

Capítulo 4

METODOLOGÍA Y TRABAJOS REALIZADOS

4.1. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se pretende realizar una completa descripción del procedimiento de trabajo llevado a cabo durante la ejecución de la tesina “Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente. Efecto del tipo y contenido de betún”. Para ello, se tendrá en cuenta el proceso de selección del material a utilizar, las prácticas o ensayos de laboratorio realizados y el análisis de los resultados obtenidos, aunque estos últimos serán a la vez objeto de un capítulo adicional.

Como ya se ha esbozado en capítulos anteriores, el objetivo de este trabajo tiene que ver con la necesidad de dar una mayor reutilización a los materiales que proceden del fresado de pavimentos de carreteras, que ya han estado en servicio y que por una u otra circunstancia han sufrido una degradación de sus características principales, en la fabricación de mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura.

Por otro lado, se encuentra la preocupación medioambiental que permite dar gran validez a este tipo de metodologías ya que, aplicadas correctamente, revierten grandes beneficios de diferentes tipos a la sociedad.

Finalmente y como primordial objetivo, se pretende determinar la influencia del contenido de RAP, tipo de betún y porcentaje del mismo, con presencia o no de agentes rejuvenecedores, sobre las propiedades fundamentales de los microaglomerados.

De acuerdo a lo descrito en los párrafos anteriores y para lograr un desarrollo adecuado del presente estudio, se tendrán en cuenta las siguientes propiedades de los microaglomerados reciclados:

- **Estabilidad:** La estabilidad es una propiedad fundamental de una mezcla y nos indica la capacidad de ésta a resistir las sollicitaciones del tráfico sin deformarse. Este fallo suele producirse en mezclas con exceso de ligante y con exposición a altas temperaturas. En el caso de mezclas fabricadas con RAP, uno de los problemas que pueden presentarse es la acumulación excesiva de ligante que pueda dar lugar a una baja estabilidad. Es por ello que uno de los principales parámetros a considerar es la influencia del contenido de RAP y de betún en la estabilidad del material fabricado.

Para evaluar la estabilidad del nuevo producto se ha empleado el ensayo Marshall, ensayando las probetas a una temperatura de 60°C.

- **Resistencia y tenacidad**: La resistencia y tenacidad son propiedades características de los materiales asfálticos. En estos casos, su rotura no se produce de forma frágil sino con una gran deformación y absorbiendo mucha energía una vez se ha iniciado el proceso de rotura (tenacidad). A medida que la mezcla va envejeciendo, se va haciendo más frágil y va perdiendo estas propiedades. Por ello, se ha querido analizar el efecto del contenido de RAP sobre la resistencia y tenacidad del nuevo microaglomerado fabricado, estudiando también el efecto del tipo y porcentaje de betún añadido.

Para el estudio de esta propiedad se ha empleado el ensayo BTM a tracción directa, ensayando las probetas a una temperatura de 20°C.

- **Resistencia a las deformaciones plásticas**: Debido al comportamiento viscoelastoplástico de las mezclas bituminosas, el paso de las cargas va produciendo una acumulación de deformaciones de tipo plástico, especialmente en condiciones de altas temperaturas o bajas velocidades. Si la mezcla no tiene unas características reológicas adecuadas, puede darse incluso una verdadera fluencia del material sobre todo en los microaglomerados, debido a que van a ser empleados bajo tráfico pesado en capa de rodadura. Este fenómeno tiene su manifestación más típica en las denominadas roderas, deformaciones plásticas longitudinales que se pueden llegar a producir en determinadas mezclas en las zonas de rodada de los vehículos pesados.

Para el estudio de esta propiedad se ha empleado el ensayo de pista de laboratorio, ensayando las probetas a una temperatura de 60°C.

De acuerdo con los objetivos de esta tesina y con los parámetros a determinar para un correcto análisis del empleo de material fresado de pavimentos en la fabricación de microaglomerados en caliente y su posterior caracterización frente a las propiedades anteriormente descritas, se han escogido como ensayos de trabajo los ensayos Marshall, tracción directa BTM y pista de laboratorio. En los apartados siguientes se encuentra una descripción de dichos ensayos y en el anexo 1 el procedimiento de trabajo detallado para cada uno de ellos, así como un juego de fotografías que describen gráficamente estos procesos.

