

## **Método Marshall para mezclas asfálticas**

NLT-159/63

### **1. OBJETO**

- 1.1. Este método recoge el procedimiento que debe seguirse para la realización del ensayo Marshall con las mezclas asfálticas.
- 1.2. El método puede emplearse tanto para el proyecto de mezclas asfálticas como para el control en obra de las mismas.
- 1.3. El ensayo sólo puede aplicarse a mezclas asfálticas de fabricación en caliente en las que el aglomerante sea betún de penetración, y con áridos cuyo tamaño máximo sea 25,4 mm. (1") o menor.
- 1.4. El método en sí comienza con la preparación de probetas fabricadas con la mezcla asfáltica, pero previamente a esta operación es necesario:
  - a) Que los materiales se hayan ensayado para saber si cumplen las especificaciones.
  - b) Que se hayan dosificado los distintos tamaños de áridos, con objeto de que la granulometría total cumpla los requisitos de la especificación.
  - c) Que se haya estudiado en obra, el machaqueo, clasificación y acopio de los áridos, para poder conseguir por mezcla de ellos la granulometría apropiada y su constancia.
  - d) Que se haya determinado el peso específico real de los áridos y el peso específico del filler y del betún, para emplearlos en los cálculos de densidades y huecos.
- 1.5. En el método se emplean probetas normalizadas de 63,5 mm. (2,5") de altura y 101,6 mm. (4") de diámetro, preparadas como se describe más adelante. Con ellas se realiza un análisis de densidad y huecos, y se las somete a un ensayo de estabilidad y deformación.
- 1.6. La estabilidad Marshall es la carga máxima que resiste la probeta a 60° C. cuando se realiza el ensayo de rotura a compresión de la forma que se indica en el método.

La deformación es la variación de diámetro que como consecuencia de la plasticidad sufre la probeta en el ensayo de estabilidad entre la carga cero y el instante de la rotura (carga máxima), medida en centésimas de pulgada.

## 2. APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

### 2.1. Preparación de las probetas.

- 2.1.1. Bandejas metálicas para calentar los áridos de  $40 \times 20$  cms.
- 2.1.2. Cazos de aluminio de dos litros de capacidad para mezclar los áridos con el betún.
- 2.1.3. Placa de calefacción eléctrica de  $60 \times 40$  cm., o estufa para calentar los áridos y el material necesario.
- 2.1.4. Cogedor curvo para manejar los áridos calientes.
- 2.1.5. Cazos de aluminio de un litro para calentar y añadir el betún.
- 2.1.6. Termómetro metálico o de vidrio protegido con armadura metálica con escala de 0 a  $200^{\circ}$  C.
- 2.1.7. Balanza de 1.600 grs. de capacidad y sensibilidad de 0,1 gr.
- 2.1.8. Espátula triangular estrecha para mezclar.
- 2.1.9. Baño con agua hirviendo para poder sumergir los moldes y el pisón de compactación.
- 2.1.10. Base de compactación consistente en un trozo de poste cuadrado de madera, de sección transversal mínima de  $15 \times 15$  centímetros con una placa de acero de 2,54 mm. (1") de gruesa en su parte superior, instalada sobre una base rígida de hormigón.
- 2.1.11. Molde de compactación compuesto por una placa de base, molde y collar. La placa de base y el collar podrán acoplarse a ambos lados del molde propiamente dicho. La forma y dimensiones son las que se indican en los croquis adjuntos.
- 2.1.12. Maza de compactación consistente en una base plana y circular de 98,4 mm. ( $3 \frac{7}{8}$ ") y un peso de 4.536 gr. (10 libras) montados de forma que se pueda conseguir una caída libre del peso sobre la base desde una altura de 457,2 mm. (18"). La forma y dimensiones son las que se indican en los croquis adjuntos.
- 2.1.13. Soporte del molde.—Cualquier dispositivo que permita mantener el molde de compactación sobre la base mientras se está compactando.
- 2.1.14. Recipiente de 15 litros de capacidad, con agua para poder sumergir y enfriar las probetas después de compactadas.
- 2.1.15. Guantes de amianto para poder manejar el material caliente.
- 2.1.16. Lápiz graso rojo para marcar las probetas.
- 2.1.17. Papel de filtro en círculos de 100 mm. de diámetro.
- 2.1.18. Aceite lubricante.

### 2.2. Determinación de la densidad.

- 2.2.1. Balanza de 1.600 gr. de capacidad y sensibilidad de 0,1 gr. con dispositivo hidrostático y recipiente de vidrio adecuado para sumergir las probetas.
- 2.2.2. Parafina.
- 2.2.3. Recipiente o cazo para derretir la parafina.
- 2.2.4. Pincel ancho para aplicar la parafina.

### 2.3. Determinación de la estabilidad y la deformación.

- 2.3.1. Prensa mecánica provista de anillo dinamométrico de 0 a 3.000 kg. capaz de aplicar la carga a una velocidad constante de 50,8 mm. (2") por minuto.

- 2.3.2. Mordazas de rotura para ensayo de las probetas con las dimensiones y forma del croquis adjunto.
- 2.3.3. Medidor de deformación según el croquis adjunto o cualquier otro dispositivo que permita medir la variación de diámetro de las probetas durante el ensayo de estabilidad.
- 2.3.4. Baño de agua con control termostático para sumergir y calentar las probetas, capaz de regular la temperatura a  $60 \pm 0,5^\circ \text{C}$ .
- 2.3.5. Guantes de goma gruesa para manejar las probetas en el baño.

