

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA, TENACIDAD, DUCTILIDAD Y ENERGÍA DE ROTURA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS MEDIANTE EL ENSAYO FÉNIX

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

1.1 Esta norma describe el procedimiento para determinar la resistencia, la tenacidad, la ductilidad y la energía de rotura de las mezclas bituminosas mediante el ensayo de probetas semicilíndricas sometidas a un esfuerzo en tracción directa con velocidad de desplazamiento constante a una temperatura dada. Las muestras se obtienen mediante serrado de probetas o testigos cilíndricos por un plano que pasa por su eje de revolución. Asimismo, en el centro del plano resultante del corte se practica una ranura paralela a la generatriz del cilindro, que actúa a modo de fisura inducida, por donde se produce la rotura de la probeta (Figura 1). El esfuerzo se aplica en el plano de corte y perpendicular a la ranura creada (Figura 2).

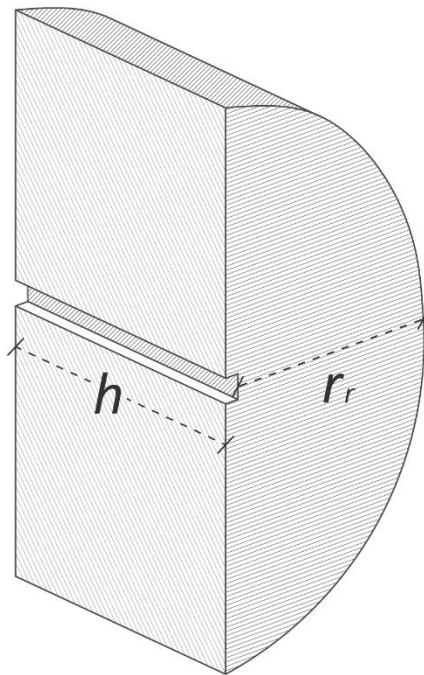


Figura 1. Perspectiva de la probeta semicilíndrica ranurada

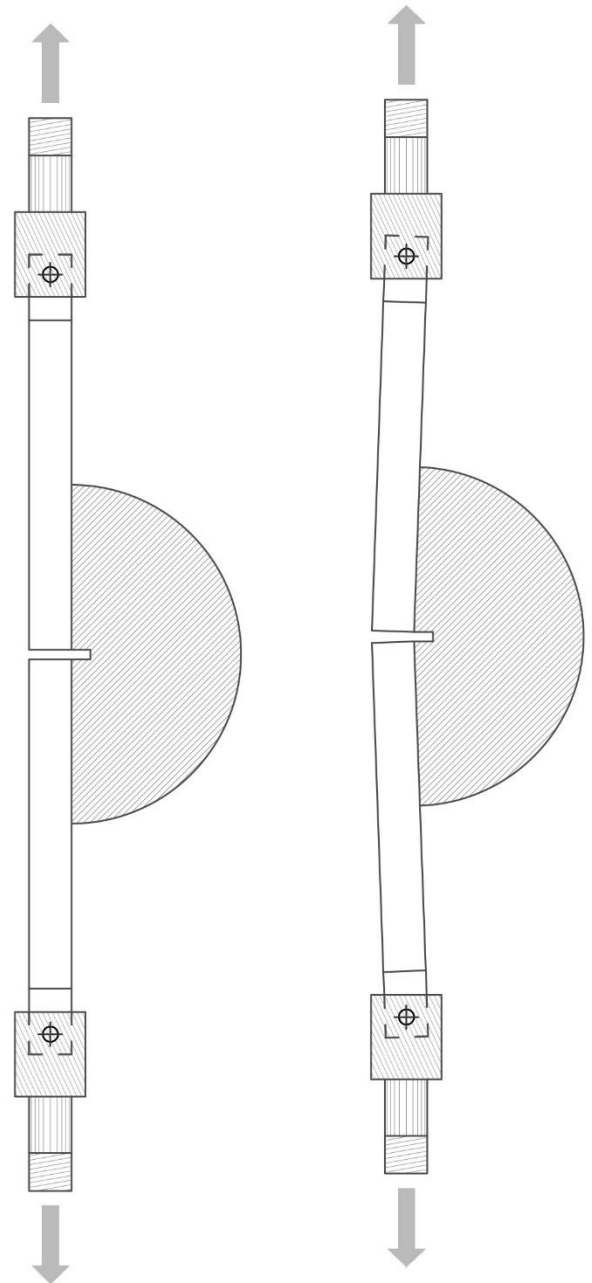


Figura 2. Disposición de la probeta en la prensa durante la realización del ensayo

1.2 Los parámetros resultantes del ensayo se calculan a partir de la curva de rotura de la probeta, obtenida mediante la representación gráfica de los valores de carga frente a los de desplazamiento registrados durante la realización del ensayo. Para el cálculo se emplean, entre otras magnitudes, el valor de carga máxima, el 25% de dicho valor antes de haberse alcanzado el máximo y el 50% de dicho valor antes y después del máximo, con sus correspondientes desplazamientos, así como las energías disipadas en la totalidad del ensayo y en la fase de rotura del mismo (Figura 3).

2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Fase de carga: Fase del ensayo que transcurre desde su inicio hasta que se alcanza la carga máxima de rotura.

Fase de rotura: Fase del ensayo que transcurre desde que se alcanza la carga máxima de rotura hasta la finalización del mismo, cuando el desplazamiento aplicado alcanza un valor de 4 mm.

h: Altura de la probeta, en milímetros (mm) (véase Figura 1).

