empleados, se deberán realizar amasadas con otros contenidos de asfalto–caucho o rediseñar la mezcla cambiando la gradación o la provisión de los agregados.
- 9.4 Empleando la ecuación del numeral 7.1.6, se calcula la G_{mm} para el contenido óptimo de ligante de diseño. La densidad máxima se obtendrá multiplicando este valor por la densidad del agua a 25° C (77° F) (997.0 kg/m³, 0.997 g/cm³ o 62.4 lb/pe³).

10 CÁLCULOS ADICIONALES

- 10.1 Con fines de información, se calculan las siguientes propiedades volumétricas para el contenido óptimo de asfalto–caucho:

- 10.1.1 Porcentaje de ligante efectivo (P_{be}), % respecto de la masa de la mezcla:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s \quad [824.10]$$

Donde: P_b : Porcentaje óptimo de asfalto-caucho en la mezcla;

P_{ba} : Ligante asfáltico (asfalto-caucho) absorbido, % respecto de la masa de la mezcla total;

P_s : Porcentaje de agregado dentro del total de la mezcla ($100 - P_b$).

10.1.2 *Volumen de ligante efectivo (V_{be}), % respecto del volumen total de la mezcla:*

$$V_{be} = \frac{G_{mb}}{G_b} P_{be} \quad [824.11]$$

Donde: G_{mb} : Gravedad específica bulk de las probetas compactadas, correspondiente al contenido óptimo de asfalto-caucho (se halla por interpolación en la gráfica correspondiente);

G_b : Gravedad específica del ligante (asfalto-caucho);

P_{be} : Porcentaje óptimo de ligante efectivo (numeral 10.1.1).