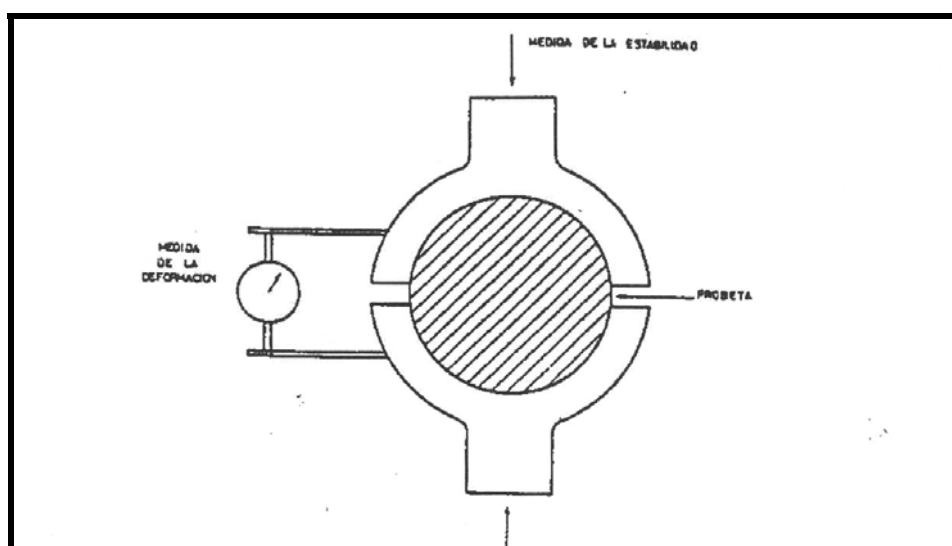
4.2. ENSAYO MARSHALL

4.2.1. Introducción

El concepto del método de diseño de mezclas bituminosas fue desarrollado por Bruce Marshall en el Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi, en Estados Unidos. En su forma actual, este ensayo surgió de una investigación iniciada por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos en 1943 en la búsqueda de un método de diseño y control de pistas de aeropuertos durante la Segunda Guerra Mundial. El cuerpo de ingenieros decidió adoptar el Método Marshall debido en parte a que utilizaba un equipo de fácil manejo, portátil y que podía utilizarse rápidamente en obra. Se realizaron muchos tramos de prueba haciendo servir un tráfico simulado para determinar el comportamiento de las mezclas variando su composición y para establecer la energía de compactación necesaria al fabricar las probetas con densidad similar a la obtenida en obra. [1]

El propósito del método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de betún para una combinación específica de áridos. Se trata de un ensayo mecánico que consiste en romper probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de altura preparadas como se describe en el anexo 1 y compactadas mediante un martillo de peso y altura de caída normalizados. [18] Posteriormente se calientan a una temperatura de 60°C y se rompen en la prensa Marshall mediante la aplicación de una carga vertical a través de una mordaza perimetral (Figura 4.1) y una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min para determinar su estabilidad y deformación. Este método establece densidades y contenidos óptimos de huecos que se han de cumplir durante la construcción del pavimento.

Figura 4.1
Probeta rodeada por las mordazas de la prensa Marshall



Fuente: Roca, 2000

Es importante saber que este ensayo es uno de los más conocidos y utilizados tanto para la dosificación de mezclas bituminosas como para su control en planta mediante la verificación de los parámetros de diseño de las muestras tomadas.

En España este ensayo se utiliza en la formulación de mezclas bituminosas densas, semidensas y gruesas. No se aplica en mezclas abiertas pues resulta insensible para detectar el efecto que el ligante tiene sobre el comportamiento de la mezcla. Tampoco es adecuado para la caracterización de mezclas de elevado ángulo de rozamiento interno y mástico poco consistente.

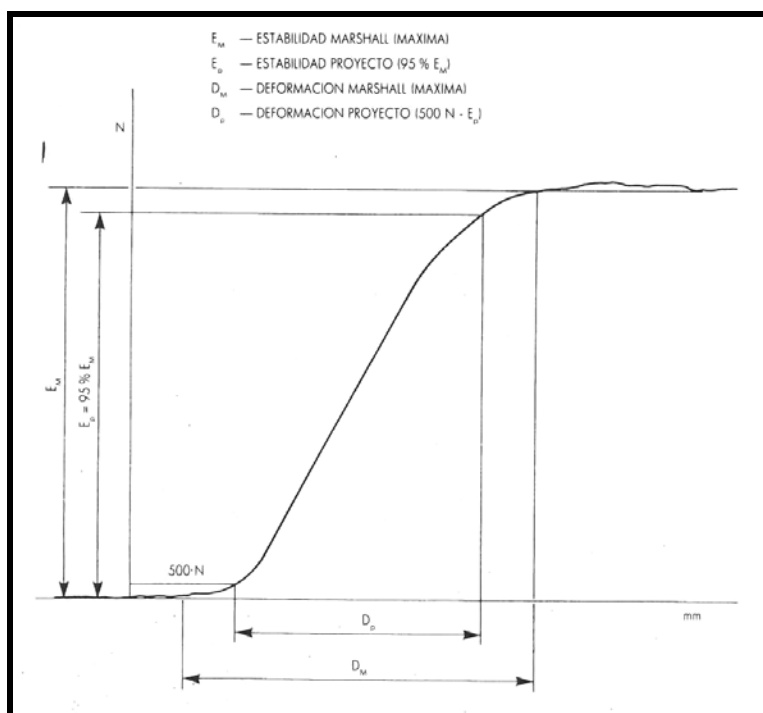
4.2.2. Descripción del método de ensayo

A continuación se describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall, pudiéndose emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el posterior control en obra de las mismas. El procedimiento general es de aplicación a

todas las mezclas bituminosas fabricadas en caliente con tamaño máximo de áridos de 25 mm en las que el aglomerante sea un betún de petróleo o un alquitrán. Puede aplicarse también a las mezclas fabricadas en frío aunque con unas adaptaciones específicas a este tipo de mezclas.