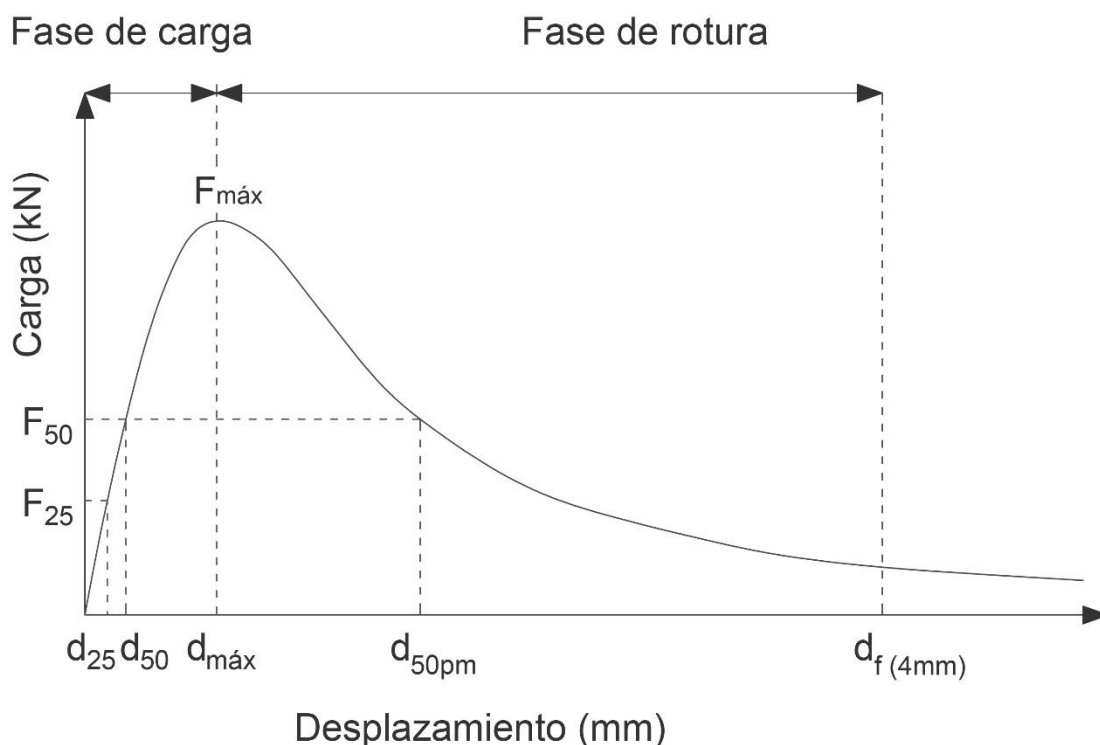


Figura 3. Curva de carga-desplazamiento obtenida durante el ensayo

1.3 El procedimiento permite evaluar y clasificar las mezclas bituminosas en cuanto a su rigidez y resistencia a tracción, ductilidad y tenacidad a la temperatura o en el rango de temperaturas de ensayo, propiedades que, a su vez, están estrechamente relacionadas con su resistencia a la fisuración. Asimismo, el método tiene múltiples aplicaciones, pudiéndose utilizar para dosificar las mezclas atendiendo a la variación de dichas propiedades en función de su composición, para el control de calidad de las mezclas durante su fabricación y puesta en obra o para valorar los efectos del envejecimiento producido durante su vida útil mediante el análisis de testigos extraídos del pavimento.

r: Radio reducido. Radio de la probeta semicilíndrica medido en la zona ranurada descontando la profundidad de la ranura, en milímetros (mm) (véase Figura 1).

S: Superficie transversal de carga. Producto $h \times r$, en milímetros cuadrados (mm^2).

x: Desplazamiento, en milímetros (mm). Valor de desplazamiento aplicado a la probeta en un instante dado del ensayo. Puede tomar cualquier valor entre 0 y d_f .

F(x): Carga en función del desplazamiento, en kilonewtons (kN). Valor de fuerza generada en la probeta para un valor de desplazamiento x aplicado durante el ensayo.

F_{máx}: Carga máxima de rotura. Valor máximo de carga alcanzado en el ensayo, en kilonewtons (kN).

F₂₅: 25% de la carga máxima. Valor correspondiente a la cuarta parte de la carga máxima en la fase de carga, en kilonewtons (kN).

F₅₀: 50% de la carga máxima. Valor correspondiente a la mitad de la carga máxima de rotura en la fase de carga, en kilonewtons (kN).

d_{máx}: Desplazamiento a carga máxima. Valor de desplazamiento, en milímetros (mm), correspondiente a la carga máxima de rotura, F_{máx}.

d₂₅: Desplazamiento al 25% de la carga máxima en la fase de carga. Valor de desplazamiento, en milímetros (mm), correspondiente al 25% de la carga máxima de rotura (F₂₅), antes de que se produzca ésta.

d₅₀: Desplazamiento al 50% de la carga máxima en la fase de carga. Valor de desplazamiento, en milímetros (mm), correspondiente a la mitad de la carga máxima de rotura (F₅₀), antes de que se produzca ésta.

d_{50pm}: Desplazamiento al 50% de la carga máxima en la fase de rotura. Valor de desplazamiento, en milímetros (mm), correspondiente a la mitad de la carga máxima de rotura (F₅₀), una vez que se ha producido esta.

DT: Ductilidad o desplazamiento de tenacidad. Valor de desplazamiento, en milímetros (mm), desde que se alcanza la carga máxima hasta que la carga se reduce a la mitad de su valor máximo durante la fase de rotura. Este parámetro permite valorar la capacidad de la mezcla para seguir deformándose (rotura dúctil) a la vez que mantiene suficiente resistencia y cohesión interna durante la fase de rotura para que ésta ocurra gradualmente. La ductilidad DT se calcula mediante la expresión:

$$DT = d_{50pm} - d_{máx} \quad (1)$$

d_f: Desplazamiento final del ensayo, igual a 4 mm.

σ_E: Tensión efectiva, en megapascales (MPa). Parámetro que valora la carga aplicada

en relación con la superficie transversal de carga (S). Se calcula mediante la expresión:

$$\sigma_E = 1000 \times \frac{F(x)}{S}$$

RT: Resistencia a tracción, en megapascales (MPa). Valor máximo de la tensión efectiva obtenido en el ensayo. Se calcula mediante la expresión:

$$RT = 1000 \times \frac{F_{máx}}{S} \quad (2)$$

IRT: Indicador de rigidez a tracción, en MPa/mm. Pendiente de la curva carga-desplazamiento entre el 25% y el 50% de la carga máxima F_{máx} en la fase de carga, dividida por la superficie transversal de carga. Valora la rigidez de la mezcla a tracción. Se calcula mediante la expresión:

$$IRT = 1000 \times \frac{F_{50} - F_{25}}{S \times (d_{50} - d_{25})} \quad (3)$$