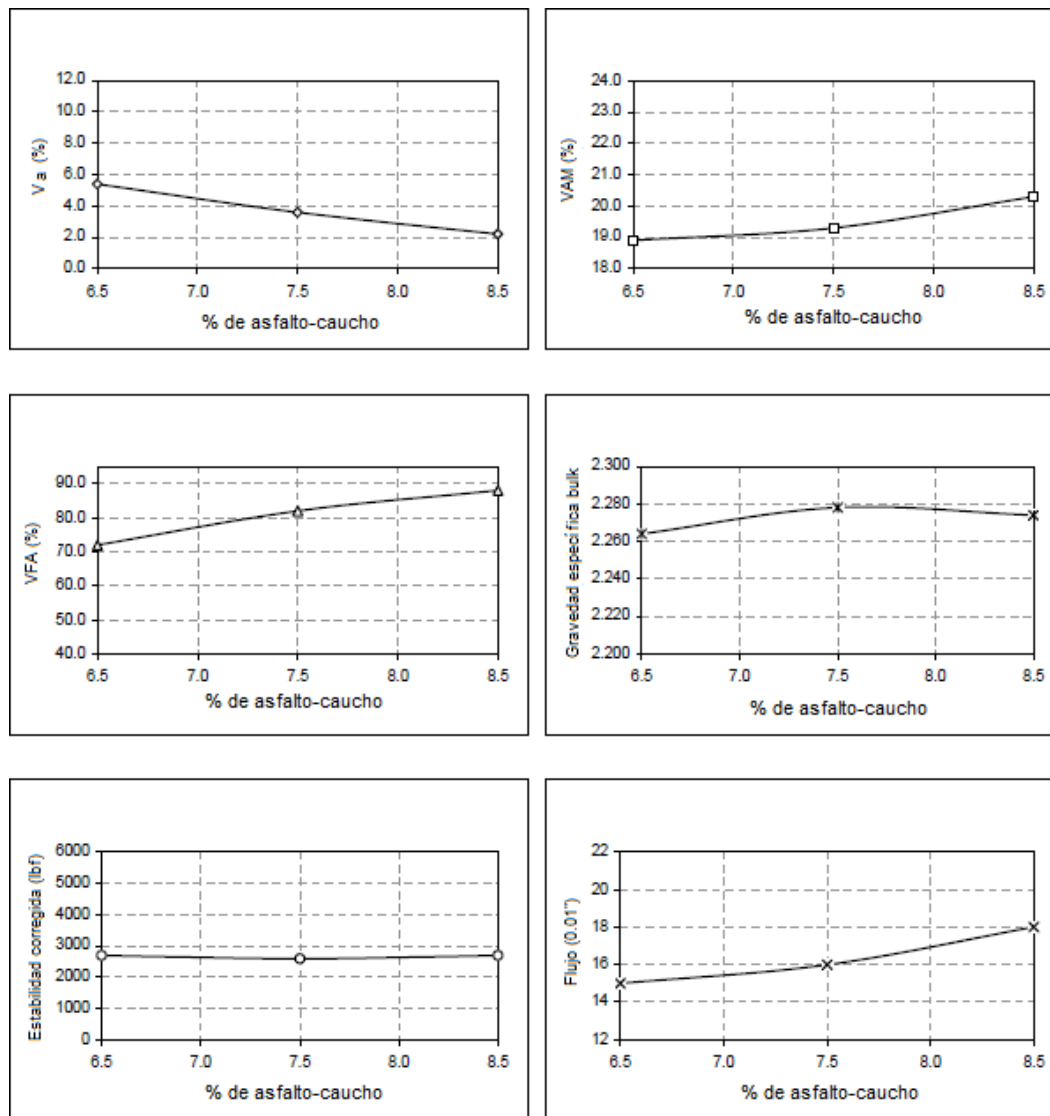


Figura 824 - 1. Ejemplo de curvas con los resultados del diseño de la mezcla por el método Marshall

11 INFORME

11.1 La información requerida en el diseño de la mezcla incluye:

11.1.1 Para los agregados:

11.1.1.1 Procedencia e identificación de cada uno.

11.1.1.2 Gradaciones individuales.

- 11.1.1.3** Tipo de llenante de aporte y gravedad específica.
- 11.1.1.4** Proporciones en que se mezclaron los agregados y el llenante para obtener la gradación de diseño.
- 11.1.1.5** Gravedades específicas y absorciones de los agregados.
- 11.1.1.6** Gravedad específica de los agregados combinados.
- 11.1.1.7** Resultados de los ensayos de calidad de los agregados, según lo requiera la especificación aplicable.
- 11.1.2** *Para el ligante bituminoso:*
 - 11.1.2.1** Procedencia y tipo del asfalto base.
 - 11.1.2.2** Procedencia y tipo de los gránulos de caucho.
 - 11.1.2.3** Gradación de los gránulos de caucho.
 - 11.1.2.4** Proporciones de asfalto y caucho en el ligante.
 - 11.1.2.5** Resultados de los ensayos sobre el asfalto-caucho, exigidos por las especificaciones.
 - 11.1.2.6** Gravedad específica del asfalto-caucho.
- 11.1.3** Gravedad específica máxima y densidad máxima para el contenido de ligante con el cual se realizó el ensayo para su determinación (Ver Sección 7).
- 11.1.4** *Probetas para cada contenido de asfalto-caucho utilizado:*
 - 11.1.4.1** Gravedad específica bulk (G_{mb}) de las probetas compactadas.
 - 11.1.4.2** Gravedad específica máxima (G_{mm}) calculada.
 - 11.1.4.3** Vacíos con aire efectivos (V_a), %.
 - 11.1.4.4** Vacíos en los agregados minerales (VAM), %.
 - 11.1.4.5** Vacíos llenos con asfalto (VFA), %.

11.1.4.6 Porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba}).

11.1.4.7 Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}) (Este valor no varía).

11.1.4.8 Estabilidad Marshall corregida, redondeada a 50 N (10 lbf).

11.1.4.9 Flujo Marshall, redondeado a 0.25 mm (0.01").

11.1.5 *Diseño final:*

11.1.5.1 Contenido óptimo de ligante (asfalto-caucho) y, para éste: G_{mm} , gravedad específica bulk y densidad, V_a , VAM, VFA, P_{be} , V_{be} , estabilidad corregida y flujo Marshall.

12 NORMAS DE REFERENCIA

ARIZ 832 (Noviembre 14, 2008) (Arizona Department of Transportatio