

## CAPÍTULO 3

# EL ENSAYO DE TRACCIÓN DIRECTA

### 3.1 Introducción

El ensayo a tracción es ampliamente utilizado en ingeniería, ya que permite determinar las propiedades mecánicas de los materiales, es decir sus características de resistencia y deformabilidad, y a la vez nos sirve de herramienta para verificar las especificaciones de aceptación o rechazo.

Otras características, no menos importantes, que pueden determinarse mediante el ensayo de tracción son la tenacidad, la deformación unitaria de rotura, la tensión máxima y el módulo de rigidez.

No obstante, en el campo de las mezclas bituminosas no existe un ensayo estandarizado a tracción directa, que permita determinar estas propiedades mecánicas.

### 3.2 Antecedentes

Los únicos antecedentes que se han encontrado de ensayos a tracción directa en mezclas bituminosas son mínimos, se aplican a probetas circulares y su metodología es similar.

A continuación, se describen de forma resumida estos ensayos en base a trabajos existentes de cobertura más amplia.

### **3.2.1 El ensayo Barcelona de Tracción Directa (BTD)**

Junto con el desarrollo del sistema Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) surgen nuevos equipos tanto para ensayos de ligantes bituminosos, como para la elaboración de la compactación de la mezcla bituminosa. Estos equipos presentan las desventajas de que son muy costosos, sofisticados, no son portátiles y son procedimientos de laboratorio orientados a la investigación, por lo que en muchas ocasiones resultan poco prácticos para efectos de control en el campo, ya que es necesario invertir periodos de tiempos muy largos en el desarrollo de los ensayos.

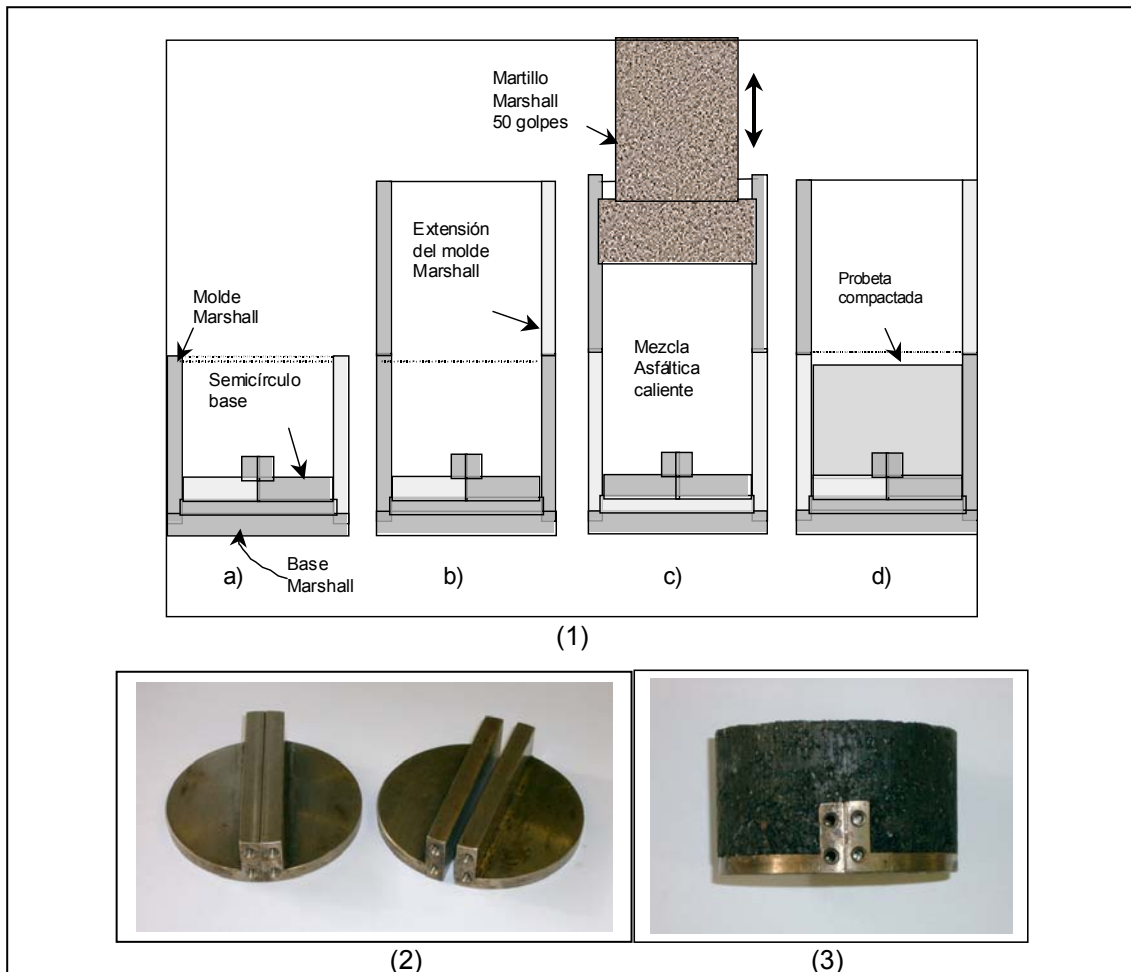
Siguiendo en la línea de investigación del diseño de las mezclas bituminosas, y con el fin de disponer de ensayos más sencillos, fáciles de realizar y más económicos, el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) desarrolla en el 1997 un ensayo simple de tracción directa, denominado BTD (ensayo Barcelona de Tracción Directa).

En un principio este ensayo buscaba estudiar el comportamiento de materiales antifisuras, pero actualmente se está aplicando al estudio del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas.

Mediante la aplicación de este ensayo se puede determinar la resistencia a la tracción, la energía de rotura o tenacidad, el módulo de carga y deformación de rotura de las mezclas bituminosas. Consecuentemente también se pueden caracterizar funcionalmente los ligantes a partir de las propiedades que éstos proporcionan a las mezclas bituminosas. Todas estas propiedades están relacionadas con dos de los mecanismos de deterioro introducidos en el programa SHRP: el comportamiento a fatiga y la fisuración a bajas temperaturas de las mezclas bituminosas.