G_D: Energía total de rotura por unidad de superficie, en J/m². Área bajo la curva completa de carga-desplazamiento, dividida por la superficie transversal de carga (S). Es un indicador del esfuerzo máximo y de la energía requerida para la rotura de la mezcla. Se calcula mediante la expresión:

$$G_D = 10^6 \times \frac{\int_0^{d_f} F(x) dx}{S} \quad (4)$$

T: Tenacidad, en J/m². Área bajo la curva de carga-desplazamiento desde que se alcanza la carga máxima de rotura hasta la finalización del ensayo, dividida por la superficie transversal de carga (S). Representa la energía disipada en el ensayo únicamente durante la fase de rotura, indicando el trabajo requerido para que el material rompa, al seguir manteniendo una cierta resistencia a la propagación del daño y alguna capacidad de deformación según progresa este. La tenacidad se calcula según la expresión:

$$T = 10^6 \times \frac{\int_{d_{máx}}^{d_f} F(x) dx}{S} \quad (5)$$

Un valor aproximado de este parámetro puede obtenerse calculando el producto de la resistencia a tracción RT por la ductilidad DT, dado que el área que define la tenacidad T es asimilable al área de un triángulo rectángulo de

base $2 \times DT$ y altura RT , de acuerdo con la expresión:

$$T \approx \frac{RT \times 2DT}{2} = RT \times DT \quad (6)$$

$RT \times DT$ se mide en $\text{MPa} \cdot \text{mm}$ o kJ/m^2 .

IT: Indicador de tenacidad, en $(\text{J/m}^2) \cdot \text{mm}$ (o mN). Es la tenacidad (T) multiplicada por el desplazamiento, en mm , aplicado desde que se alcanza la carga máxima hasta que la carga se reduce al 50% de dicho valor máximo. Pondera la tenacidad en función de la ductilidad de la mezcla en la rotura. Se calcula mediante la expresión:

$$IT = T \times DT \quad (7)$$

3. APARATOS Y MATERIAL NECESARIO

3.1 Prensa. Para ensayar las probetas a tracción directa, de funcionamiento mecánico o servo-hidráulico, que pueda aplicar un desplazamiento a velocidad uniforme de $1,0 \text{ mm/min}$ durante el ensayo. Dispondrá de un sistema de medida del desplazamiento con un campo de medida de al menos 100 mm , que permita medir desplazamientos con resolución de $0,001 \text{ mm}$. Asimismo dispondrá de una célula de carga capaz de medir fuerzas comprendidas entre 1 N y $15\,000 \text{ N}$, con una exactitud del 1% o mejor, por encima de 200 N . La prensa contará con un dispositivo para registrar gráficamente la carga y el desplazamiento de forma simultánea, o bien con un sistema de adquisición automatizada de datos que realice dicha función.

3.2 Sistema externo de medida del desplazamiento. En el caso de que el sistema de medida del desplazamiento que incorpora el propio actuador de la prensa no pueda proporcionar valores con la resolución indicada en 3.1 o que, por limitaciones del mecanismo de funcionamiento de la prensa, estos valores no sean fiables, se dispondrá de un sistema externo para la medida del desplazamiento entre los dos puntos de sujeción de la probeta a la prensa.

Dicho sistema incorporará un transductor del tipo LVDT o similar, con un campo de medida de al menos 20 mm , capaz medir desplazamientos con resolución de $0,001 \text{ mm}$. El transductor deberá montarse verticalmente quedando paralelo al eje del actuador de la prensa y

sólidamente unido a uno de los dos soportes para el anclaje de la probeta descritos en 3.6.2. La base donde apoya la punta del transductor y que sirve de referencia para las mediciones, estará unida al otro soporte (Figura 4, Fotos 1 y 2).

3.3 Recinto termostático. Cámara termostática con capacidad suficiente para alojar las probetas semicilíndricas de ensayo ya pegadas a sus bases, que pueda mantener la temperatura establecida para el ensayo con una variación máxima de $\pm 1^\circ \text{C}$ en un rango de temperaturas comprendido entre -10°C y $+60^\circ \text{C}$ (Nota 1).

Nota 1: Es recomendable que la prensa de ensayo o, al menos, el actuador de la prensa, esté instalado en el interior de la cámara termostática para lograr un mejor control de la temperatura en las probetas durante su ensayo.

3.4 Sierra de corte. Para el serrado de las probetas o testigos cilíndricos en dos mitades y para el corte de la ranura de cada probeta semicilíndrica. El disco o elemento de corte de la sierra empleada para este último fin tendrá el espesor adecuado para que la anchura de la ranura resultante sea de $(4 \pm 1) \text{ mm}$ y su profundidad de $(5 \pm 1) \text{ mm}$. Asimismo la sierra deberá poseer las características, o ir dotada de los elementos necesarios para asegurar que la profundidad de la ranura sea constante en toda su longitud.

3.5 Calibre. Para medir con precisión de $\pm 0,1 \text{ mm}$ las dimensiones y parámetros geométricos de las probetas o testigos para ensayo.

3.6 Elementos de sujeción de la probeta

3.6.1 Bases metálicas. Se dispondrá de un número suficiente de pares de bases metálicas, de la forma y dimensiones especificadas en la Figura 5, según el número de probetas a ensayar. Cada base está provista de un punto de anclaje, mediante orificio y pasador, situado en posición central en uno de sus extremos, tal como se muestra en la Figura 6. La distancia entre el centro del orificio en el punto de anclaje y el extremo opuesto de cada base metálica será de $113,5 \text{ mm}$ (Nota 2).

Nota 2: Es de gran importancia que esta distancia se obtenga con exactitud en la fabricación de todas las bases, ya que tiene gran influencia en la repetibilidad y reproducibilidad de los resultados del ensayo.