## P R O C E D I M I E N T O

### 3. PREPARACION DE LAS MEZCLAS

- 3.1. Por medio del método Marshall se determina el contenido óptimo de betún para una mezcla de áridos de una composición y granulometría determinadas. Para ello se prepara una serie de probetas en las cuales el contenido de betún de la mezcla se va aumentando de medio en medio por ciento, realizando tantas mezclas como sean necesarias para que por lo menos se tengan dos contenidos de betún por encima y por debajo del óptimo. Para empezar a trabajar se hace una estimación del contenido de betún óptimo y con objeto de obtener datos más precisos se moldean tres probetas, como mínimo, de cada contenido de betún. Por tanto, el estudio de una mezcla asfáltica realizando una serie de probetas con seis contenidos de betún diferentes, exige la fabricación de 18 probetas. Cada probeta necesita normalmente unos 1.200 gr. de áridos y por ello la cantidad mínima de mezcla de áridos será de unos 25 kg. La cantidad de betún necesaria será de unos 2 kg.
- 3.2. Fijada previamente la composición en tanto por ciento de cada árido para obtener la granulometría total de la mezcla que se desea, se calcula el peso necesario de cada uno de ellos para realizar la amasada de cada probeta, de 1.200 a 1.300 gr., en principio. Después de compactar la primera probeta se mide su altura, que deberá ser de  $63,5 \pm 3,2 \text{ mm. } (2 \frac{1}{2} \pm 1/8")$ . Si estuviera fuera de los límites se ajusta el peso de la mezcla por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Peso necesario} = \frac{63,5 \times \text{Peso de la mezcla empleada}}{\text{Altura obtenida en la probeta}}$$

Las probetas deben tener las siguientes medidas: diámetro,  $101,6 \pm 0,25 \text{ mm. } (4'' \pm 0,1'')$ ; altura,  $63,5 \pm 3,2 \text{ mm. } (2 \frac{1}{2} \pm 1/8'')$ ,

- 3.3. Se echan en recipientes apropiados, bandejas o cazos, fracciones representativas de los áridos tomados por cuarteo y se calientan en una placa eléctrica o estufa a una temperatura comprendida entre  $175$  y  $190^\circ \text{C}$ .
- 3.4. Se calienta también el betún necesario dentro de un cazo sobre la placa eléctrica, o en estufa, a una temperatura comprendida entre  $145$  y  $160^\circ \text{C}$ . No debe mantenerse el betún a esta temperatura más de una hora y no debe emplearse betún recalentado. El betún dentro del recipiente se agita frecuentemente para evitar los sobrecalentamientos locales.

- 3.5. Se tara el recipiente donde se va a efectuar la mezcla y se pesan en él las fracciones correspondientes de cada árido, previamente determinadas, necesarias para fabricar una probeta, empleando el método acumulativo.
- 3.6. Se agita la mezcla de áridos y se forma un cráter en el centro. Se añade entonces la cantidad necesaria de betún. En este momento la temperatura de los áridos debe estar comprendida entre 140 y 155° C. y en todo caso ser algo inferior a la del betún.
- 3.7. Se mezclan vigorosamente los áridos con el betún, bien mecánicamente o a mano, tan rápidamente como sea posible. Una vez conseguida una distribución uniforme del betún se añade el peso necesario de filler sin calentar y se sigue agitando hasta conseguir una mezcla de composición homogénea.
- 3.8. Al terminar la operación de mezclado, la temperatura de la mezcla dispuesta para la compactación no debe ser inferior a 110° C. En caso de ser más baja se desecha la amasada. Con objeto de obtener resultados más uniformes, y sobre todo en el proyecto de dosificaciones, es conveniente mantener lo más exactamente posible una misma temperatura de la mezcla ( $125 \pm 5^\circ \text{C.}$ ) para las distintas amasadas, en el momento de la compactación. En ningún caso la muestra será recalentada.
- 3.9. En lugar del procedimiento descrito en los párrafos 3.3, 3.5 y 3.6., se pueden pesar y mezclar los áridos previamente antes de calentarlos.

#### 4. COMPACTACION DE LAS PROBETAS

- 4.1. Antes de preparar la mezcla el conjunto del molde y la base de la maza de compactación se limpian y se calientan a una temperatura entre 100 y 150° C., colocándolos sobre una placa eléctrica, en una estufa o bien sumergiéndolos en un baño de agua hirviendo.
- 4.2. Colocado el molde de compactación caliente sobre la mesa de trabajo, se coloca un disco de papel de filtro o de estroza de 10 cm. de diámetro sobre la superficie de la base del molde.
- 4.3. Se echa entonces dentro del molde la mezcla recién amasada, a la temperatura correcta, por medio de un cogedor curvo, evitando las segregaciones de material y distribuyendo bien la mezcla dentro del molde por medio de una espátula, dando al final una forma redondeada a la superficie.
- 4.4. Se traslada el molde con la mezcla a la base de compactación y se le aplica el número de golpes especificado con la maza. Hay que procurar que la base del molde y la de la maza se mantengan paralelas mientras se aplican los golpes, para lo cual la varilla guía debe mantenerse vertical.
- 4.5. Después de apisonar la primera cara se desmonta el collar, se invierte el molde con la probeta, se vuelve a poner el collar y se aplican los golpes por la otra cara.
- 4.6. Normalmente se aplican 50 golpes por cada cara en la compactación de mezclas proyectadas para tráfico con 7,5 kg/cm.<sup>2</sup> de presión en los neumáticos y 75 golpes por cada cara cuando la presión es de 15 kg/cm.<sup>2</sup>

- 4.7. Terminada la compactación, se desmonta el collar y la base y se sumerge el molde con la probeta en un cubo con agua fría, por lo menos durante dos minutos.
- 4.8. Una vez fría, se saca la probeta del molde por medio del extractor en la prensa y se colocan cuidadosamente sobre una superficie plana hasta que se ensayen, marcándolas para su identificación.