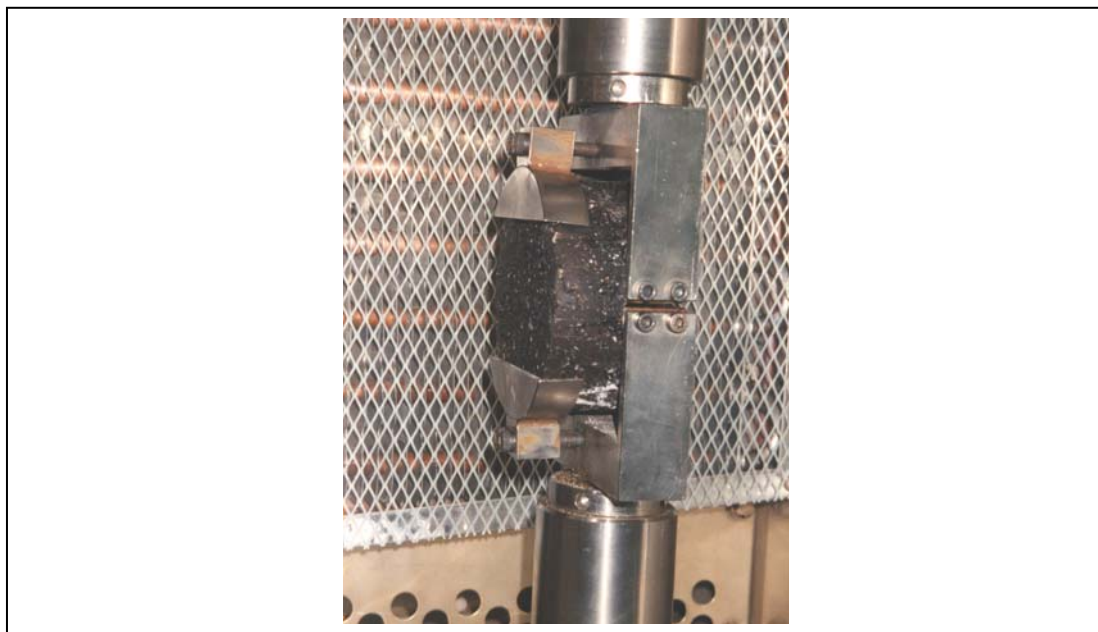
#### **3.2.1.1 Metodología del ensayo BTD**

El ensayo consiste en someter una probeta cilíndrica a tracción directa. Para el proceso de fabricación y compactación de las probetas se sigue la misma metodología que para el método Marshall, que es el procedimiento más habitual para la preparación de probetas de mezclas bituminosas. Por lo que las bases donde se fabrican las probetas se diseñan para poder ser introducidas en un molde cilíndrico de 101,6 mm de diámetro y poder emplear así la compactadota Marshall. Estas bases están formadas por dos semicírculos con un resalto en la zona de contacto, lo que crea una entalladura en la parte central de la probeta, debilitando esta zona para provocar la formación de un plano de fisuración y a la vez sirve para crear un sistema de anclaje donde aplicar los esfuerzos de tracción, tal y como se indica en la figura 3.1.



**Figura 3.1-** (1) Proceso de fabricación de la probeta. (2) Bases de las probetas. (3) Probeta lista para ser ensayada ensayo BTM [17]

Las mordazas se fabrican de tal forma, que al someter la probeta a tracción, las bases metálicas mantengan paralelas las dos superficies que forman el plano de fisuración. Para conseguirlo, se unen rígidamente a la prensa mediante tornillos, que forman un empotramiento perfecto, impidiendo su desplazamiento y su giro, tal y como se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2-** Disposición de la probeta en el ensayo BTM [17]

El ensayo se puede realizar en modo estático o dinámico, utilizando los mismos dispositivos mecánicos. El modo estático se realiza aplicando una velocidad de deformación constante y se pueden determinar la resistencia a tracción, el módulo secante a tracción, la energía y deformación de rotura. Estos parámetros sirven para caracterizar las mezclas bituminosas por su tenacidad.

El modo dinámico se realiza aplicando una carga senoidal de amplitud y frecuencia constante y sirve para estudiar el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas. De este ensayo a tracción dinámica, se pueden encontrar las deformaciones unitarias, las deformaciones críticas a fatiga, las leyes de fatiga y los respectivos módulos dinámicos de rigidez para cada mezcla.

Durante el ensayo, se va produciendo la apertura de la entalladura, lo que provoca la fisuración de la probeta [17].

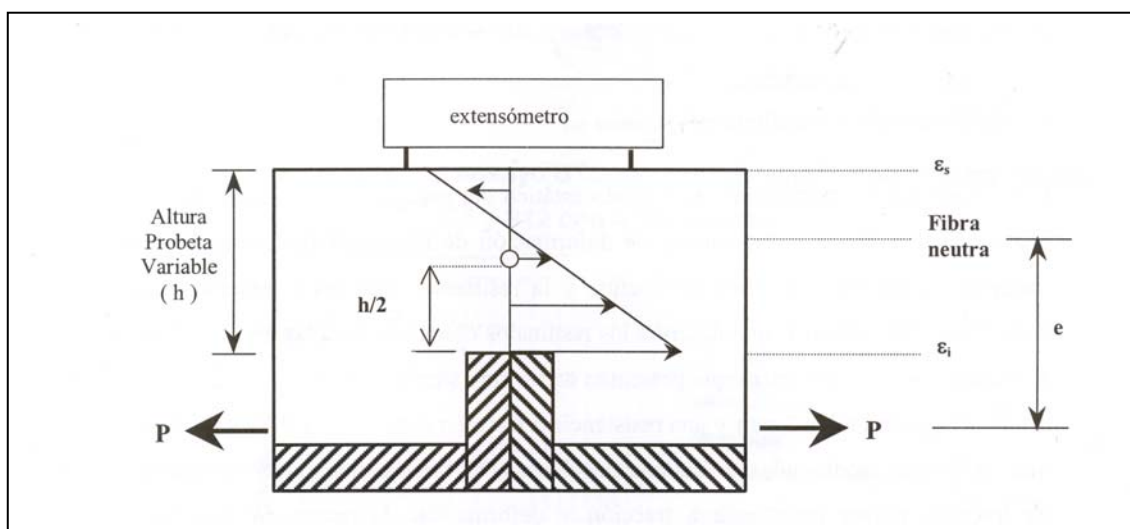
Es importante destacar que de los ensayos realizados hasta el momento, se han obtenido resultados satisfactorios, con buena repetibilidad, los cuales se consiguen de forma sencilla y bastante rápida.

Así mismo, resulta interesante mencionar que en el estudio realizado sobre el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas realizado por Félix Pérez Jiménez, J.B Cepeda Aldape y Rodrigo Miró Recasens [18], se halló una correlación entre el modo estático y el modo dinámico del ensayo BTM. Esto implica que bastaría realizar el ensayo estático para conocer el comportamiento a fatiga que tendrá la mezcla durante su vida en servicio. Es decir, a partir del parámetro de deformación a rotura ( $dR$ ) se obtiene la deformación crítica ( $dC$ ), luego impuesta una deformación unitaria ( $\epsilon_i$ ) en la interfase de la mezcla asfáltica se determina  $\epsilon_i/dC$  y se sabe el número de ciclos que resistirá la mezcla antes de que se fisure.

### 3.2.1.2 Consideraciones sobre el BTD

Una gran ventaja que presenta este ensayo es la facilidad para fabricar las probetas, ya que se sigue la misma metodología que para el método Marshall.

La única observación negativa a realizar es que la probeta no se encuentra sometida a un ensayo de tracción simple puro, es decir, al ensayar la probeta esta no se encuentra traccionada en su totalidad. En la figura 3.3 se observa el estado de tensiones producidas en la probeta, suponiendo elasticidad:



**Figura 3.3-** Esquema de la probeta. Diagrama de esfuerzos y deformaciones [18]

Como se puede observar, traccionar la probeta por un solo extremo, hace que aparezca un esfuerzo adicional, es decir, se produce un momento debido a la excentricidad de la carga, lo que acaba provocando la aparición de compresiones en el extremo opuesto al punto de aplicación de la carga. Esto complica el cálculo de parámetros mecánicos como tensiones, deformaciones, módulos de rigidez, y sólo se puede considerar la superposición de esfuerzos si consideramos un material elástico y lineal.