El ensayo Marshall permite la obtención de valores de estabilidad y deformación tanto de testigos extraídos de un pavimento como de probetas fabricadas por otros métodos de compactación (Figura 4.2). El procedimiento es también aplicable al proyecto de mezclas en laboratorio mediante el método Marshall, para lo cual se fabrican y ensayan series de probetas análogas con porcentajes crecientes de ligante, calculando sus densidades relativas y contenido de huecos. A partir de estos resultados, se puede determinar cuál debe ser el contenido óptimo de ligante de una mezcla de áridos de composición y granulometría determinadas.

Figura 4.2
Estabilidad y deformación en el ensayo Marshall



Fuente: CEDEX, 1986

Dentro del ensayo Marshall, se manejan cierto tipo de propiedades mecánicas entre las cuales se encuentran las siguientes: [18]

- **Estabilidad Marshall:** Se entiende por estabilidad Marshall la carga máxima resistida por una probeta multiplicada por un factor de corrección que se aplica de acuerdo con la altura de la probeta antes de ser ensayada (Tabla 4.1).
- **Deformación Marshall:** Se define como deformación Marshall la disminución del diámetro expresado en mm que experimenta una probeta entre el comienzo de aplicación de carga y el instante de rotura.

Tabla 4.1
Factor de corrección de la estabilidad Marshall

VOLUMEN DE LA MUESTRA EN cm ³	ESPESOR APROXIMADO MUESTRA EN mm	FACTOR DE CORRECCIÓN
200-213	25.4	5.56
214-225	26.9	5.00
226-237	28.6	4.55
238-250	30.2	4.17
251-264	31.8	3.85
265-276	33.3	3.57
277-289	34.9	3.33
290-301	36.5	3.03
302-316	38.1	2.78
317-328	39.7	2.50
329-340	41.3	2.27
341-353	42.9	2.08
354-367	44.5	1.92
368-379	46.0	1.79
380-392	47.6	1.67
393-405	49.2	1.56
406-420	50.8	1.47
421-431	52.4	1.39
432-443	54.0	1.32
444-456	55.6	1.25
457-470	57.2	1.19
471-482	58.7	1.14
483-495	60.3	1.09
496-508	61.9	1.04
509-522	63.5	1.00
523-535	65.1	0.93
536-546	66.7	0.93
547-559	68.3	0.89
560-573	69.9	0.86
574-585	71.5	0.83
586-598	73.0	0.81
599-610	74.6	0.78
611-625	76.2	0.76

Fuente: CEDEX, 1986

- **Densidad Relativa:** La densidad relativa de una mezcla es la relación existente entre la masa en el aire de un volumen dado de un material permeable a una temperatura dada y la masa a la misma temperatura de un volumen igual de agua destilada. [19] Puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$DRA = \frac{A}{B - C}$$

donde:

- DRA = Densidad relativa aparente (superficie saturada seca)
 A = Masa en gramos muestra seca, pesada en aire.
 B = Masa en gramos muestra saturada superficie seca, pesada en aire.
 C = Masa en gramos muestra saturada, pesada en agua.

4.3. ENSAYO BTM (BARCELONA TRACCIÓN DIRECTA)

4.3.1. Introducción

La dificultad de la realización de un método para la determinación de la resistencia a tracción de una forma no indirecta es subsanada mediante el ensayo BTM o Barcelona Tracción Directa. Este ensayo ha sido diseñado y desarrollado plenamente en el Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña y fue propuesto inicialmente para el estudio de capas antifisuras. [20]

Se trata de un ensayo a tracción sobre probetas especialmente diseñadas con la finalidad principal de caracterizar mezclas asfálticas respecto a sus propiedades de fractura, entre las que se encuentran la resistencia a tracción, energía específica de fractura, índice de rigidez a tracción y desplazamiento de rotura total. Permite estudiar la influencia de componentes de una mezcla tal como la granulometría, el ligante, el aditivo y el filler en las propiedades mecánicas de las mismas.