## 5. DETERMINACION DE LA DENSIDAD APARENTE DE LAS PROBETAS

- 5.1. Esta determinación se realiza tan pronto como las probetas recién compactadas se han enfriado a la temperatura ambiente.
- 5.2. La densidad aparente de las probetas se determina calculando la relación entre su peso en aire y su volumen. La densidad se puede determinar por tres métodos diferentes.
- 5.3. El primer método se emplea cuando la textura superficial de las probetas es cerrada e impermeable. En este caso el volumen aparente de la probeta se obtiene restando del peso de la probeta en el aire, el peso de la probeta sumergida en agua sin haber recubierto su superficie con parafina.

La densidad aparente viene entonces dada por la fórmula:

$$D = \frac{P_a}{v} = \frac{P_a}{P_a - P_{ag}}$$

donde:

$P_a$  = Peso en el aire, gr.  
 $P_{ag}$  = Peso en el agua, gr..

- 5.4. El segundo método se aplica a mezclas cuya superficie es abierta y permeable. En este caso el volumen aparente se determina restando del peso de la probeta en el aire, el peso de la probeta en el agua, pero habiendo recubierto previamente a ésta de una capa de parafina.

La densidad aparente viene dada por la fórmula:

$$D = \frac{P}{V} = \frac{P_a}{P_{pa} - P_{pag} - \left( \frac{P_{pa} - P_a}{P_p} \right)}$$

donde:

$P_a$  = Peso de la probeta en el aire sin parafina, gr.  
 $P_{pa}$  = Peso de la probeta en el aire con parafina, gr.  
 $P_{pag}$  = Peso de la probeta en el agua con parafina, gr.  
 $P_p$  = Peso específico de la parafina empleada.

- 5.5. El tercer método se aplica a probetas con superficie cerrada y lisa, cuando sus dimensiones pueden ser medidas con precisión. En este caso, el volumen aparente de la probeta se calcula a partir de la medida exacta de su diámetro y altura.

La densidad aparente viene dada en este caso por la fórmula:

$$D = \frac{P}{V} = \frac{Pa}{0,7854 D^2 A} = \frac{Pa}{81,05 \times A}$$

donde:

Pa = Peso de la probeta en el aire, gr.

D = Diámetro de la probeta, cm.

A = Altura de la probeta, cm.

- 5.6. En el caso de probetas sin cubrir de parafina, se dejan durante una hora como mínimo a la temperatura ambiente antes de pesarlas en el aire y en el agua.
- 5.7. Cuando las probetas están parafinadas se comienza como en el caso anterior, pesando la probeta en el aire antes de parafinarla. A continuación se enfría, si es posible, la probeta a unos 5° C. durante media hora y se sumerge en un recipiente con parafina caliente. Si es necesario se da con un pincel más parafina en los puntos mal cubiertos. Se deja que se enfríe la parafina durante media hora y se determina su peso en el aire a la temperatura ambiente. Se sumerge la probeta parafinada en agua a 25° C. durante cuatro horas y se pesa en agua.

## 6. DETERMINACION DE LA ESTABILIDAD Y LA DEFORMACION

- 6.1. Después de haber determinado la densidad aparente de las probetas se realiza el ensayo de su estabilidad y deformación como sigue:
- 6.2. Se comprueba el cero del medidor de deformación, colocando en la mordaza de rotura un cilindro metálico o de madera de 101,6 mm. (4") e insertando el medidor de deformación sobre la varilla de guía. Este calibrado debe hacerse sobre la varilla guía marcada y con las señales de las mordazas de rotura coincidiendo.
- 6.3. Se sumergen las probetas en un baño de agua a 60,0° C.  $\pm$  0,5° C., durante un tiempo superior a veinte minutos e inferior a treinta minutos. Para muestras con alquitrán el mismo tiempo a 37,8  $\pm$  1° C.
- 6.4. Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas de rotura y se engrasan las varillas de guía con una película de aceite de manera que la mordaza superior se deslice libremente.
- 6.5. Si se emplea anillo dinamométrico se comprueba que el cuadrante marque cero cuando el anillo está sin carga.
- 6.6. Se saca entonces la probeta del baño y se seca cuidadosamente su superficie con un paño. Se coloca centrada sobre la mordaza inferior, se monta entonces la mordaza superior y el conjunto se sitúa centrado en la prensa.
- 6.7. Se monta el medidor de deformación sobre la varilla guía marcada y se comprueba la lectura inicial. (Ver croquis adjunto.)
- 6.8. Se aplica entonces la carga a la probeta a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm. por minuto (2"/minuto) hasta que se produce la rotura. El punto de rotura viene definido por la carga máxima obtenida. Los kilos necesarios para producir la rotura de la probeta a 60,0° C. es el valor de la estabilidad Marshall.