### 3.2.2 El ensayo de Disco Compacto a Tracción (DC(T))

El ensayo a tracción directa se viene empleado en mezclas bituminosas para estudiar la rotura mecánica del pavimento.

La fractura constituye una causa importante de en el deterioro prematuro del pavimento superficial, particularmente en climas fríos. Las condiciones de carga que producen estas fracturas son una combinación de efectos mecánicos (cargas de la rueda) y de efectos ambientales (el completar un ciclo termal y del envejecimiento material).

Para mejorar los métodos de diseño del pavimento, se han realizado estudios de los mecanismos que provocan la rotura mecánica del pavimento, analizando el inicio y propagación de fisuras en las mezclas bituminosas.

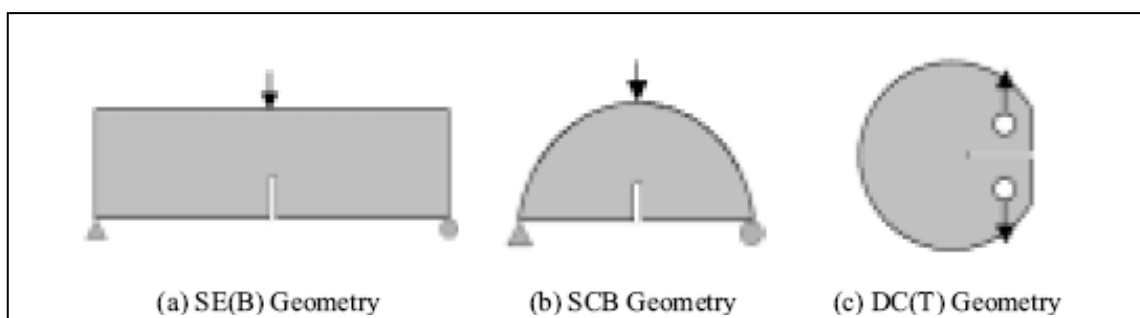
El concepto de rotura mecánica se viene utilizando desde 1970 para analizar el comportamiento de la fractura en las mezclas bituminosas. Sin embargo, ha sido en los últimos años cuando se ha podido avanzar en el comportamiento de la fractura de las mezclas bituminosas, gracias a los progresos en el campo de la mecánica de la fractura de los materiales cuasi-frágiles. Un gran número de científicos ha estudiado la utilidad de la rotura mecánica para determinar la fisuración tanto en betunes como en mezclas bituminosas.

Sin embargo los ensayos estandarizados de fractura para mezclas bituminosas todavía no se han desarrollado lo suficiente como para que este aspecto quede totalmente resuelto.

Los ensayos más comunes para determinar las características de fractura de las mezclas bituminosas, son ensayos a flexión. En estos ensayos, utilizando las nociones derivadas de la mecánica de rotura elástica lineal (LEFM) se han podido determinar la dureza y la energía de fractura de diferentes mezclas bituminosas.

Las geometrías más utilizadas en los ensayos de fractura de mezclas bituminosas, así como la forma de aplicación de la carga se muestran en la figura 3.4.

El único ensayo a tracción directa que se ha encontrado para determinar las características de fractura de las mezclas bituminosas, es el ensayo DC (T) (Disco Compacto con muescas)



**Figura 3.4.-**Tipología de probetas y forma de aplicación de la carga más comunes en los ensayos de fractura de mezclas bituminosas [19]

### 3.2.2.1 Metodología de ensayo DC (T)

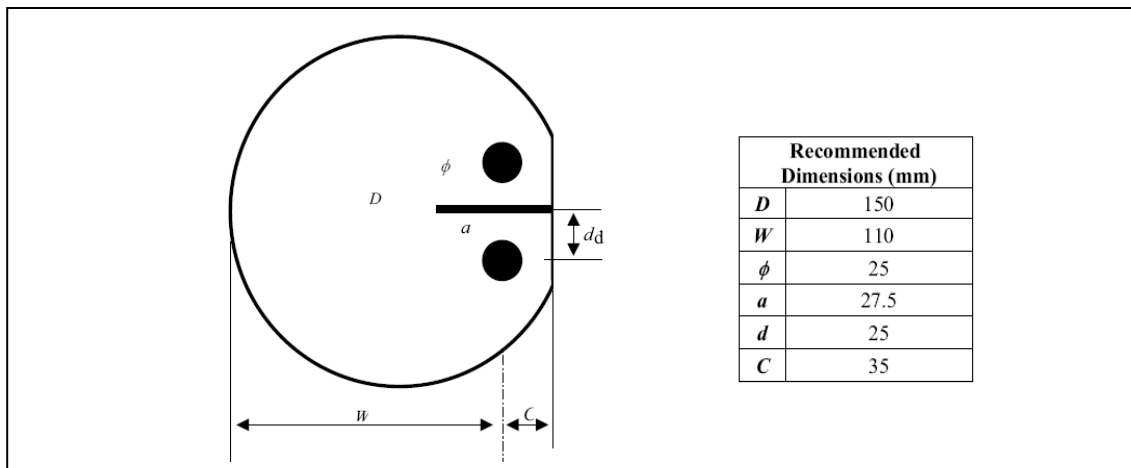
El estudio realizado por M.P. Wagoner, W. g. Buttlar y G. H. Paulino [19] se desarrolla para determinar el potencial de utilizar la geometría cilíndrica como la DC(T), para obtener la energía de fractura de las mezclas bituminosas. Las

probetas cilíndricas se fabricaron en el laboratorio utilizando procedimientos estándar mediante el compactador giratorio.

Como punto de partida para su estudio se utiliza la especificación ASTM E399 para desarrollar una geometría de probeta adecuada al ensayo, la denominada DC(T).

En la ASTM E399 se describe el ensayo DC (T) para obtener el plano de fractura de probetas metálicas con geometría prismática, lo cual no favorecía el empleo de la nueva técnica de fabricación de mezclas bituminosas mediante el compactador giratorio Superpave.

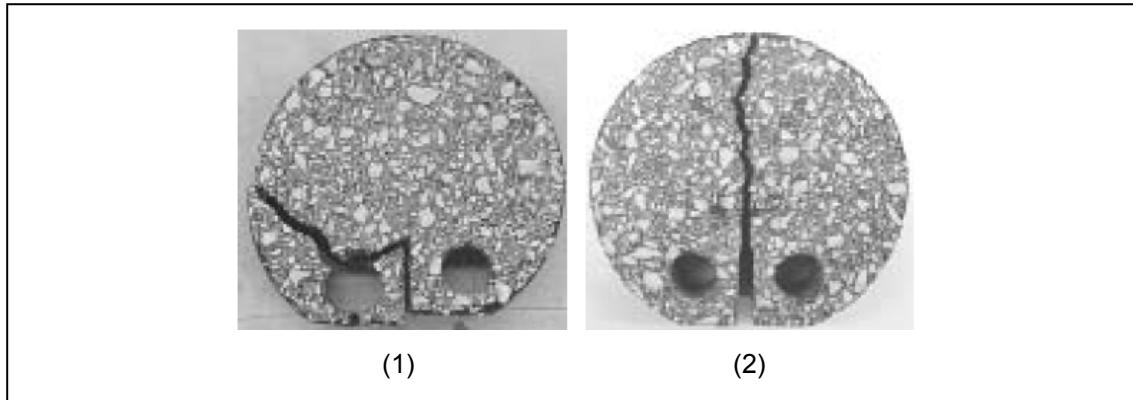
Después de varias iteraciones en el laboratorio se desarrolla una geometría cilíndrica, que maximiza la longitud de la sección de fisuración y previene la rotura de la probeta por los agujeros de carga. La geometría y dimensiones de la probeta se indican en la figura 3.5 junto con dimensiones de la ASTM E399.