4.3.2. Preparación de las probetas

La elaboración de las probetas del ensayo BTM incluye como principal novedad, con respecto al ensayo Marshall, la incorporación de dos semicírculos metálicos con una entalladura diametral que servirán de base a la probeta para facilitar la aplicación directa de la carga a tracción en una parte de la misma paralela a esta base. Durante el ensayo, realizado a velocidad de desplazamiento constante, se va produciendo la apertura de la entalladura, lo que provoca la fisuración de la probeta. La representación gráfica de la carga necesaria para provocar la rotura y la posterior progresión de la fisura a través de la mezcla permite valorar la tenacidad de la mezcla ensayada. Las figuras 4.3 y 4.4 muestran la configuración geométrica de las probetas y las pletinas en este ensayo.

Figura 4.3
Probeta cilíndrica entallada BTM

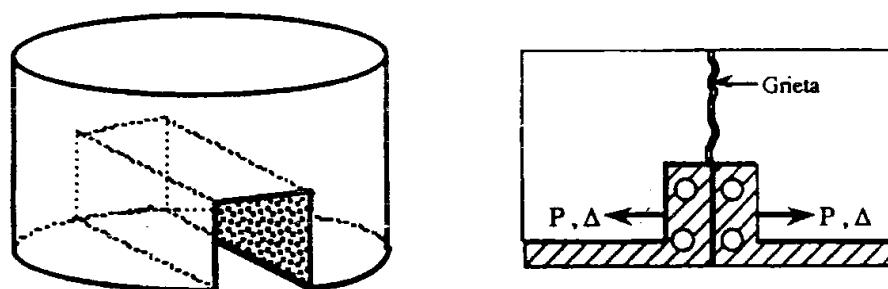
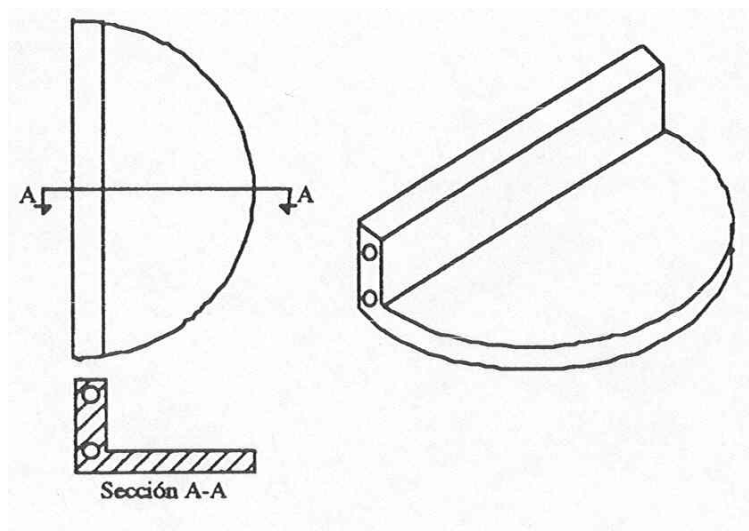


Figura 4.4
Pletina semicircular de la probeta entallada BTD

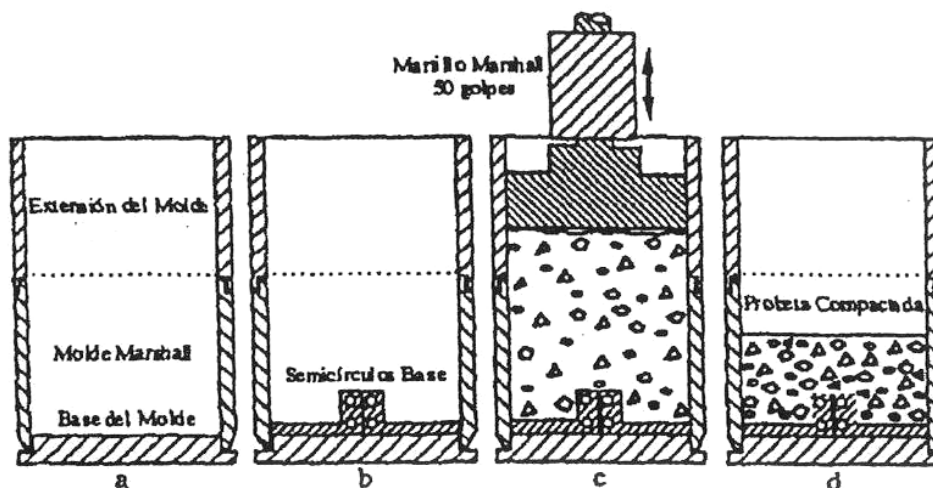


Fuente: Fonseca, 1995

Las probetas se fabrican según el método Marshall pero con ciertas salvedades debido a la innovación introducida en el diseño de las mismas. El proceso se desarrolla de la siguiente manera:

- Preparación de la mezcla asfáltica en caliente. Las probetas se fabrican individualmente, pesando en un recipiente las cantidades necesarias de cada fracción salvo el filler. Se calienta por un lado la mezcla de áridos y por otro el ligante a una temperatura de 150°C. A continuación se procede al mezclado de áridos y ligante a dicha temperatura con la posterior incorporación del filler. El tiempo de mezclado debe ser lo más breve posible para conseguir una completa y homogénea cubrición de todas las partículas.
- Previamente a la preparación de las mezclas se calientan el conjunto del collar, molde, placa de base y pletinas a 150°C. Posteriormente se colocan los 2 semicírculos sobre la base del molde Marshall y se construye el grupo molde-semicírculos junto con la placa de base (Figura 4.5 a y b).
- Seguidamente se introduce la mezcla asfáltica en caliente en el interior del molde y se aplican 25 piconazos a toda la sección para obtener un compactado lo más homogéneo posible y eliminar la posibilidad de huecos de construcción en las proximidades de la entalladura.
- A continuación se procede a la compactación aplicando 50 golpes con el martillo Marshall únicamente por la cara superior de la probeta (Figura 4.5 c y d).
- Finalmente se desmolda la probeta mediante un gato hidráulico una vez se haya recuperado la temperatura ambiente y ya queda preparada para ensayarla al día siguiente de la fabricación.

Figura 4.5
Preparación y fabricación de la probeta BTB



Fuente: Fonseca, 1995

4.3.3. Procedimiento de ensayo

El ensayo BTB consiste en la aplicación de un desplazamiento monótonico con una velocidad de aplicación de 1mm/minuto hasta llegar al fallo de la probeta. Se toma como criterio de fallo al instante en el que se registra carga cero o de desplazamiento de rotura total de la probeta. Tanto la carga (P) como el desplazamiento (Δ) son medidos en la misma dirección.

El ensayo se realiza a la temperatura programada para el diseño en cuestión (en el caso de esta tesina 20 °C) y la duración del mismo depende del tipo de material a ensayar oscilando entre 5 y 10 minutos; si es un material de fractura frágil, el ensayo durará alrededor de los 5 minutos y si es de fractura dúctil puede llegar hasta los 10 minutos. [20]

Durante el ensayo, se va produciendo la apertura de la entalladura de la probeta lo que provoca la fisuración de la misma, registrándose el esfuerzo de tracción aplicado y la apertura de la entalladura. La curva carga-desplazamiento obtenida es utilizada para extraer las diferentes propiedades de tracción en las mezclas a analizar, entre las cuales destacan las siguientes: [20]

- **Energía específica de fractura (G_f):** la energía específica de fractura se define como el trabajo realizado dividido entre el área agrietada de la probeta, es decir, el área bajo la curva carga-desplazamiento (Figura 4.6) dividida entre el área agrietada (Figura 4.7). Para su cálculo se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$G_f = \frac{\int_0^{\Delta_{m\acute{a}x}} P(\Delta) d\Delta}{H \cdot D} \quad (\text{ecuación 4.1})$$

donde:

P = carga registrada
 D = diámetro de la probeta
 H = altura efectiva de la probeta

- **Resistencia a la Tracción (F_t):** La resistencia a la tracción es equivalente a la relación que existe entre la carga máxima registrada y el área agrietada de la probeta. Para su cálculo se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$F_t = \frac{2 \cdot P_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot H \cdot D} \quad (\text{ecuación 4.2})$$

donde:

$P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima registrada
 D = diámetro de la probeta
 H = altura efectiva de la probeta

- **Índice de Rigidez a Tracción (IRT):** Es la relación entre la carga media y la deformación media correspondiente a ese valor. Este índice representa en qué grado de flexibilidad se encuentra la mezcla asfáltica, cumpliéndose que cuanto mayor sea el índice menos flexible será la mezcla. Para su cálculo se puede utilizar la siguiente ecuación:

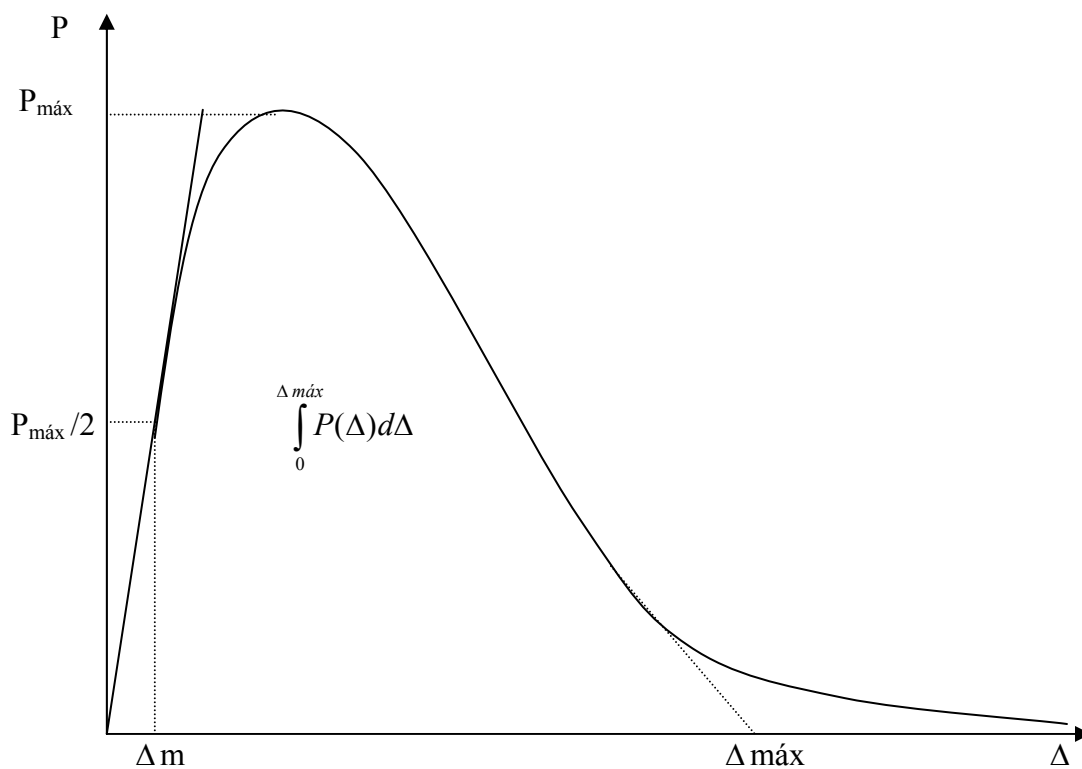
$$IRT = \frac{0,5 \cdot P_{m\acute{a}x}}{\Delta m} \quad (\text{ecuación 4.3})$$

donde:

$P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima registrada
 Δm = deformación media en $0,5 P_{m\acute{a}x}$

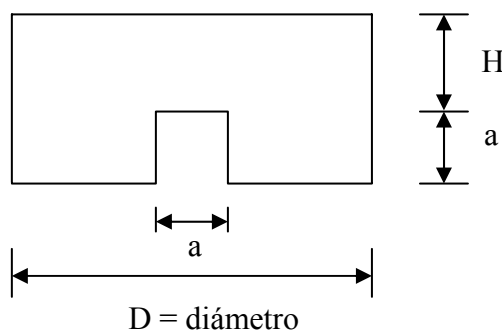
- **Desplazamiento de Rotura Total ($\Delta m\acute{a}x$):** Es el punto en el cual se tiene una carga nula en la probeta y se considera como el final del ensayo. Este valor es indicativo de la tenacidad de la mezcla asfáltica y puede llegar a ser un valor preponderante en el momento de analizar los resultados, ya que mezclas con valores relativamente cercanos de energía de fractura pueden presentar comportamientos muy diferentes, desde dúctiles a frágiles, siendo el desplazamiento de rotura el parámetro que puede diferenciar una mezcla de otra. En el caso de mezclas dúctiles se obtendrán valores de $\Delta m\acute{a}x$ grandes y para mezclas frágiles valores pequeños.

Figura 4.6
 Curva carga-desplazamiento resultante del ensayo BTD



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7
 Sección transversal de la probeta cilíndrica entallada BTD



Dimensiones: $D = 101,4 \text{ mm}$ $a = 20 \text{ mm}$ $H = 35 \pm 2\text{mm}$

Fuente: Elaboración propia

4.3. ENSAYO DE PISTA DE LABORATORIO

4.3.1. Introducción

El estudio de las deformaciones plásticas suele completarse en España con el ensayo de pista de laboratorio. Este ensayo presenta mayor sensibilidad que el ensayo Marshall y permite considerar el efecto de postcompactación producida por el tráfico, fenómeno que afecta a la estabilidad al aumentar el porcentaje de huecos rellenos por el ligante.

El ensayo consiste en someter a una probeta de la mezcla bituminosa al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida.