- 6.9. Mientras se está determinando la estabilidad se mantiene firmemente el medidor de deformación en su posición sobre la varilla de guía, y cuando se llega a la carga máxima se levanta sujetándolo con un dedo mientras se lee y anota la medida. Esta lectura es el valor de la deformación expresándolo en centésimas de pulgada.
  - 6.10. El proceso desde el momento de sacar la probeta del baño de agua hasta la rotura de la misma, debe realizarse en un tiempo inferior a treinta segundos.
  - 6.11. Los valores de la estabilidad de las probetas cuya altura no está comprendida dentro de la tolerancia,  $63,5 \pm 3,2$  mm. ( $2\ 1/2 \pm \pm 1/8''$ ), se corrigen (empleando la tabla que se incluye al final de la norma) multiplicándolas por el factor correspondiente, después de medir su altura o su volumen con precisión.
  - 6.12. Se determina el valor medio de la estabilidad para cada tanto por ciento de betún, eliminando por erróneos aquellos que se aparten demasiado del valor medio.
  - 6.13. Se determina de la misma forma el valor medio de la deformación para cada tanto por ciento de betún.
7. ANALISIS DE LA DENSIDAD Y LOS HUECOS DE LAS PRO-BETAS.
- 7.1. Después de terminar el ensayo de estabilidad y deformación se hace un análisis de la densidad y los huecos para cada serie de probetas de la siguiente forma:
  - 7.2. Densidad aparente media de las probetas.—Se determina el valor medio de la densidad aparente de las probetas hechas con el mismo tanto por ciento de betún. Los valores dispares no se incluyen en el cálculo.
  - 7.3. Densidad aparente corregida de las probetas.—Se pasan los valores medios de la densidad a un gráfico de «densidad-tanto por ciento de betún», y tomando como referencia los puntos hallados se dibuja una línea curva de trazo continuo y suave. Por medio de la curva se obtienen los valores corregidos de la densidad para cada tanto por ciento de betún. Estos valores son los que se emplearán en el cálculo de los huecos de las probetas.
  - 7.4. Empleando los pesos específicos «reales» de los áridos y los pesos específicos del filler y del betún, se calcula el peso específico medio de los áridos y la densidad teórica máxima de las mezclas y de los áridos compactados para cada tanto por ciento de betún. Con estos datos y la densidad corregida de las probetas se determinan los huecos totales de las mezclas, los huecos de los áridos compactados, los huecos de los áridos rellenos con betún y el tanto por ciento de la densidad obtenida respecto a la densidad máxima de la mezcla.  
Todos estos cálculos pueden realizarse a partir de las proporciones en peso o en volumen de los componentes de la mezcla, y cuando se opere hay que tener en cuenta que el betún puede dosificarse en tanto por ciento respecto a un peso cien de áridos o en tanto por ciento respecto a cien de mezcla.
  - 7.5. Para el paso de las proporciones en peso a volumen, y viceversa, es conveniente tener en cuenta que:

El peso total de una probeta compactada será:

$$P_p = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + \dots$$

donde:

$P_p$  es el peso total de la probeta y  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , son los pesos de cada componente de la mezcla, árido grueso, fino, filler, betún, etc.

La composición de la mezcla se puede expresar también por medio de los tantos por ciento en peso de cada constituyente, respecto al total de la mezcla, y tendremos que:

$$P = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + \dots \text{ etc.} = 100 \%$$

El volumen teórico de cada componente de la probeta viene expresado por la relación:

$$V_1 = \frac{P_1}{P_{e1}}$$

donde:

$V_1$  = Volumen teórico del material.  
 $P_1$  = Peso del material.  
 $P_{e1}$  = Peso específico del material.

El volumen aparente (total) de las probetas compactadas viene expresado por:

$$V_p = H + V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots \text{ etc.} \quad \text{ó}$$

$$V_p = H + \frac{P_1}{P_{e1}} + \frac{P_2}{P_{e2}} + \frac{P_3}{P_{e3}} + \frac{P_4}{P_{e4}} + \dots \text{ etc.}$$

y expresando la composición mediante los tantos por ciento en peso de cada constituyente respecto al total de la mezcla:

$$V = \% H + \frac{T_1}{P_{e1}} + \frac{T_2}{P_{e2}} + \frac{T_3}{P_{e3}} + \frac{T_4}{P_{e4}} + \dots \text{ etc.} = 100$$

donde:

$V_p$  es el volumen aparente de la probeta.  
 $H$  es el volumen de los huecos de la probeta.  
 $V_1, P_1, P_{e1}$  y  $T_1$ , son el volumen, el peso, el peso específico y el tanto por ciento en peso de cada componente de la probeta.

Las proporciones en volumen de cada componente se expresan en tanto por ciento respecto al volumen total de la probeta.

$$V_1 = \frac{P_1}{P_{e1}} = \frac{T_1 \times P_p}{100 \times P_{e1}}$$

Y el tanto por ciento del volumen total de la probeta ocupado por cualquiera de los materiales viene expresado por:

$$\% V_1 = \frac{100 \times V_1}{V_p} = \frac{T_1 \times P_p}{P_{e1} \times V_p} = \frac{T_1}{P_{e1}} \times D_p.$$

donde:



$V_1$  es el volumen del material en la probeta en cc.  
 $V_p$  es el volumen total de la probeta en cc.  
 $P_1$  es el peso del material en la probeta en gr.  
 $P_p$  es el peso total de la probeta en gr.  
 $T_1$  es el tanto por ciento de material en la mezcla.  
 $Pe_1$  es el peso específico del material.  
 $D_p$  es la densidad aparente de la probeta.

- 7.5. Peso específico de los áridos.—Con objeto de facilitar los cálculos, se calcula el peso específico medio de los áridos y filler por medio de la siguiente fórmula:

$$Pe \text{ áridos} = \frac{100}{\frac{T_1}{Pe_1} + \frac{T_2}{Pe_2} + \frac{T_3}{Pe_3} + \dots \text{ etc.}}$$

donde:

$Pe$  áridos, es el peso específico medio de los áridos.  
 $T_1, T_2, T_3$ , etc., son los tantos por ciento en peso, respecto a cien de mezcla de áridos, del árido grueso, fino, filler, etc.  
 $Pe_1, Pe_2, Pe_3$ , los pesos específicos respectivos.

- 7.6. Densidad teórica máxima de las mezclas compactadas.—Se calcula la densidad teórica máxima de las mezclas compactadas con cada uno de los distintos tantos por ciento de betún empleados, lo que representa el valor de la densidad o peso específico que se obtendría teóricamente si al compactar las mezclas se consiguiera una masa de áridos y betún sin huecos.