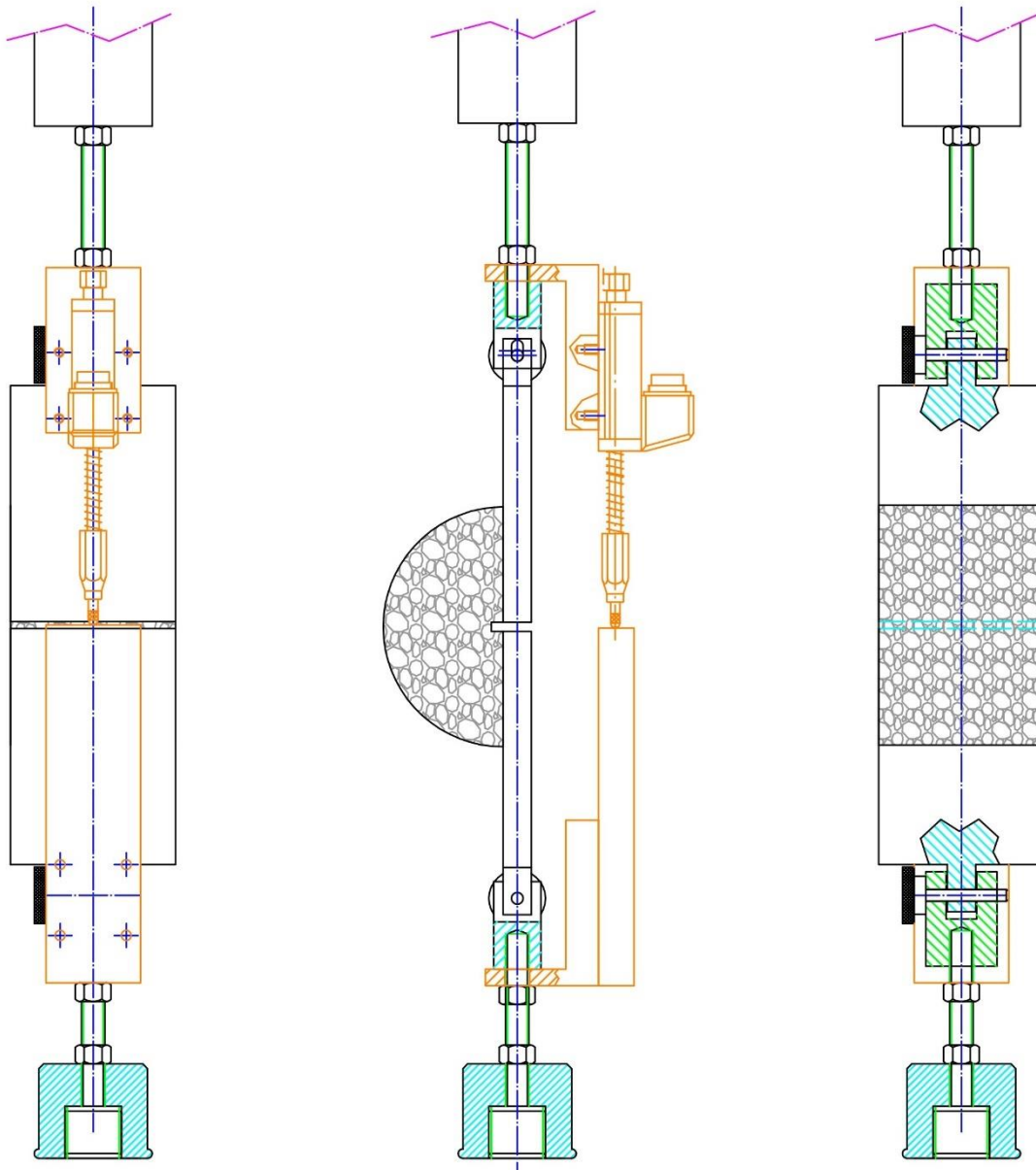


Figura 4. Esquema de montaje de un sistema externo para medida del desplazamiento

3.6.2 Soportes. Dos soportes para el montaje en la prensa de ensayo de las bases ya unidas a la probeta. Tendrán la forma y dimensiones que se indican en la Figura 7. Uno de los dos soportes estará dotado de ranuras para la inserción del pasador (Figura 7b), de cara a facilitar el acoplamiento final de la correspondiente base de la probeta de ensayo (Nota 3). Ambos soportes dispondrán de elementos rígidos de fijación al actuador y al extremo fijo de la prensa, mediante vástagos roscados, de manera que se logre un empotramiento perfecto entre las piezas sin que existan holguras (Nota 4).

Nota 3: Los soportes podrán tener otras dimensiones diferentes a las indicadas si se comprueba que se obtienen resultados equivalentes en el ensayo. El soporte provisto de ranuras podrá montarse indistintamente en el extremo fijo o

móvil de la prensa, según resulte más conveniente para el acoplamiento de las bases de las probetas.

Nota 4: Los elementos de fijación de los soportes a la prensa podrán ser modificados y adaptados a las características de ésta, siempre que se mantenga el empotramiento perfecto en su fijación.

En el caso de que se utilice el sistema de medida del desplazamiento descrito en 3.2, cada uno de los vástagos roscados permitirá también el montaje de los elementos de fijación del transductor de desplazamiento y de su base de apoyo, debiendo existir una sólida unión entre cada uno de dichos elementos y su soporte correspondiente.

Los puntos de anclaje de las bases (3.6.1) se podrán acoplar a los soportes superior e inferior,

que quedarán fijados a éstas mediante sendos pasadores (Figura 6). Dichas uniones deberán permitir el giro según el eje de cada pasador a medida que se aplica tracción y se va produciendo la apertura de la fisura en la probeta durante la realización del ensayo. La unión en el soporte provisto de ranuras deberá asimismo permitir el deslizamiento suave del pasador al comienzo del ensayo hasta que la probeta quede en tracción. (Nota 4).

4. PROCEDIMIENTO

4.1 Preparación de las probetas para ensayo

4.1.1 El ensayo se realiza sobre probetas semicilíndricas que pueden obtenerse a partir de probetas cilíndricas fabricadas en el laboratorio mediante los procedimientos y equipos de compactación habitualmente empleados. También pueden obtenerse por serrado de capas de testigos cilíndricos extraídos de un firme. Se recomienda ensayar un mínimo de 4 probetas semicilíndricas para un mismo material y temperatura de ensayo.



Fotos 1 y 2. Ejemplos de montajes para ensayo

Aunque las dimensiones de las probetas o los testigos cilíndricos no son características privativas del ensayo, se deben utilizar preferentemente los de 100 mm de diámetro. En todo caso su altura será menor o igual que la anchura de las bases metálicas (70 mm) que se adhieren a las probetas para la realización del ensayo. Se recomienda ensayar probetas con una altura mínima de 30 mm.

4.1.2 Densidad relativa y análisis de huecos. Antes de ser cortados se determina la densidad relativa y el contenido de huecos de las probetas o testigos, de acuerdo con las normas UNE-EN 12697-6 y UNE-EN 12697-8.

4.1.3 Corte de probetas. Las probetas o testigos cilíndricos se sierran por un plano paralelo a su generatriz que pasa por su eje de revolución, de forma que de cada probeta o testigo se obtienen dos probetas semicilíndricas simétricas.