**Figura 3.5-** Geometría y dimensiones recomendadas para la probeta DC (T) [19]

En la fase inicial de desarrollo de esta geometría, los agujeros de carga se colocaron lo más cercanos posibles a los bordes de la probeta, para crear así una mayor longitud de ligamento. Sin embargo, esta geometría se modificó porque la tendencia al fallo en estos agujeros de carga era del 50%, debido a la falta localizada de material en los puntos de carga. Para reducir la probabilidad de fallo, los agujeros de carga se desplazaron hacia el centro de la probeta, de forma que se aseguraba la existencia de material suficiente, consiguiendo que las probetas rompieran sin un solo fallo por los agujeros de carga. En la figura 3.6 se observa la propagación de la fisura con la geometría inicial y la finalmente propuesta.





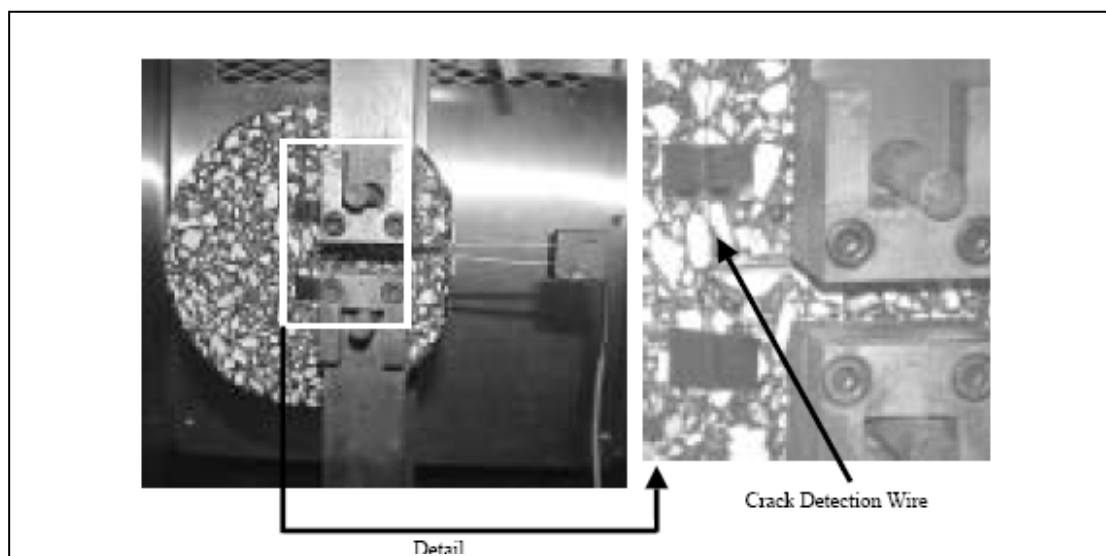
**Figura 3.6.-** Propagación de la fisura con la geometría inicial de la probeta y la finalmente propuesta. (1) Fallo de la geometría inicial en los puntos de carga. (2) Geometría final con la rotura esperada [19]

El espesor de la probeta se determina en función de los espesores típicos para capas de pavimento (25-100 mm).

Para que se produzca una mayor repetibilidad en el ensayo, se recomienda que la dimensión más pequeña de la probeta sea por lo menos cuatro veces mayor que el tamaño máximo del conjunto.

Una vez que el diseño de las probetas estuvo suficientemente desarrollado, se procede al estudio experimental.

El accesorio de carga se fabricó de forma que los pernos de carga permanecieran sin fricción. La figura 3.7 muestra la disposición de la probeta en el ensayo.



**Figura 3.7-** Disposición de la probeta DC (T) en el ensayo [19]



Basándose en los resultados de este estudio, las conclusiones fueron las siguientes:

- La energía de la fractura obtenida de la geometría de DC(T) es comparable con la obtenida en la literatura para las geometrías de SE(B) y de SCB, quedando dentro de unos rangos aceptables.
- La energía de la fractura de las mezclas bituminosas aumenta con el aumento de temperatura, sugiriendo que el material experimenta una transición de frágil a dúctil. Para el rango de temperaturas investigadas (-20,-10 y 0°C), la energía de la fractura aumenta con la disminución de la velocidad de carga. Esto es una observación general, la cuál no es específica para el ensayo DC(T).
- Un análisis estadístico de la variación de la trayectoria de la fisura, demuestra que no existe correlación entre la energía de la fractura y el ángulo de la desviación de la fisura. Es decir, no en todas las probetas ensayadas se producía la trayectoria recta esperada (tipo I). En los ensayos se encontraron los tres tipos de grietas, siendo la de tipo II la más común, siguiéndole la de tipo I y por último la de tipo III. Por lo que se necesitaría realizar otro estudio alternativo donde se determinase la validez de la energía de fractura cuando la trayectoria de la grieta experimenta una desviación de la trayectoria teórica del modo I <sup>(1)</sup>.
- Igual que ocurre en el hormigón, el efecto del espesor de la probeta influye en la energía de fractura.
- La determinación experimental de la energía de la fractura resulta satisfactoria en mezclas bituminosas a bajas temperaturas, cuando el material es relativamente rígido, pero queda sin definir la determinación de la energía de la fractura a temperaturas más altas.

### 3.2.2.2 Consideraciones sobre el DC(T)

Una gran ventaja que representa este ensayo es la facilidad para compactar las probetas mediante el compactador giratorio del Superpave.

Sin embargo, el proceso de fabricación de las probetas no se puede presentar como ventaja, ya que crear los agujeros de carga en la probeta es un proceso dificultoso: se crea una plantilla para localizar los agujeros, se hacen los agujeros con un taladro, se corta el plano de borde y se realiza la muesca en la probeta.

---

<sup>(1)</sup> El modo I corresponde a una trayectoria de la fisura recta. En el modo II la fisura se inicia con una trayectoria recta pero se acaba desviando. En el modo III la fisura se inicia y propaga con una cierta inclinación.

Otro de los inconvenientes, igual que le sucedía al ensayo BTB, es que la probeta no se encuentra sometida a un ensayo de tracción simple puro, lo que provoca la aparición de compresiones en el extremo opuesto al punto de aplicación de la carga, complicándose el cálculo de los parámetros mecánicos.

### **3.3 Nuevo procedimiento de ensayo a tracción directa**

Para evaluar la tenacidad de las diferentes mezclas bituminosas, el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado un nuevo ensayo de tracción directa, de forma estática, aplicado a probetas prismáticas.