Las fórmulas a emplear por cada tanto por ciento de betún son las siguientes:

$$D \text{ máx.} = \frac{P}{\frac{P_1}{Pe_1} + \frac{P_2}{Pe_2} + \frac{P_3}{Pe_3} + \dots \text{ etc., o}}$$

$$D \text{ máx.} = \frac{100}{\frac{T_1}{Pe_1} + \frac{T_2}{Pe_2} + \frac{T_3}{Pe_3} + \dots \text{ etc., o}}$$

empleando el peso específico medio de los áridos:

$$D \text{ máx} = \frac{100}{\frac{T \text{ áridos}}{Pe \text{ áridos}} + \frac{T \text{ betún}}{Pe \text{ betún}}} \text{ o también}$$

$$D \text{ máx} = \frac{100}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \dots \text{ etc., o}}$$

$$D \text{ máx} = \frac{100}{V \text{ áridos} + V \text{ betún}}$$

donde:

$P_1, Pe, T, V$ , representan los pesos, pesos específicos, tanto por ciento en peso y tanto por ciento en volumen, respecto al total de la mezcla de cada uno de los componentes.

- 7.7. Tanto por ciento de la densidad máxima obtenida en la compactación de las mezclas.—La densidad aparente de las probetas se

puede también expresar en tanto por ciento respecto a la densidad teórica máxima que podría obtenerse con la mezcla, lo que se calcula mediante la fórmula:

$$\% D \text{ máx} = \frac{D_p}{D \text{ máx}} \times 100$$

donde:

$D \text{ máx.}$  es la densidad máxima teórica.  
 $D_p$  es la densidad aparente corregida de la probeta.

- 7.8. Tanto por ciento de huecos de las mezclas compactadas.—Los huecos de una mezcla compactada representan la diferencia entre el volumen aparente de la mezcla compactada y el volumen teórico absoluto del betún y los áridos.

El tanto por ciento de huecos puede calcularse de cualquiera de las siguientes formas:

$$\% H = 100 - \% D \text{ máx} = 100 - \frac{100 D_p}{D \text{ máx}} \quad \text{o}$$

$$\% H = 100 \times \frac{D \text{ máx} - D_p}{D \text{ máx}}$$

donde:

$\% H$  es el tanto por ciento de huecos respecto al volumen total.  
 $D \text{ máx.}$  es la densidad máxima.  
 $D_p$  es la densidad aparente de la probeta.

o calculando en volumen:

$$\% H = 100 - \% V \text{ betún} - \% V \text{ áridos}$$

donde:

$\% V \text{ betún}$  y  $\% V \text{ áridos}$  son el volumen del betún y de los áridos en tanto por ciento respecto al total de la probeta.

- 7.9. Tanto por ciento de huecos en los áridos compactados.—Para calcular el tanto por ciento de huecos que tienen los áridos apisonados se puede utilizar cualquiera de las siguientes fórmulas:

$$\% H A = 100 \times \frac{D \text{ máx áridos} - D \text{ apar. áridos}}{D \text{ máx áridos}}$$

donde:

$$D \text{ máx árido} = \frac{100}{\frac{T_1}{P_{e1}} + \frac{T_2}{P_{e2}} + \frac{T_3}{P_{e3}}} = P_e \text{ áridos}$$

$$D \text{ apar. áridos} = D_p \left( 1 - \frac{T \text{ betún}}{100} \right)$$

donde:

$T_1, T_2, T_3, P_{e1}, P_{e2}, P_{e3}$ , son los tantos por cientos y pesos específicos de los distintos áridos.  
 $D_p$ , es la densidad aparente de la probeta.  
 $T \text{ betún}$ , el tanto por ciento de betún de la mezcla.

o también por medio de la fórmula:

$$\% H A = 100 - \% V \text{ áridos}$$

- 7.10. Tanto por ciento de huecos de áridos apisonados rellenos con betún.—El volumen de huecos de áridos apisonados que quedan rellenos de betún se calcula en tanto por ciento por medio de una de las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Huecos de áridos rellenos de betún} = 100 \times \frac{\% \text{ H A} - \% \text{ H}}{\% \text{ H A}}$$

donde:

% H A es el tanto por ciento de huecos de los áridos apisonados, y  
% H es el tanto por ciento de huecos de la mezcla asfáltica.

o expresado de otra forma:

$$\% \text{ Huecos de áridos rellenos de betún} = 100 \times \frac{\% \text{ V betún}}{\% \text{ H A}}$$

donde:

% V betún es el volumen del betún en tanto por ciento del volumen total de la probeta.

% H A es el tanto por ciento de huecos de los áridos apisonados.

## 8. RESULTADOS

- 8.1. Con los valores medios de la estabilidad corregida, deformación, tanto por ciento de huecos de la mezcla y tanto por ciento de huecos rellenos de betún, para cada contenido de betún se dibujan los siguientes gráficos:

«Estabilidad —% de betún»

«Deformación —% de betún»

«% de huecos en la mezcla —% de betún»

«% de huecos rellenos con betún —% de betún»

- 8.2. En cada gráfico, lo mismo que se hizo en el ya previamente dibujado de «densidad —% de betún», tomando como referencia los puntos hallados se traza una línea curva de trazo continuo y suave y se obtienen los valores corregidos leídos sobre la curva para cada tanto por ciento de betún.

- 8.3. Para el trazado de las curvas ha de tenerse en cuenta, que en el caso de mezclas asfálticas densas, sus formas son las siguientes:

Los valores de la estabilidad van aumentando con el aumento del contenido de betún hasta un máximo después del cual disminuye.

Los valores de la deformación aumentan constantemente con el aumento del contenido de betún.