4.1.4 Ranura. En cada probeta semicilíndrica se realiza mediante serrado una pequeña ranura, de (5 ± 1) mm de profundidad y de (4 ± 1) mm de anchura, paralela a la generatriz de la probeta o testigo cilíndrico, a lo largo de la línea central de la cara plana resultante del corte. Mediante el calibre u otro útil adecuado se comprobarán las dimensiones de la ranura practicada en cada probeta. Se rechazarán aquellas probetas cuyas dimensiones de la ranura no cumplan con los valores y tolerancias establecidos.

4.1.5 Medida geométrica de la sección de rotura de las probetas. Empleando el calibre, se determinan la altura (h) de la probeta semicilíndrica y su radio reducido (r_r), ambos con precisión de $\pm 0,1$ mm.

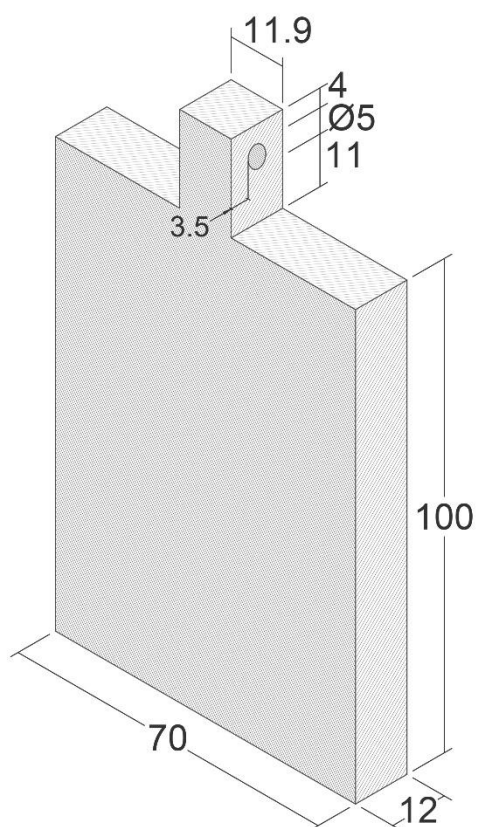


Figura 5. Una de las dos bases metálicas que se adhieren a la probeta (medidas en mm)

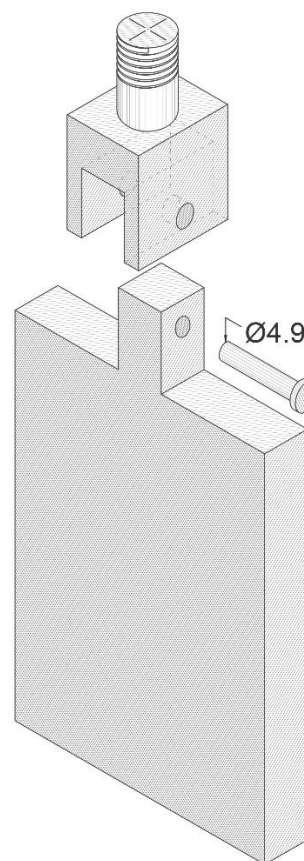


Figura 6. Detalle del sistema de anclaje, mediante pasador, que sujeta la base al soporte (diámetro en mm)

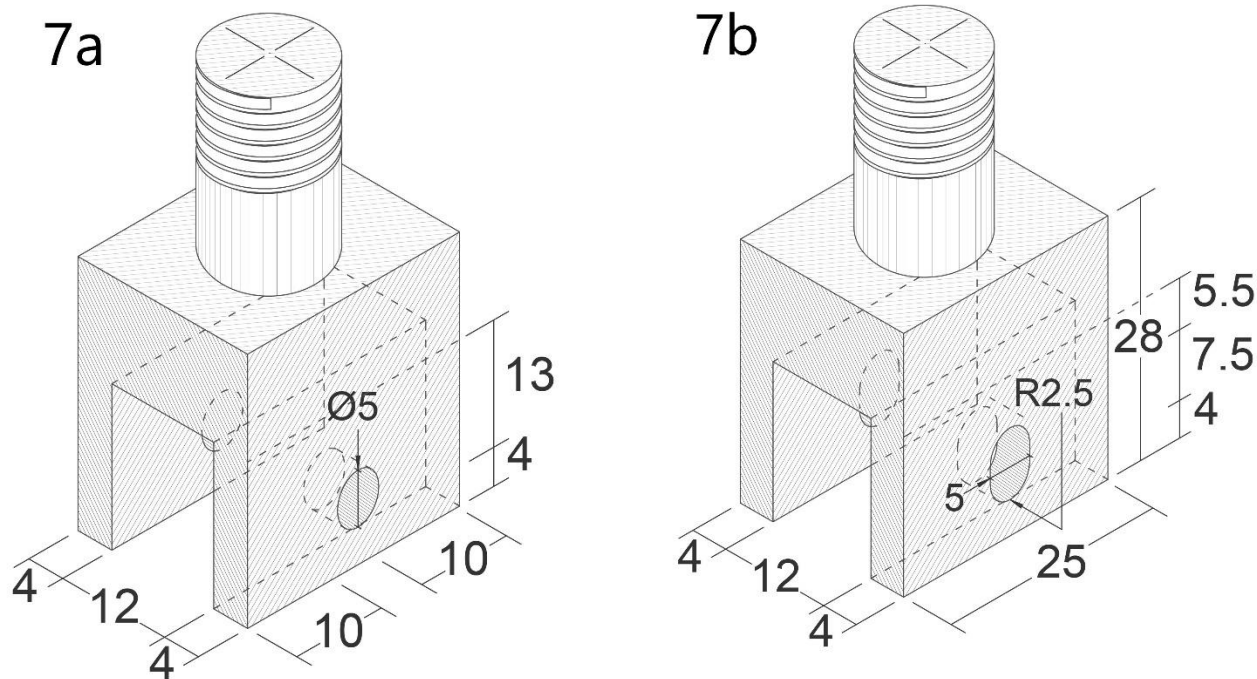


Figura 7. Soportes de anclaje unidos rigidamente al actuador y al extremo fijo de la prensa respectivamente (medidas en mm). **(7a).** Soporte provisto de orificios. **(7b).** Soporte provisto de ranuras

La altura se mide entre los extremos de la ranura, así como en la generatriz situada en la posición opuesta, según el plano perpendicular a la superficie de corte de la probeta semicilíndrica, obteniéndose el valor promedio de ambas determinaciones.