La principal ventaja de este procedimiento se basa en la geometría prismática de la probeta, sobre la que únicamente se producen esfuerzos de tracción. Este hecho hace que parámetros tales como resistencia a tracción, energía de rotura y deformación de rotura, sean muy sencillos de obtener.

Por las condiciones de ensayo, el de tracción estática es el que mejor determina las propiedades mecánicas de los materiales, es decir, aquellas que definen sus características de resistencia y deformabilidad.

La carga debe aplicarse de tal manera que el esfuerzo resulte uniformemente distribuido sobre la sección transversal del material.

Al tratarse de un ensayo estático el incremento de carga se efectúa de forma muy lenta, para evitar los efectos de las fuerzas de inercia.

Este ensayo permite obtener, bajo un estado simple de tensión, la carga máxima y la consiguiente resistencia estática, en base a cuyos valores se pueden fijar los de las tensiones admisibles o de proyecto y mediante el empleo de medios empíricos o dinámicos, conocer el comportamiento del material sometido a otro tipo de sollicitaciones (fatiga, etc.).

#### **3.3.1 Tensiones generadas en la probeta**

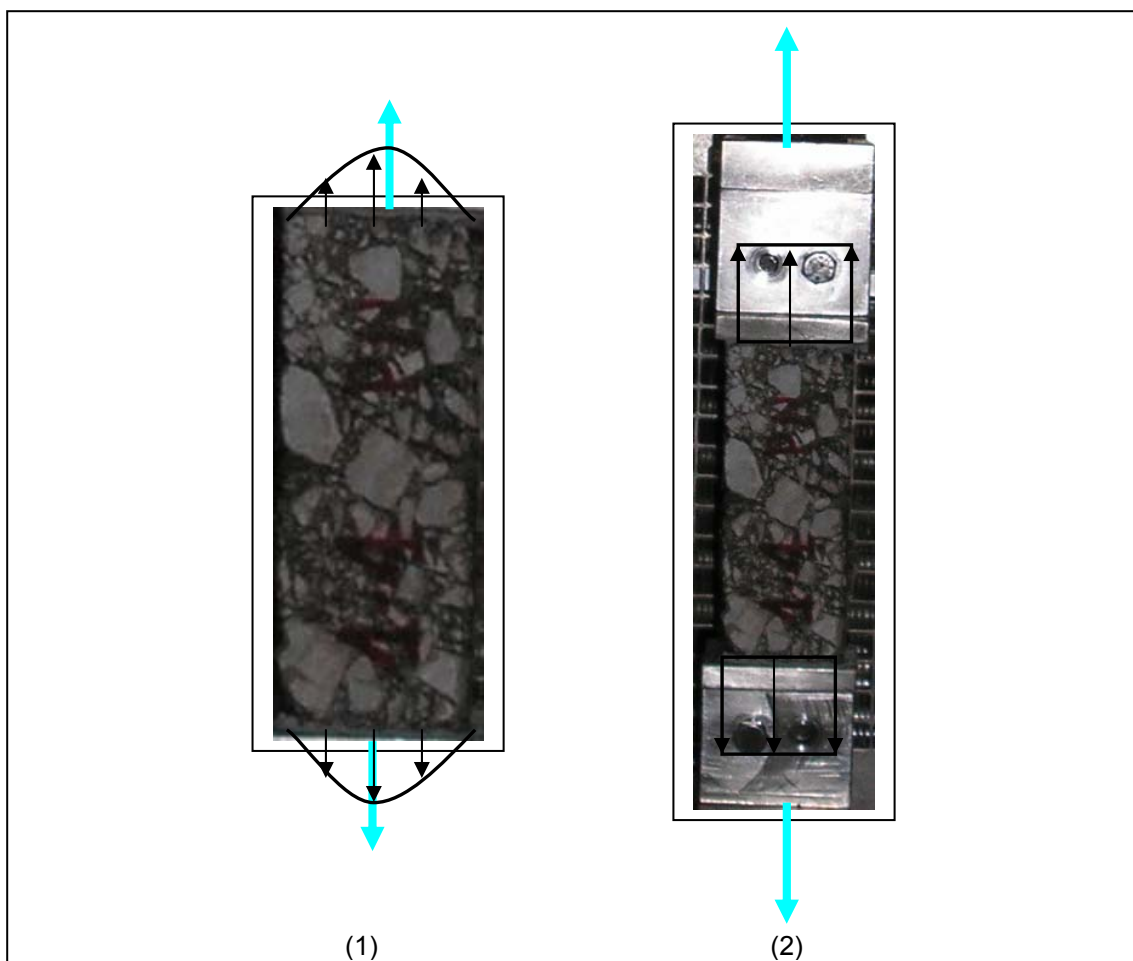
La predicción exacta de la respuesta y del funcionamiento de las mezclas bituminosas ante la acción de una carga requiere de la utilización de modelos teóricos que modelicen la estructura de las mezclas y su comportamiento en función de la temperatura. Estos modelos se han desarrollado con diferente grado de sofisticación, básicamente se pueden dividir en elásticos y viscoelásticos.

Debido a la menor complejidad de los métodos elásticos y que dan resultados suficientemente aceptables, son los métodos más utilizados. Otros modelos

más complejos necesitan una caracterización muy sofisticada que es difícil de conseguir de una forma práctica. Aunque el comportamiento de las mezclas bituminosas es no lineal, el hecho de aplicar un análisis elástico lineal a temperaturas inferiores a 25°C se puede considerar válido [20].

Cuando sometemos la probeta al ensayo a tracción simple, la centramos en el eje de carga para que no se produzcan excentricidades en la misma, para que el único esfuerzo actuante sea el de tracción.

Al mismo tiempo, se fijan unas placas metálicas a ambos extremos de la probeta con la ayuda de un adhesivo a base de resinas epoxi. Estas placas sirven para conectar la probeta con la prensa y al mismo tiempo facilitan el reparto de las tensiones en los extremos de la probeta, pudiendo suponer una distribución de tensiones uniforme. En la figura 3.8 se muestra la distribución teórica de tensiones en las probetas.



**Figura 3.8.-** Distribución de tensiones en probetas sometidas a tracción. (1) Distribución no uniforme con carga puntual. (2) Distribución uniforme de tensiones con carga repartida.

Como se ha comentado anteriormente la principal ventaja de este procedimiento es el hecho de que nos encontremos en este estado uniaxial de tensiones, ya que el cálculo de parámetros mecánicos se simplifica notablemente.

Cuando se aplica una tracción simple a una probeta, como la indicada en la figura 3.9 cuyo eje yace a lo largo del eje de coordenadas  $z$ , siendo los ejes  $x$  e  $y$  perpendiculares al  $z$  y perpendiculares entre sí, las tensiones en el eje sobre el que se aplica la fuerza son las únicas tensiones no nulas del tensor de tensiones, por lo que resultan muy sencillas de calcular. Las tensiones uniaxiales que se producen se calculan de la siguiente forma:

$$\sigma_z = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde,  $P$  representa la carga axial en unidades de fuerza y  $A$  el área de la sección transversal sobre la que actúa dicha fuerza.