Los valores de la densidad aumentan con el contenido de betún hasta un máximo, descendiendo después de una manera similar a los de la estabilidad, pero, aunque no siempre, el máximo se produce con un contenido de betún un poco más alto.

El tanto por ciento de huecos de la mezcla disminuye cuando aumenta el contenido de betún, aproximándose continuamente a un mínimo.

El tanto por ciento de huecos rellenos con betún aumenta con el aumento del contenido de betún, aproximándose a un valor máximo.

## 9. DETERMINACION DEL CONTENIDO DE BETUN OPTIMO

- 9.1. Por medio de las curvas dibujadas como se indica en el párrafo anterior se determinan sobre ellas el contenido de betún para:
- La estabilidad máxima.
  - La densidad máxima.
  - El tanto por ciento de huecos que se especifique como óptimo.
  - El tanto por ciento de huecos rellenos que se especifique.
- 9.2. Con estos cuatro tantos por ciento de betún obtenidos se determina el valor numérico medio que será el contenido de betún óptimo de la mezcla.
- 9.3. Volviendo a los gráficos, con este contenido de betún óptimo se determinan los valores de estabilidad, deformación, huecos de la mezcla y huecos rellenos con betún, y se comprueba si cumplen con las especificaciones o con el criterio del proyecto.

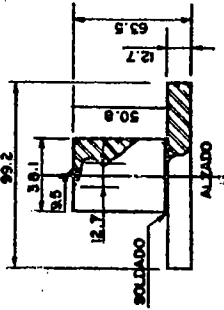
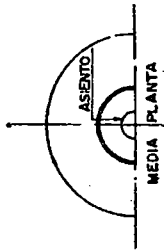
TABLA PARA LA CORRECCION DE LA ESTABILIDAD

Volumen de la muestra en centímetros cúbicos	Espesor aproximado de la muestra en centímetros	Factor de corrección
200 - 213	2,54	5,56
214 - 225	2,69	5,00
226 - 237	2,86	4,55
238 - 250	3,02	4,17
251 - 264	3,18	3,85
265 - 276	3,33	3,57
277 - 289	3,49	3,33
290 - 301	3,65	3,03
302 - 316	3,81	2,78
317 - 328	3,97	2,50
329 - 340	4,13	2,27
341 - 353	4,29	2,08
354 - 367	4,45	1,92
368 - 379	4,60	1,79
380 - 392	4,76	1,67
393 - 405	4,92	1,56
406 - 420	5,08	1,47
421 - 431	5,24	1,39
432 - 443	5,40	1,32
444 - 456	5,56	1,25
457 - 470	5,72	1,19
471 - 482	5,87	1,14
483 - 495	6,03	1,09
496 - 508	6,19	1,04
509 - 522	6,35	1,00
523 - 535	6,51	0,96
536 - 546	6,67	0,93
547 - 559	6,83	0,89
560 - 573	6,99	0,86
574 - 585	7,15	0,83
586 - 598	7,30	0,81
599 - 610	7,46	0,78
611 - 625	7,62	0,76

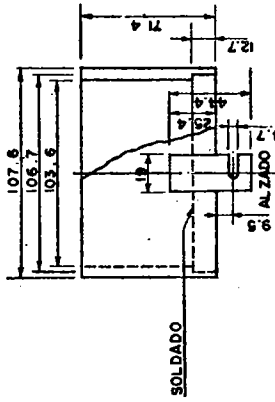
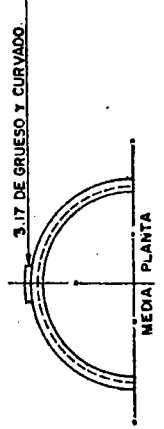
## 10. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS.

U. S. Corps of Engineers. Airfield Pavement Design, 1953.  
ASTM Designación: D 1559-60 T.

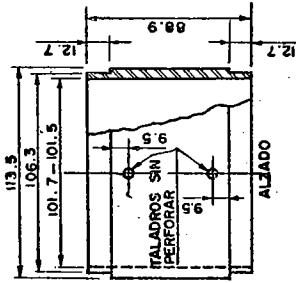
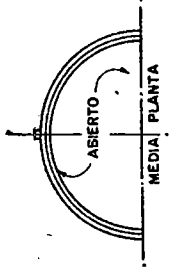
# MOLDE DE COMPACTAR PARA APARATO DE ESTABILIDAD MARSHALL



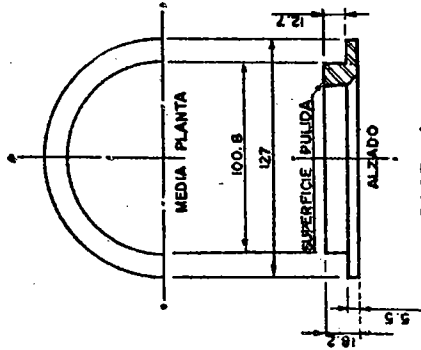
EXTRACTOR - 1



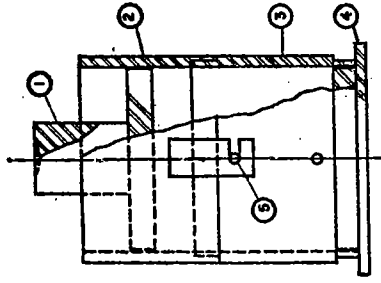
COLLAR - 2



MOLDE - 3



BASE - 4



CONJUNTO

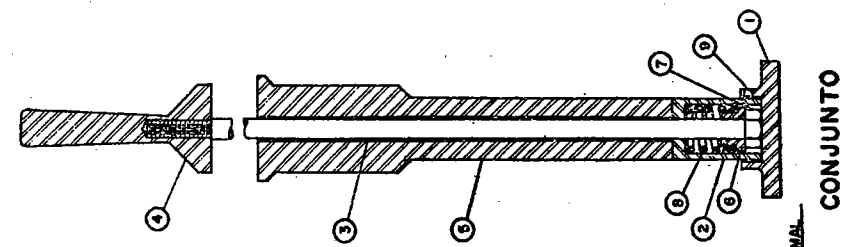
LISTA DE PIEZAS				
REFEREN. Nº NECES.	EXTRACTOR	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	PESO
1	1	EXTRACTOR	ACERO	1.227 K.
2	1	COLLAR	"	0.958 K.
3	3	MOLDE	"	1.315 K.
4	1	PLACA DE BASE	"	1.315 K.
PIEZAS NO DETALLADAS				
5	12	ESPIGAS 4.0 - 9.5 LONG.	"	0.009K.