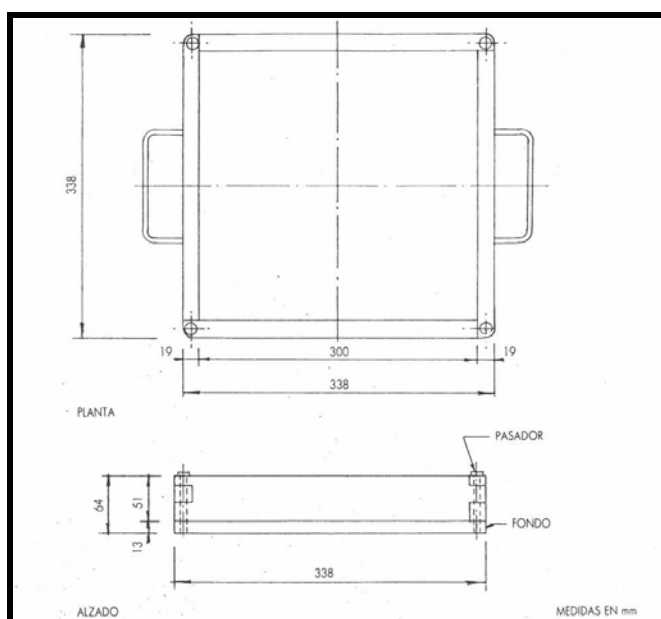
4.3.2. Preparación de las probetas

En primer lugar, basándose en el volumen del molde y en la densidad relativa Marshall de la mezcla, se determina la cantidad de material necesaria para cada probeta. A continuación, se pesan las cantidades determinadas de cada fracción de árido necesarias para la fabricación de una probeta, previo secado completo en estufa a una temperatura de 105 a 110°C. La masa total de áridos se calienta en estufa a una temperatura superior a 30°C con respecto a la temperatura de mezclado (función de la viscosidad del ligante), calentándose de la misma manera el ligante a emplear. Seguidamente, se realiza un primer mezclado en seco de los áridos y se añade el ligante, mezclando el conjunto hasta obtener una mezcla completa y homogénea (sin sobrepasar los dos minutos de mezclado).

Una vez enrasada la mezcla, se puede realizar la compactación de la misma. Ésta se realiza dentro de los moldes mediante una placa de acero sobre la que van montados dos vibradores iguales (Figuras 4.8 y 4.9).

Figura 4.8

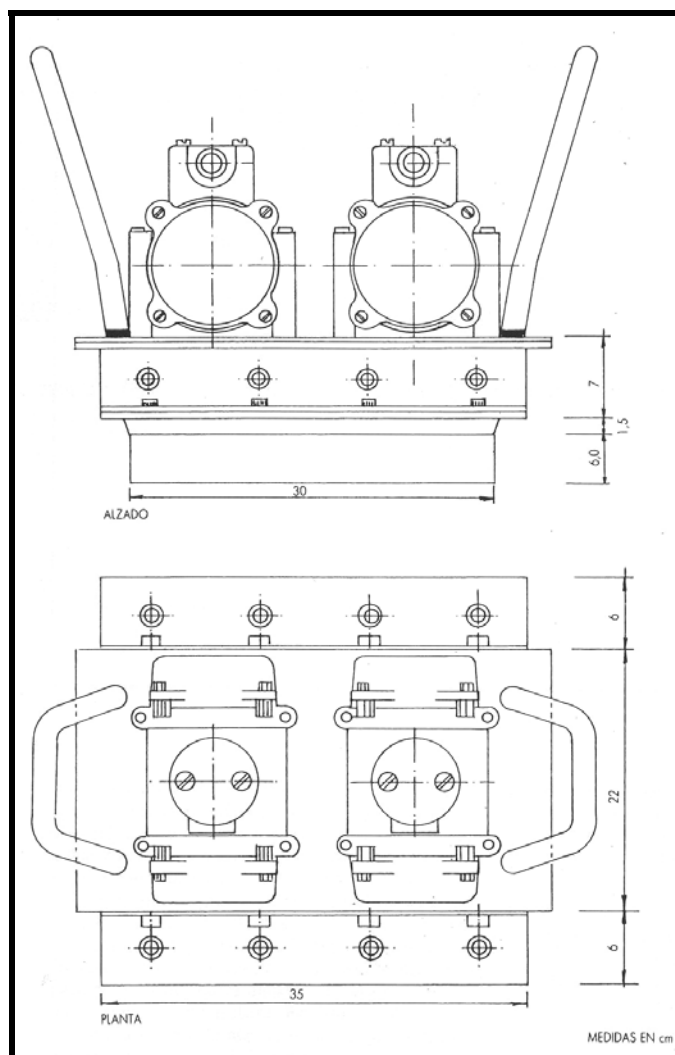
Molde del ensayo de pista



Fuente: CEDEX, 1984

Son necesarios cuatro periodos de compactación de 75 segundos cada uno realizados girando el dispositivo compactador, en el mismo sentido y sucesivamente, 90 grados respecto a la posición inicial. La probeta así obtenida se deja enfriar a temperatura ambiente durante un periodo de 12 a 24 horas antes de su ensayo.