Resultando nulas el resto de tensiones:

$$\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad \text{Ecuación 3.2}$$



**Figura 3.9-** Ensayo de tracción simple, con el eje de carga en la dirección del eje  $z$

### Tensión de rotura

La resistencia a tracción directa se determina siguiendo la ecuación:

$$\sigma_z = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_r} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde  $P_{m\acute{a}x}$  es la tensión máxima que soporta la probeta antes de romper y  $A_r$  es el área de rotura, en nuestro caso, la zona donde se han realizado las muescas, ya que es la de menor sección y por lo tanto la más débil. En la figura 3.10 se observa claramente la zona de rotura.



Figura 3.10.- Rotura de la probeta por la zona de muescas

### 3.3.2 Procedimiento de ensayo

Para cada combinación de temperatura y tipo de betún ensayado, se han fabricado tres probetas siguiendo el procedimiento descrito en la actual norma para el ensayo de pista de laboratorio, NLT-173/00 [21]. De cada probeta de pista se han obtenido por serrado 10 probetas prismáticas, con unas dimensiones aproximadas de 150x50x50 mm. A cada probeta se le han practicado unas entalladuras en su parte central, haciendo disminuir su sección, con objeto de inducir de esta manera la formación de la fisura cuando se realiza el ensayo.

Para poder ensayar las probetas, y poder acoplarlas al dispositivo de ensayo se fijan unas placas metálicas a ambos extremos de la probeta con la ayuda de un adhesivo a base de resinas epoxi. Estas resinas tienen que tener una resistencia igual o superior al material al que van fijadas, para que no se produzcan fallos en los puntos de contacto.

Para asegurar que la probeta quede bien centrada en el eje de carga del dispositivo durante el ensayo, la probeta con sus placas, se ajustan a unos moldes metálicos que permiten su alineación, de forma que las excentricidades se reducen notablemente. En la figura 3.11 se muestra cómo se ajusta el sistema probeta-placas a los moldes.



**Figura 3.11-** Proceso de fijación de las placas de los extremos de la probeta prismática

El ensayo consiste en someter las probetas prismáticas a un ensayo simple de tracción directa a diferentes temperaturas. Para la realización del ensayo se ha utilizado una prensa MTS que dispone de una cámara capaz de controlar la temperatura con una precisión de  $\pm 1$  °C. Antes de ensayar las probetas, estas se guardan durante 12 horas, bien en cámaras frigoríficas o en estufas, a la misma temperatura a la que se va a realizar el ensayo.

El ensayo se realiza mediante control de desplazamiento del pistón, aplicando un desplazamiento a una velocidad constante de 0,1 mm/min hasta llegar a la rotura total de la probeta. Esta velocidad es suficientemente baja como para poder considerar el ensayo estático.

En el equipo informático se registra la carga aplicada y la deformación producida mediante unos extensómetros de 25 mm de base situados a ambos lados de las entalladuras.

La figura 3.12 muestra cómo se fija la probeta a la prensa, la situación de los extensómetros y la forma típica de rotura de las probetas sometidas a tracción.





**Figura 3.12.-** Ensayo a tracción directa de la probeta prismática

### **3.3.3 Definición de los parámetros mecánicos obtenidos**

#### **3.3.3.1 Tensión máxima**

La tensión máxima o tensión de rotura, es el cociente entre la carga máxima resistida por la probeta antes de romper y la superficie inicial sobre la que actúa dicha fuerza.

#### **3.3.3.2 Módulo de rigidez**

El comportamiento de los materiales bajo una carga, se suele limitar a la región lineal de la curva tensión vs deformación unitaria. Esta región lineal se manifiesta en la zona de la curva pre-pico y se suele producir para valores relativamente bajos de deformación unitaria.

Las mezclas bituminosas son materiales viscoelastoplásticos. Debido a las propiedades del betún, el comportamiento de las mezclas bituminosas varía con la temperatura y la velocidad de aplicación de las cargas. Esto hace que sólo a bajas temperaturas y con velocidades de aplicación de las cargas elevadas, presenten un comportamiento elástico y lineal. El comportamiento viscoelástico se puede aproximar por la variación del módulo de rigidez en función de la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga.

El módulo de rigidez es una relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante, e indica qué tan flexible es una mezcla asfáltica: a mayor módulo de rigidez a tracción menos flexible es la mezcla asfáltica.



Según las condiciones de temperatura y de aplicación de las cargas, este módulo se aproximará más a un módulo de elasticidad o viscosidad [6].

### 3.3.3.3 Deformación unitaria

Cuando ensayamos una probeta a tracción simple, podemos medir el alargamiento total que ha sufrido la probeta para cualquier incremento predeterminado de la carga axial por medio de extensómetros, que miden las deformaciones lineales. A partir de estos valores, determinamos el alargamiento por unidad de longitud o deformación unitaria de la siguiente forma:

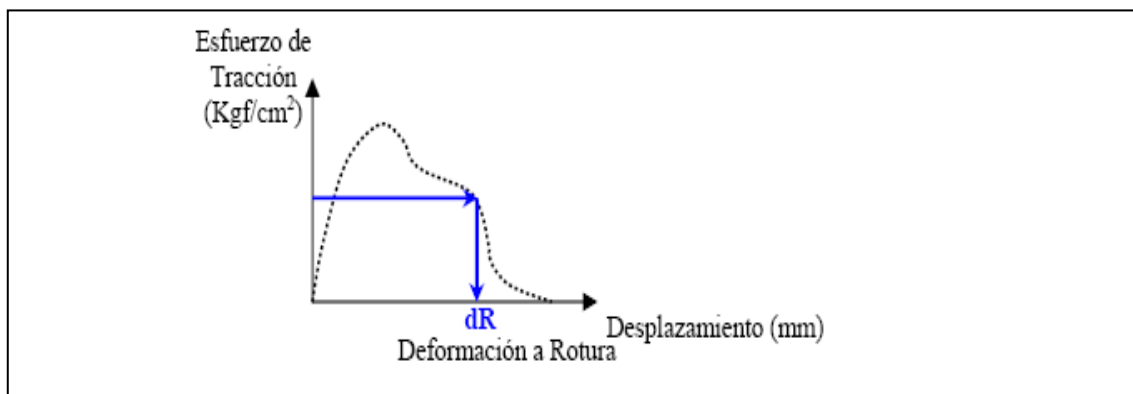
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde  $\Delta L$  es el alargamiento total y  $L$  es la longitud patrón, por lo que la deformación unitaria es adimensional y se suele expresar en mm/mm. En nuestro caso, la base de los extensómetros que es de 25 mm representa la longitud inicial o patrón.

#### 3.3.3.3.1 Determinación de la deformación unitaria de rotura

La deformación última de rotura de las probetas es aquella deformación tal que el esfuerzo soportado por la mezcla asfáltica es mínimo.

Algunos autores [22] consideran que la deformación de rotura es la correspondiente al instante en que el esfuerzo máximo soportado por la probeta de ensayo se reduce a la mitad de su magnitud. El valor de esta deformación se obtiene gráficamente a partir de la curva carga vs deformación, tal y como se muestra en la figura 3.13.



**Figura 3.13.-** Curva de rotura obtenida del Modo Estático [22]

Otros como Li et al, 2004 [23] definen un criterio común de rotura, es decir, definen la deformación última de rotura como la deformación que se produce cuando la probeta, en su parte post-pico, llega a valores del 12 al 17% de la tensión máxima obtenida durante el ensayo.