COTAS EN MILIMETROS

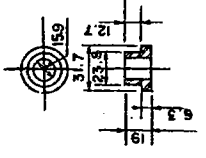
MAZA DE COMPACTACION PARA EL APARATO MARSHALL

**LISTA DE PIEZAS**

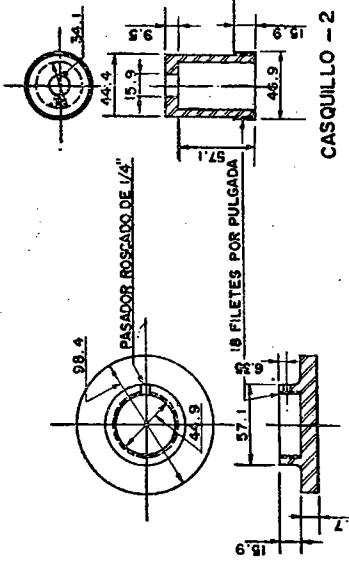
REFEREN.	NOMBRE	MATERIAL
1	BASE	ACERO
2	CASQUILLO	"
3	VARILLA DE GUIA	"
4	MANGO	"
5	PISON	"
6	GUIA DEL MUELLE	"
	PIEZAS NO DETALLADAS	"
7	TUERCA DE 5/8 DE 12.7 GRUESO	"
8	MUELLE	"
9	PASADOR ROSCADO DE 1/4"	"