El radio reducido se mide en ambas caras semicirculares de la probeta, en las posiciones correspondientes a cada extremo de la ranura, obteniéndose igualmente un valor promedio de las dos medidas.

4.1.6 Pegado de las bases. Cada par de bases metálicas se fija mediante adhesivo (Nota 5) sobre el plano rectangular de la probeta semicilíndrica ranurada, dejando entre las bases una separación coincidente, en posición y anchura, con la de la ranura practicada en la probeta, según se muestra en la Figura 8 (Notas 6 y 7).

Nota 5: Como adhesivo puede usarse una resina epoxi. En tal caso se tendrán en cuenta las indicaciones del fabricante respecto a las proporciones de mezclado de sus componentes, el tiempo de curado del adhesivo y las precauciones que deben tomarse en materia de seguridad y salud para su manipulación.

Tras la aplicación del adhesivo la probeta debe mantenerse inmóvil en contacto con las bases durante el tiempo mínimo requerido, en un ambiente con temperaturas no inferiores a 15° C. Las superficies a pegar deben estar limpias y exentas

de grasa o de cualquier marca de identificación de la probeta.

Nota 6: Durante el curado del adhesivo debe asegurarse un perfecto alineamiento longitudinal de las dos bases y de sus respectivos puntos de anclaje, y que ambas estén situadas en un mismo plano. Con tal fin puede usarse como apoyo para las bases el borde recto y en buen estado de una placa metálica o pieza angular, o cualquier otro útil similar, de tamaño y espesor apropiados (Figura 8).

Nota 7: La separación entre las bases durante el pegado de la probeta se consigue insertando entre éstas una lámina de material rígido del mismo espesor que la ranura y con una anchura tal que no interfiera en el correcto asentamiento de la probeta sobre las bases. La lámina deberá poderse extraer posteriormente una vez alineado correctamente el conjunto probeta-bases (Figura 8).

4.1.7 Acondicionamiento térmico de las probetas. Se introducen las probetas pegadas a sus bases en el recinto o cámara termostática, regulada a la temperatura de ensayo con una variación máxima de $\pm 1^\circ$ C, durante un tiempo mínimo de 4 horas. Las bases deben colocarse en posición horizontal para evitar posibles deformaciones en las probetas, especialmente a temperaturas de ensayo por encima de +15° C.

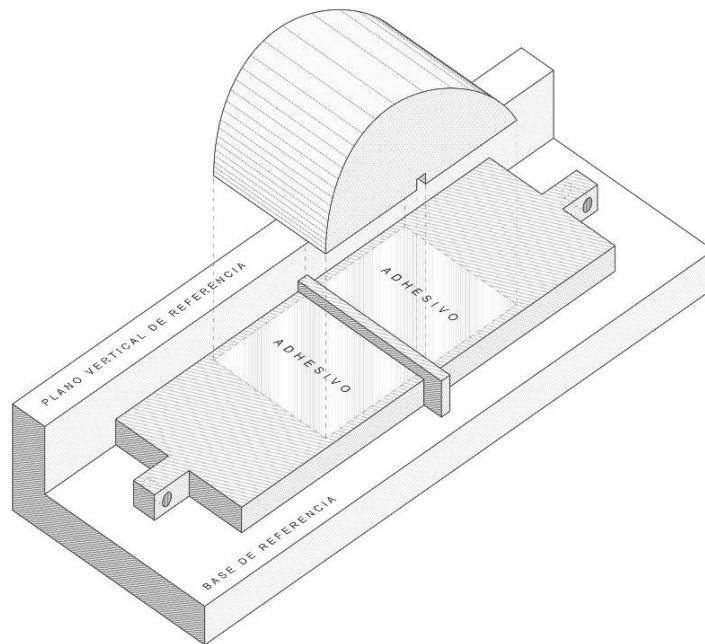


Figura 8. Pegado de las probetas

Se recomienda realizar el ensayo a distintas temperaturas, siendo -5°C , $+5^{\circ}\text{C}$ y $+20^{\circ}\text{C}$ las temperaturas habitualmente utilizadas.

4.2 Realización del ensayo

4.2.1 Se instalan los soportes de anclaje, superior e inferior, en la prensa (Nota 8). Si se emplea un sistema externo de medida del desplazamiento, similar al descrito en 3.2, se deberán montar antes sus elementos de fijación en los soportes. Una vez instalado todo lo anterior se ajusta adecuadamente la posición vertical del transductor de desplazamiento según su campo de medida. Seguidamente se ajusta a cero el valor de fuerza medido por la célula de carga. El valor cero deberá verificarse después de cada ensayo y antes del montaje de una nueva probeta, reajustándolo si fuera necesario.

4.2.2 Se fijan las bases metálicas de la probeta a los soportes previamente instalados. Se emplea para ello el punto de anclaje de cada base y los pasadores. Se comienza por montar una de las bases en el soporte dotado de orificios y se finaliza montando la otra base en el soporte provisto de ranuras. (Nota 9). Una vez montada la probeta, ambas fijaciones deben permitir su rotación alrededor de los ejes de giro de los pasadores durante la realización del ensayo, a medida que se produce la apertura de la fisura. Asimismo el pasador introducido en el soporte con ranuras deberá poder deslizarse suavemente a lo largo de las mismas en los

primeros instantes del ensayo hasta que la probeta quede en tracción.

Nota 8: En los soportes se comprobará el correcto alineamiento y posición de las horquillas de sujeción de las bases, de manera que los pasadores puedan colocarse con facilidad.

Nota 9: Durante el montaje se evitará someter la probeta a esfuerzos mecánicos excesivos (de tracción, flexión, etc.) que, a bajas temperaturas de ensayo, pueden provocar su rotura.

4.2.3 Una vez fijada la probeta a la prensa, se deja transcurrir el tiempo necesario hasta alcanzarse nuevamente la temperatura de ensayo en la cámara termostática. En su caso, se ajusta a cero el valor de desplazamiento medido por el transductor externo.

4.2.4 Se aplica a la probeta un esfuerzo de tracción con velocidad constante de desplazamiento del actuador de la prensa, de $1,0\text{ mm/min}$, registrando los valores de carga y de desplazamiento. Durante la aplicación del esfuerzo se va produciendo la rotura de la probeta, al tiempo que los anclajes de las bases giran alrededor de los pasadores (Figura 2) (Nota 10).

Nota 10: Cuando se ensayan materiales frágiles se va produciendo la apertura de una fisura inducida por la ranura.