El criterio más reciente lo muestra Alonso [24], que marca un límite de tensión fijo de 0,05 MPa, por considerar esta tensión como la mínima admisible para cualquier tipo de mezcla, independientemente de la temperatura.

### 3.3.3.4 Tenacidad

La tenacidad es un concepto comúnmente utilizado a nivel de la resistencia de materiales, pero difícil de definir y calcular.

Se puede definir como la capacidad para absorber energía durante la deformación, es decir, como la capacidad para soportar esfuerzos ocasionales superiores al esfuerzo máximo, sin que se produzca la rotura del material. Es una propiedad que no se identifica tanto con la dureza del material, sino más bien con la 'ausencia de fragilidad', e involucra la resistencia mecánica con la capacidad para absorber energía sin romper, lo que hace que sea una propiedad de gran valor en el diseño de las mezclas bituminosas.

Una forma de entender la tenacidad de forma cualitativa, es considerando que las grietas internas de los materiales se propagan más rápido mientras menos tenaz sea el material. Cuando un material es blando, se deforma con facilidad y la porción del material que rodea la grieta también se deforma consumiendo energía, lo que retarda la propagación de la grieta y aumenta su tenacidad. En el caso de los materiales duros, esta deformación no se produce, por lo que las grietas disponen de mucha más energía para propagarse, lo que hace que presente una menor tenacidad. No obstante esto no implica que exista una relación inversa entre dureza y tenacidad, ya que la propagación de grietas depende de otros factores, como el tipo de proceso de deformación o las dimensiones de la grieta inicial.

#### 3.3.3.4.1 Criterios de referencia para determinar la tenacidad

La forma de concretar el concepto de tenacidad y determinar su valor, es calculando el área bajo la curva de tensión vs deformación unitaria o de forma equivalente la curva carga vs desplazamiento.

Existen ecuaciones con aproximaciones matemáticas para calcular el área bajo la curva esfuerzo vs deformación. Para materiales frágiles, donde la curva tensión vs deformación se aproxima a una parábola, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$U_T \cong \frac{2}{3} \cdot \sigma_u \cdot \varepsilon_f \quad \text{Ecuación 3.5}$$

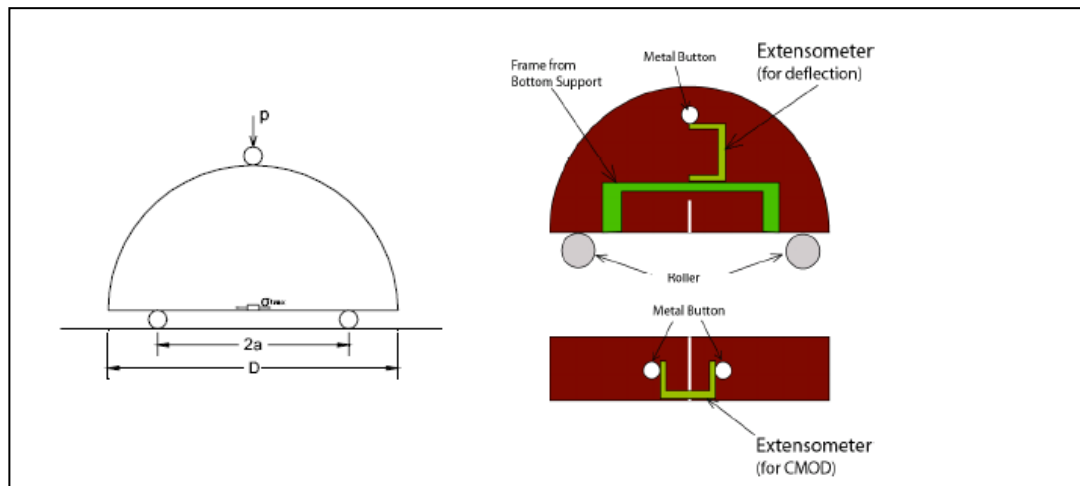
donde  $\sigma_u$  es la tensión máxima y  $\varepsilon_f$  la deformación máxima.

En la literatura se han encontrado diversas propuestas técnicas para determinar la energía de fractura o tenacidad. Algunas de las más recientes se presentan a continuación:

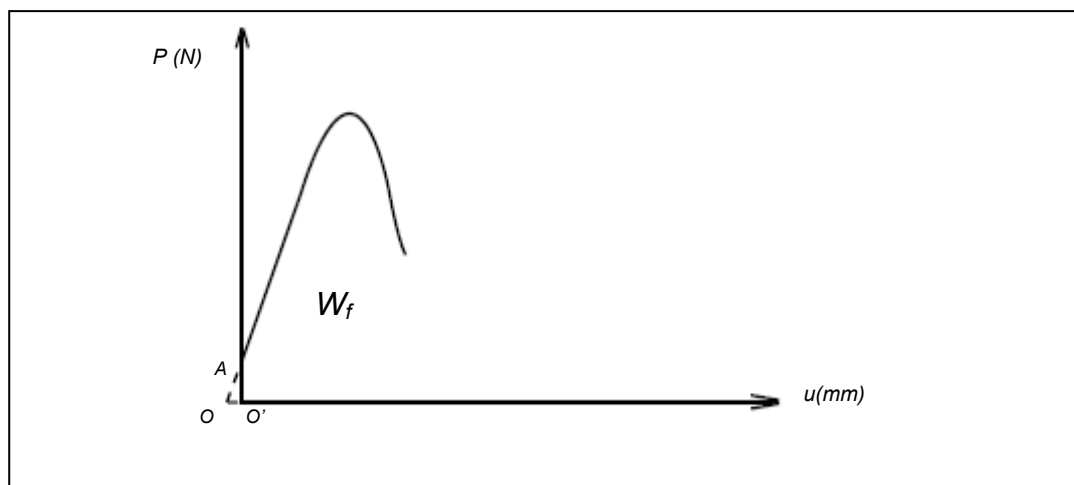
1. Estudio realizado por Li et al [23], patrocinado por el Departamento de Transporte de Minesota.

En este estudio se calcula la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas a bajas temperaturas ( $-30$  y  $-40^{\circ}\text{C}$ ). Para su cálculo se ha seguido la especificación RILEM TC 50 FMC (modelo de fisura ficticio), ampliamente utilizada en el estudio del hormigón.

Con los resultados obtenidos del ensayo a flexotracción de probetas semicirculares (SCB), se han dibujado las curvas carga vs desplazamiento ( $P-u$ ). En las figuras 3.14 y 3.15 se muestra la metodología del ensayo SCB y las curvas carga vs desplazamiento.