CONJUNTO

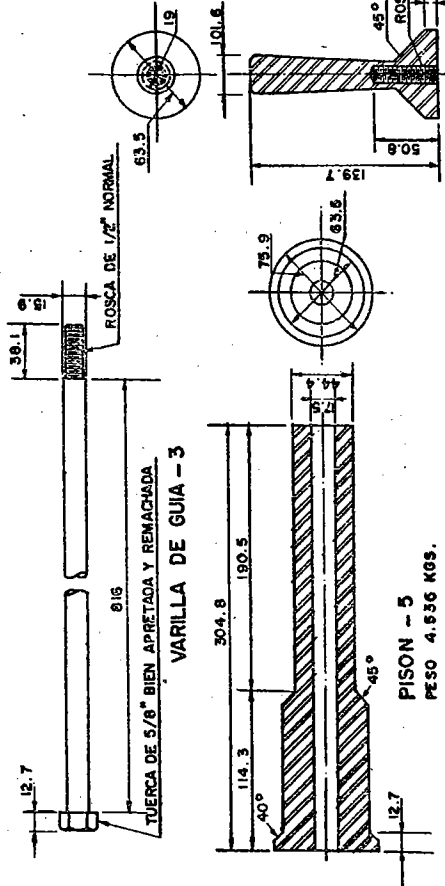


GUIA DEL MUELLE - 6



CASQUILLO - 2

BASE - 1



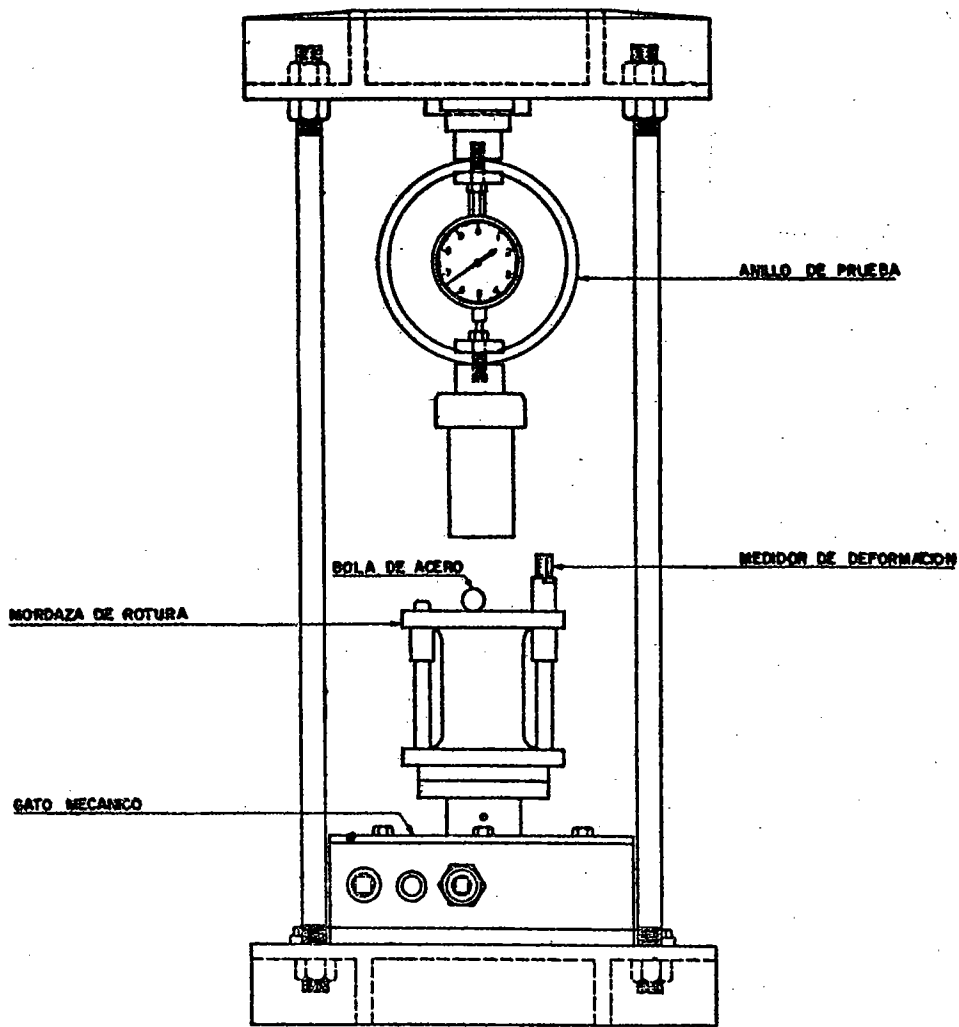
VARILLA DE GUIA - 3

PISON - 5

MANGO - 4  
PESO 6.05 GRs

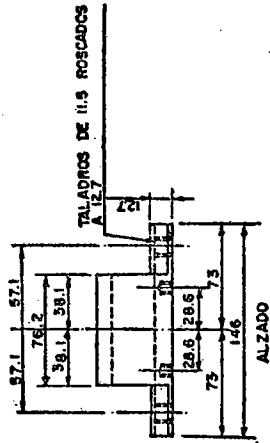
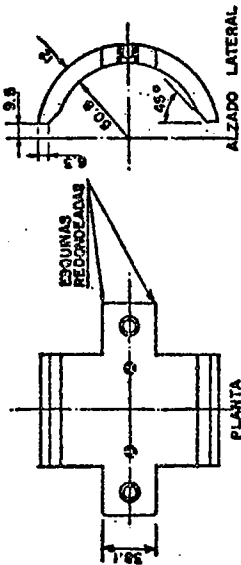
COTAS EN MILIMETROS

COLECCIÓN INGENIEROS DE CAMINOS  
BIBLIOTECA

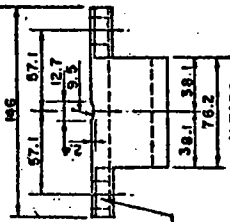
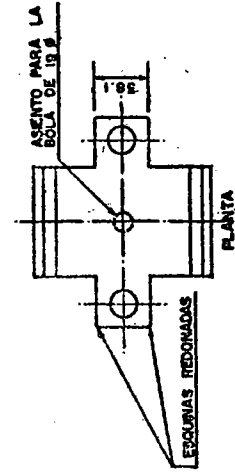


VISTA DE CONJUNTO DE LA PRENSA

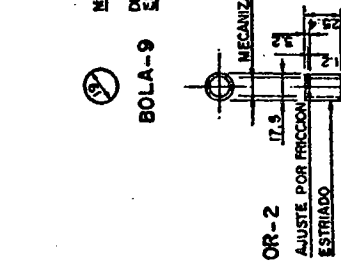
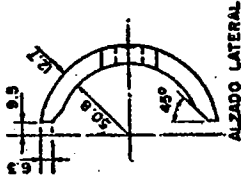
# MORDAZA DE ROTURA PARA EL APARATO MARSHALL



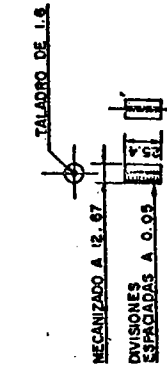
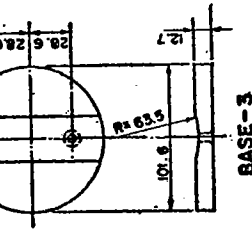
MORDAZA DE ROTURA SUPERIOR - 1



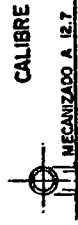
MORDAZA DE ROTURA INFERIOR - 2



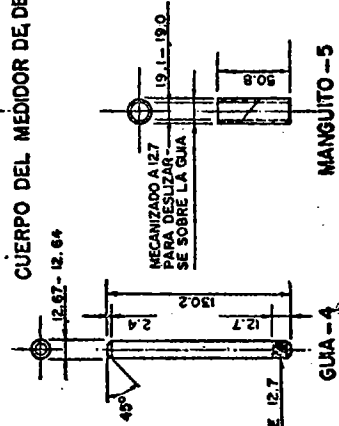
MORDAZA DE ROTURA INFERIOR - 2



BASE - 3

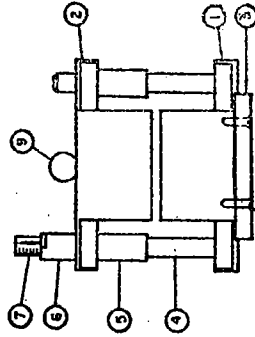


BOLA - 9



GUA - 4

CUERPO DEL MEDIDOR DE DEFORMACION - 6



CONJUNTO

LISTA DE PIEZAS			MATERIAL
REFEREN	NECES	DESCRIPCION	
1	1	MORDAZA DE ROTURA SUPERIOR	ACERO
2	1	" INFERIOR	"
3	1	BASE	"
4	2	GUAS	"
5	2	MANGUITO	"
6	1	CUERPO DEL MEDIDOR DE DEFORMACION	"
7	1	CALIBRE DEL MEDIDOR DE DEFORMACION	"
8	2	TORNILLOS	"
9	1	BOLA	"

COTAS EN MILIMETROS