4.2.5 Se continúa el ensayo hasta alcanzarse un valor de desplazamiento superior a 4 mm (Nota 11).

5. RESULTADOS

A partir de la curva carga-desplazamiento registrada durante la realización del ensayo (Figura 3) se calculan los distintos parámetros definidos en el capítulo 2, según las expresiones (1-7), que pueden relacionarse con las características mecánicas y resistentes de la mezcla ensayada (Notas 11 y 12).

Como resultado del ensayo se obtiene para cada parámetro el valor promedio de los valores obtenidos al ensayar las diferentes probetas semicilíndricas. Normalmente es suficiente con ensayar 4 probetas. Si la diferencia entre los valores individuales (x_{n_i}) y la media (\bar{x}_m) es mayor que 2,5 veces la desviación estándar de la repetibilidad (Tabla 1), se analizarán los resultados con el fin de valorar si hay algún resultado anómalo, que no se tendrá en cuenta, o bien, se ensayarán nuevas probetas adicionales.

$$|x_{n_i} - \bar{x}_m| > 2,5 \sigma_r$$

σ_r : desviación estándar de la repetibilidad

- Indicador de rigidez a tracción (IRT), en MPa/mm, con aproximación a la segunda cifra decimal
- Energía total de rotura (G_D), en J/m², aproximada al número entero más cercano
- Tenacidad (T), en J/m², aproximada al número entero más cercano
- Indicador de tenacidad (IT), en (J/m²)-mm o mN, aproximado al número entero más cercano
- Desplazamiento a la carga máxima ($d_{m\acute{a}x}$), en mm, con aproximación a la segunda cifra decimal
- Desplazamiento correspondiente al 50% de la carga máxima en la fase de rotura (d_{50pm}), en mm, con aproximación a la segunda cifra decimal
- Carga máxima en rotura ($F_{m\acute{a}x}$), en kN, con aproximación a la segunda cifra decimal
- Resistencia a tracción (RT), en MPa, con aproximación a la segunda cifra decimal

- Ductilidad (DT), en mm, con aproximación a la segunda cifra decimal
- Tenacidad, expresada como producto (RTxDT), en MPa·mm o kJ/m², con aproximación a la segunda cifra decimal

Nota 11: En el cálculo de los resultados del ensayo tienen mucha influencia los valores de desplazamiento en que se alcanza la carga máxima de rotura, o el 25% o el 50% de dicha carga máxima en la fase de carga. Por ello es muy importante definir correctamente el inicio del ensayo en la gráfica carga-desplazamiento, eliminando la parte inicial de la misma en la que los valores registrados no se corresponden con los del comienzo de la fase de carga en la probeta (hay un cambio notable de la pendiente de la curva cuando se inicia el proceso). Debido a esta eliminación es necesario prolongar el ensayo hasta un valor de desplazamiento superior a 4 mm, lo suficiente para asegurar que en la gráfica, una vez corregida, se alcance este valor.

Nota 12: En algunos casos, con el fin de rectificar esta curva, puede considerarse su pendiente al 50% de la carga máxima en la fase de carga y prolongar hacia atrás la recta tangente a la curva en dicho punto hasta que corte con el eje de abscisas, definiéndose así un nuevo punto (0,0). La anterior rectificación es especialmente importante para calcular la energía total G_D y la tenacidad T en un rango de deformación de 0 a 4 mm. En el caso de las variables IRT o DT, estas se pueden calcular sin necesidad de corrección, partiendo directamente de las diferencias entre deformaciones.

Además de los resultados anteriores, el informe del ensayo incluirá lo siguiente:

- Temperatura de ensayo, en grados Celsius (°C)
- Velocidad de aplicación de la carga, en mm/min
- Origen de la muestra de ensayo: testigo extraído del pavimento o probeta fabricada en el laboratorio
- Método de compactación de la probeta fabricada en el laboratorio
- Diámetro y altura de la muestra de ensayo, en mm

6. PRECISIÓN

Una primera estimación de los valores de precisión del método se muestra en la Tabla 1. Se basa en los resultados de un ensayo comparativo realizado entre tres laboratorios, con empleo cada uno de cuatro probetas cilíndricas de mezcla bituminosa tipo AC16D,

compactadas por impactos y fabricadas en un único laboratorio a partir de una muestra de mezcla obtenida de planta asfáltica. En cada laboratorio los ocho ensayos se realizaron a 20° C.

7.3 El diagrama (Figura 9) incorpora las siguientes líneas:

7.3.1 Tres rectas verticales, situadas respectivamente en los valores de DT de 0,25 mm, 0,5 mm y 1,25 mm. Señalan los límites de cuatro regiones, de forma que cada mezcla,

Parámetro	Valor promedio (tres laboratorios)	Repetibilidad		Reproducibilidad	
		Desviación estándar (promedio de las obtenidas en los tres laboratorios)	Coefficiente de variación (%) (promedio de los obtenidos en los tres laboratorios)	Desviación estándar (calculada a partir de todos los datos conjuntos)	Coefficiente de variación (%) (calculado a partir de todos los datos conjuntos)
F _{máx}	0,93 kN	0,10	9,7	0,10	11,2
RT	0,34 MPa	0,04	9,8	0,04	11,2
IRT	1,50 MPa/mm	0,49	25,9	0,52	32,6
G _D	533 J/m ²	72	13,6	72	13,6
T	436 J/m ²	23	5,3	27	6,2
IT	467 mN	134	29,2	135	29,0
d _{máx}	0,42 mm	0,06	14,0	0,08	20,1
d _{50pm}	1,40 mm	0,20	14,9	0,21	15,9
DT	0,98 mm	0,18	18,9	0,19	19,1

Tabla 1. Repetibilidad y reproducibilidad del método

7. DIAGRAMA FÉNIX

7.1 El diagrama Fénix (Figura 9) es una representación gráfica de los valores de ductilidad (DT), en el eje de abscisas, y resistencia a tracción (RT), en el de ordenadas, obtenidos al ensayar una mezcla bituminosa, generalmente a varias temperaturas, que permite valorar también la tenacidad de la mezcla mediante el parámetro RT x DT.