Figura 4.9
Esquema del elemento compactador en el ensayo de pista



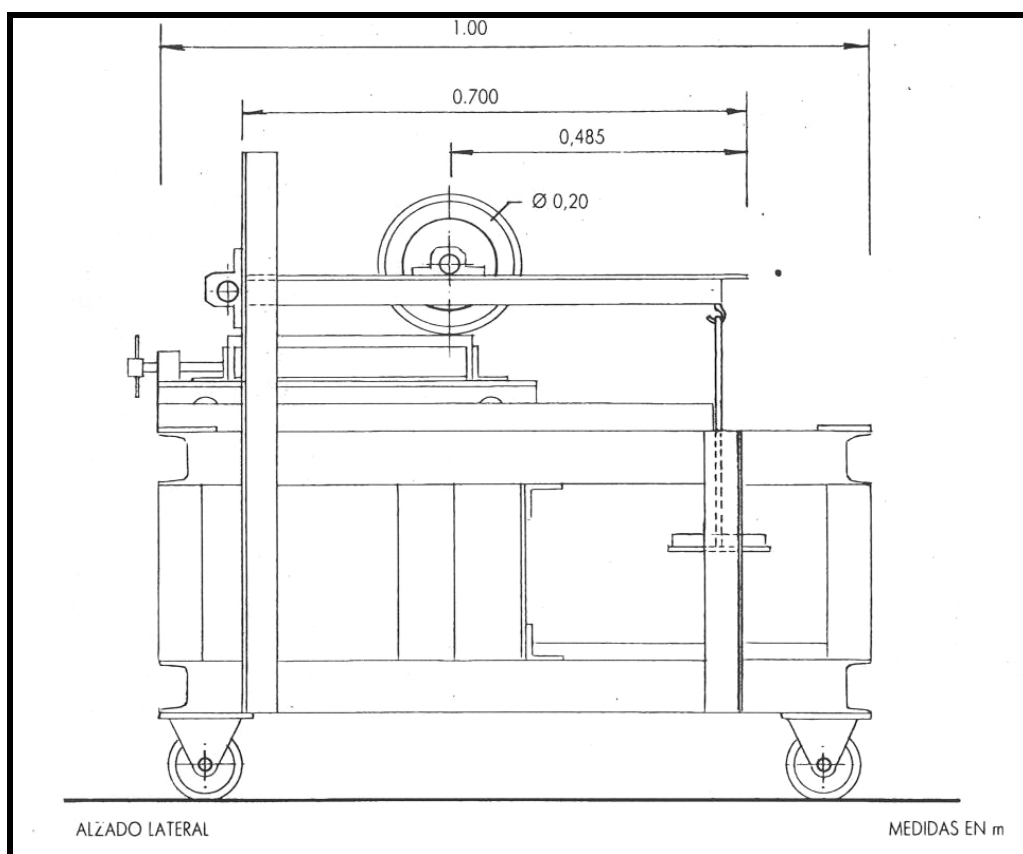
Fuente: CEDEX, 1984

4.3.3. Procedimiento de ensayo

El ensayo se realiza a una temperatura de 60°C y una presión de contacto de la rueda de 900 kN/m². La máquina de ensayo consiste en un carretón móvil de forma rectangular soportado por un sistema horizontal-vertical de ruedas metálicas capaces de deslizarse sobre unos perfiles de apoyo. [21] El carretón va unido a un motor-reductor que produce, al estar en funcionamiento, un movimiento alternativo de vaivén. Por encima de este carretón, va situada la rueda de ensayo montada en un brazo sustentador. Uno de los extremos del brazo va unido a un soporte rígido de la máquina y el otro extremo permanece libre y provisto de un dispositivo para colocar las pesas que producen las diferentes cargas sobre la rueda. En

el caso del dispositivo español, la rueda es metálica y con una banda de rodadura de goma maciza de características fijas (Figura 4.10).

Figura 4.10
Máquina del ensayo de pista



Fuente: CEDEX, 1984

Antes de empezar el ensayo, las probetas se introducen en una estufa durante cuatro horas como mínimo a una temperatura de 60°C. Dos horas antes del ensayo, se conecta también el sistema de calentamiento de la cámara termostaticada. El ensayo propiamente dicho empieza con tres pasadas completas de rueda para conseguir un asentamiento de la misma sobre la probeta, siendo la duración total del ensayo de 120 minutos sin interrupciones.

Durante el transcurso del ensayo, se determinan las deformaciones totales de la probeta en los minutos 1, 3 y 5; a continuación cada 5 minutos hasta completar los primeros 45 minutos y finalmente cada 15 minutos hasta el final del ensayo.

Ensayadas todas las probetas de una serie, se puede dibujar la curva de deformación de la mezcla y determinar la velocidad media de deformación. En la Tabla 4.2 se recogen los valores límites de esta velocidad de deformación ($\mu\text{m}/\text{min}$) para las mezclas bituminosas discontinuas en caliente situadas en capa de rodadura. Estos valores servirán para aceptar o rechazar la mezcla estudiada.

Tabla 4.2*Valores límite de velocidad de deformación en ensayo de pista*

Categoría de tráfico pesado	Zona térmica estival		
	Cálida	Media	Templada
T00 a T2	12	12	15
T3, T4 y arcenes	15	15	-

Fuente: Ministerio de Fomento, OC 5/2001