**Figura 3.14-** Ensayo SCB. Metodología y posición de los extensómetros en el ensayo [25]



**Figura 3.15-** Curva carga vs desplazamiento [23]

Primero se procede al cálculo del trabajo total de fractura ( $W_T$ ), calculado como el área bajo la curva de carga vs desplazamiento ( $P-u$ ) y posteriormente, dividiendo el trabajo total por el área del ligamento ( $A_{lig}$ ) se obtiene la energía de fractura ( $G_f$ ), tal como muestra la ecuación 3.6.

$$G_f = \frac{W_T}{A_{lig}} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

donde:

- El área del ligamento ( $A_{lig}$ ), es el producto de la longitud de probeta por encima de la muesca y su espesor.
- El trabajo total, es la suma de dos trabajos, el trabajo de fractura ( $W_f$ ) y el trabajo de la cola de la curva ( $W_{tail}$ ):.

$$W_T = W_f + W_{tail} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

- el trabajo de fractura se calcula como el área bajo la curva  $P-u$  obtenida experimentalmente:

$$W_f = \int P \cdot du \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Para el cálculo del área bajo la curva se hicieron dos hipótesis:

i) Se desprecia el área triangular (O'OA) por ser muy pequeña. El ensayo empezaba con una carga fijada de 0.3 kN (punto A), tal como se indica en la figura 3.15.

ii) El final del ensayo se alcanza cuando la probeta llega a un valor de tensión de 0.5 kN, correspondiente al 12-17 % de la carga máxima de las probetas ensayadas.

- el trabajo de cola ( $W_{tail}$ ), se calcula haciendo una estimación del área de cola de la curva, es decir, el área después de la tensión de pico, a partir de la cual se produce una relajación de la tensión, para ello se recurre a las teorías del modelo de fisura ficticio (FCM) y el método cinemático de cuerpo rígido. Se seleccionó una función de relajación de tipo exponencial, por semejanza entre las mezclas bituminosas a bajas temperaturas y el hormigón. Haciendo las consideraciones de equilibrio oportunas se llegó a la siguiente expresión de energía de cola:

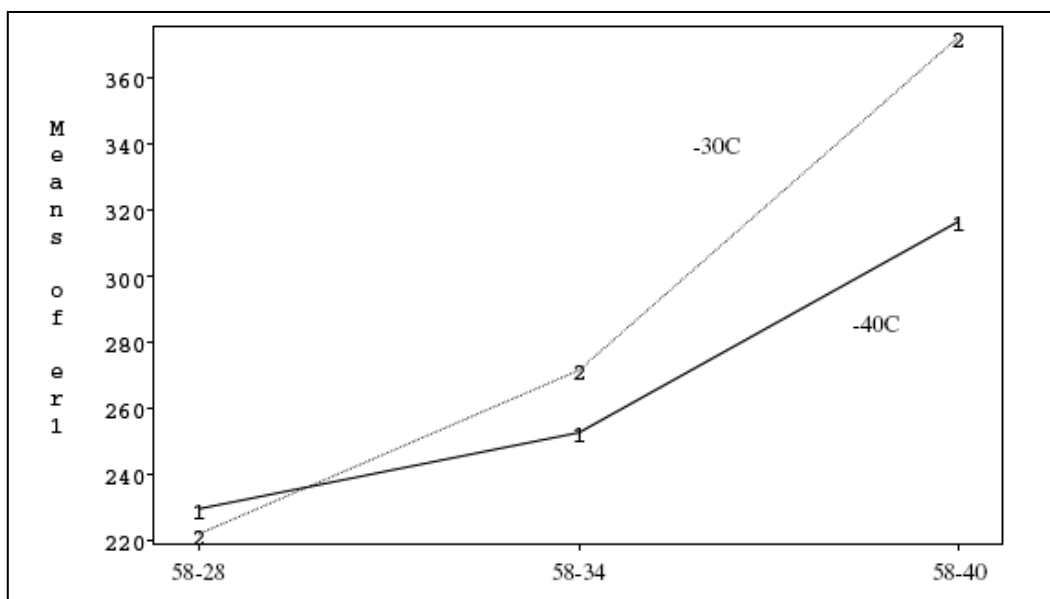
$$W_{tail} = \int_{u_c}^{\infty} P d(u) = \frac{A}{u_c} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

donde  $A$  es el área bajo la curva estimada y  $u_c$  es el valor de desplazamiento de finalización del ensayo.

De los resultados de su trabajo se sacaron las siguientes conclusiones en relación con la tenacidad:

La energía de fractura disminuye a medida que baja la temperatura como se observa en la figura 3.16. Esta disminución resultaba menos obvia en la mezcla PG58-28<sup>(1)</sup> y más significativa para la mezcla PG58-40. Este efecto se puede justificar, ya que al disminuir la temperatura del ensayo y acercarse a su límite inferior, el comportamiento se hace más frágil y se requiere de menos energía para romper la probeta, ya que los mecanismos de disipación de energía de tipo viscosos y plásticos también disminuyen.

Estos resultados indican que a temperaturas inferiores al límite inferior PG, se produce un microagrietamiento significativo de las probetas a consecuencia de la contracción diferencial entre el betún y el conjunto de la mezcla.



**Figura 3.16-** Variación de la tenacidad en función del tipo de betún y la temperatura [23]

- Estudio realizado por Wagoner, Buttlar y Paulino [19], profesores del Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental de la Universidad de Illinois.

<sup>(1)</sup> La nomenclatura *PG X-Y* muestra el grado asfáltico del betún, la *X* indica la temperatura máxima que es capaz de resistir el betún durante 7 días seguidos al año y la *Y* indica la temperatura mínima que puede resistir una vez al año. La *X* y la *Y* son respectivamente el límite superior e inferior del betún

En su estudio se ensayó un mismo tipo de mezcla a diferentes temperaturas y velocidades de carga. La energía de la fractura se calculó como el área bajo la curva carga vs desplazamiento entre el área de la superficie fracturada. Este área corresponde a la longitud inicial del ligamento por encima de la muesca, por el espesor de la probeta.

Las conclusiones del estudio fueron las siguientes:

- Debido a la reología de las mezclas bituminosas, la energía de la fractura aumenta con el aumento de temperatura o con la disminución de velocidad de carga, sugiriendo que el material experimenta una transición de frágil a dúctil.
  - El espesor de la probeta influye en la energía de fractura.
  - La determinación experimental de la tenacidad para mezclas bituminosas a bajas temperaturas cuando el material es relativamente rígido se considera aceptable, pero a temperaturas superiores se debe seguir investigando, ya que el desarrollo de la fisura afecta a una zona mucho más amplia de material y no se puede considerar como un material elástico.
3. Estudios realizados por Dr. Félix Pérez Jiménez, profesor de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Hay diversos estudios en los que se determina el valor de la tenacidad a partir del ensayo BTB en modo estático. En este modo de ensayo se aplica un desplazamiento controlado a una velocidad fija, manteniendo la temperatura constante, hasta llegar a la rotura total de la probeta. Se mide la carga y el desplazamiento en la dirección de aplicación de la carga.

A partir de estos valores de carga vs desplazamiento se obtiene la tenacidad, como se indica en el artículo [26]:

$$G_f = \frac{\int_0^{\Delta_{\text{máx}}} P(\Delta) \cdot d\Delta}{H \cdot D} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

donde:

- $G_f$ , es la energía específica de fractura (Kgf-mm/cm<sup>2</sup>)
- $P(\Delta)$ , es la carga en función del desplazamiento (Kgf)
- $d\Delta$ , es la delta desplazamiento aplicado a la probeta de ensayo (mm)
- $H$ , es la altura total del área resistente de la probeta (cm)
- $D$ , es el diámetro total de la probeta (cm)