7.2 Sirve para establecer una clasificación rápida de las distintas mezclas según estos parámetros conforme a una serie de valores característicos que delimitan el diagrama en regiones. Dependiendo de las posiciones que ocupan en el diagrama y en qué regiones se sitúan los resultados obtenidos a cada temperatura al ensayar las mezclas, se pueden caracterizar y comparar estas en cuanto a su resistencia, ductilidad y tenacidad, lo que permite prever su posible evolución frente al deterioro y la fisuración.

según su valor de ductilidad a una temperatura determinada, puede clasificarse como:

- **Frágil:** si $DT < 0,25$ mm
- **Intermedia:** si $0,25 < DT < 0,5$ mm
- **Dúctil:** si $0,5 < DT < 1,25$ mm
- **Muy dúctil:** si $DT > 1,25$ mm

7.3.2 Una recta horizontal situada en el valor de $RT = 0,15$ MPa. Representa el límite por debajo del cual una mezcla se considera que presenta una baja resistencia a tracción a una temperatura de ensayo dada.

7.3.3 Cuatro curvas hiperbólicas equiláteras, del tipo $RT \times DT = a^2$, siendo a una constante que toma los valores de 0,25; 0,50; 0,75 y 1,00 respectivamente. Las curvas delimitan cinco regiones representando distintos rangos de tenacidad, expresada como producto $RT \times DT$.

Según el valor de dicho parámetro a la temperatura de ensayo, una mezcla puede clasificarse como:

- **De baja tenacidad:** si $(RT \times DT) < (0,25)^2 \text{ kJ/m}^2$
- **Poco tenaz:** si $(0,25)^2 < (RT \times DT) < (0,50)^2 \text{ kJ/m}^2$
- **Tenaz:** si $(0,50)^2 < (RT \times DT) < (0,75)^2 \text{ kJ/m}^2$
- **Muy tenaz:** si $(0,75)^2 < (RT \times DT) < (1,00)^2 \text{ kJ/m}^2$
- **De alta tenacidad:** si $(RT \times DT) > (1,00)^2 \text{ kJ/m}^2$

9. BIBLIOGRAFÍA Y NORMAS PARA CONSULTA

Fenix Test. Development of a New Test Procedure for Evaluating Cracking Resistance in Bituminous Mixtures

Pérez Jiménez, F.; Valdés, G.; Miró Recasens, R.; Martínez, A.; Botella, R.
Transportation Research Record, Volumen 2181/2010, diciembre de 2010.

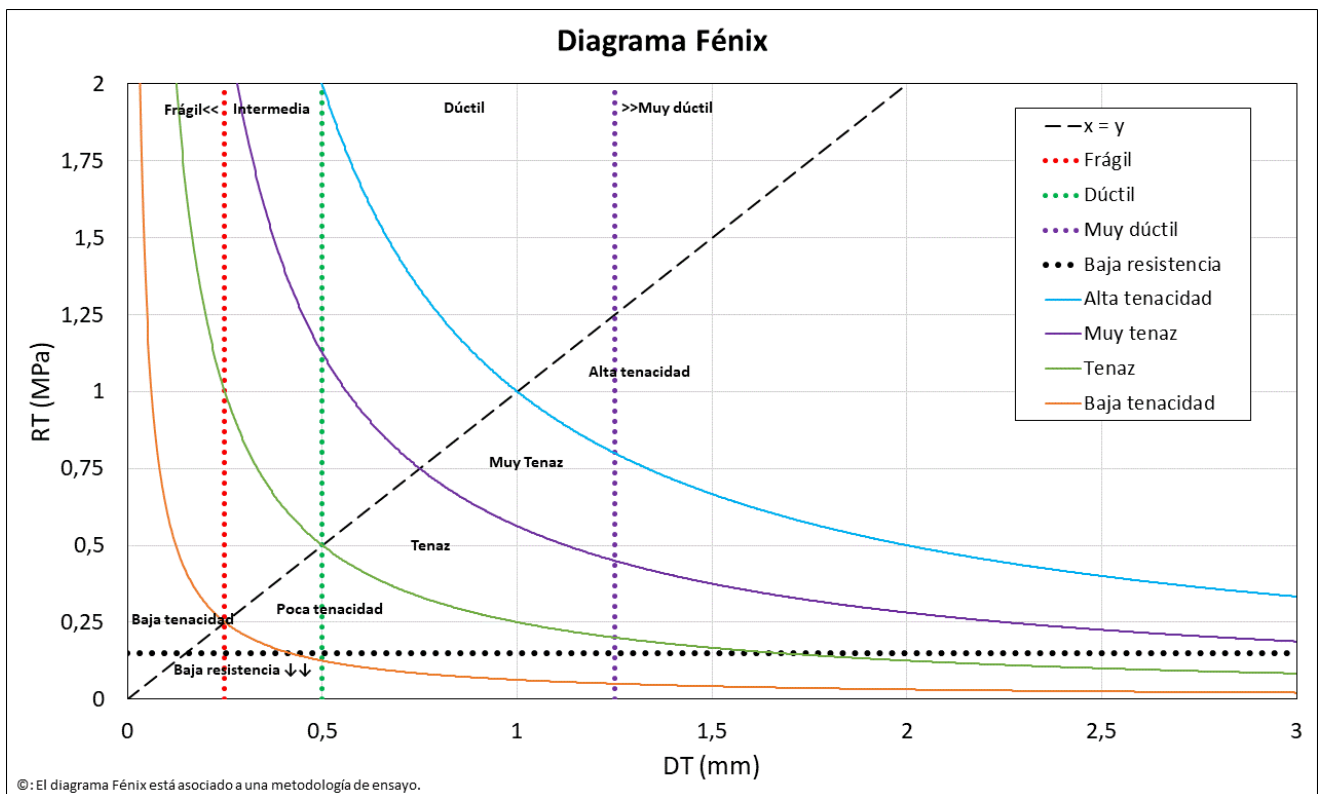


Figura 9. Diagrama Fénix

8. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

Esta norma de ensayo ha sido redactada de acuerdo con los ensayos y trabajos ideados y desarrollados en la Cátedra de Caminos de la ETSICCP de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.

Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures

Pérez Jiménez, F.; Botella, R.; Martínez, A.; Miró, R.
Construction and Building Materials, Volumen 46, 2013.

Diseño de mezclas asfálticas a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el ensayo Fénix.

Pérez Jiménez, F.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R.
Asfalto y pavimentación, Volumen: VI, Nº 22, 2016.

UNE-EN 12697-6 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas”.

UNE-EN 12697-8 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas”.

UNE-EN 12697-30 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos”.

UNE-EN 12697-31 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 31: Preparación de la muestra mediante compactador giratorio”.