



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Evaluación de las propiedades
aportadas por los betunes en la
fabricación de mezclas
bituminosas, mediante la
aplicación del ensayo Fénix**

Treball realitzat per:

EVA RÓDENAS CAVIEDES

Dirigit per:

JOSÉ RODRIGO MIRÓ RECASENS

Grau en:

Ingeniería Civil

Barcelona, **septiembre 2016**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU



AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Rodrigo Miró Recasens por ser mi tutor y guiarme durante el desarrollo de este Trabajo de Final de Grado.

Mencionar a José Amorós y Jordi Martín por toda la ayuda prestada durante la fase experimental para la fabricación de las probetas y desarrollo de los ensayos en el Laboratorio de Caminos.



RESUMEN

Las carreteras suponen una gran inversión, de ahí la importancia de una adecuada caracterización de los materiales para conseguir una mayor durabilidad y un menor coste de mantenimiento. Los factores principales que causan el deterioro de las capas de rodadura son el tráfico y las condiciones climatológicas.

La fisuración del pavimento es una de las principales preocupaciones de los investigadores, puesto que es uno de los fallos más comunes en las carreteras. Comienza por una microfisura en la capa de rodadura que puede causar graves daños en el pavimento y desencadenar en riesgos para la seguridad a los usuarios.

El presente trabajo forma parte de una línea de investigación sobre la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas desarrollada por el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. En el laboratorio se ha desarrollado un ensayo a tracción directa, denominado ensayo Fénix, que permite evaluar esta resistencia de manera rápida, económica y sencilla.

El objetivo de este trabajo de final de grado es evaluar la influencia del tipo de betún a diferentes temperaturas en la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas. Se han elaborado probetas con una mezcla patrón de granulometría específica, sin filler ni árido fino, para aislar el efecto de los 3 tipos de betún utilizados (duro, medio y blando) y se ha ensayado para un amplio rango de temperaturas, de -15 a 30°C.

A partir de las curvas carga-desplazamiento obtenidas del ensayo para cada probeta, pueden obtenerse una serie de parámetros que permiten analizar la respuesta de la mezcla frente a la fisuración.



ABSTRACT

Roads represent great investments; hence the importance of a proper characterization of materials to obtain a better durability and lower maintenance costs. The main factors that cause deterioration of the surface layers are traffic and weather conditions.

The pavement cracking is one of the principal worries of researchers, since it is one of the most common failures in roads. It begins with a microcrack in the surface layer which can cause serious damages on the pavement and risk for users.

The present work is part of an investigation line in the cracking resistance of asphalts mixtures developed by the Civil laboratory from the Civil and Environmental Engineering Department. A direct tension test – the so called Fenix test – has been developed in the laboratory in order to measure the resistance in a quick, economical and easy way.

The aim of this memory is to evaluate the influence of the type of bitumen at different temperatures in the cracking resistance of the bituminous mixtures. Specimens were prepared with a special grain size, without filler and fine grains, to isolate the effect of the 3 types of bitumen that were used (hard, medium and soft) and have been tested for a wide range of temperatures, from -15 to 30°C.

From the load-displacement curve obtained from the Fenix test for each specimen, a series of parameters have been obtained to analyze the response of the mixture related to cracking.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.2. INDIRECT TENSILE TESTER (IDT)	6
2.2.1. Descripción del ensayo	6
2.2.2. Antecedentes	7
2.3. DISK-SHAPED COMPACT TENSION TEST (DCT)	8
2.3.1. Descripción del ensayo	8
2.3.2. Antecedentes	9
2.4. SEMI-CIRCULAR BENDING TEST (SCB)	20
2.4.1. Descripción del ensayo	20
2.4.2. Antecedentes	21
3. METODOLOGÍA	27
3.1. INTRODUCCIÓN.....	27
3.2. PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS	27
3.2.1. Materiales empleados	28
3.2.1.1. Betún.....	28
3.2.1.2. Áridos.....	28
3.2.2. Fabricación de las probetas	29
3.2.2.1. Preparación de los áridos.....	29
3.2.2.2. Fabricación de las mezclas	30
3.3. ENSAYOS INICIALES	34
3.3.1. Densidad	34
3.3.2. Contenido de huecos.....	36
3.4. ENSAYO FÉNIX.....	36
3.4.1. Introducción	36
3.4.2. Procedimiento.....	37
3.4.2.1. Temperaturas	39
3.4.2.2. Procesamiento de datos	39
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
4.1. INTRODUCCIÓN.....	42



4.2. ANÁLISIS DE LA DENSIDAD Y EL PORCENTAJE DE HUECOS OBTENIDOS	42
4.3. RESULTADOS QUE PROPORCIONA EL ENSAYO FÉNIX	43
4.3.1. Influencia del tipo de betún, a cada temperatura de ensayo	44
4.3.2. Influencia de la temperatura, para cada tipo de betún	48
4.3.3. Análisis de los parámetros que se obtienen del ensayo Fénix para cada temperatura, en función del tipo de betún	51
4.3.4. Análisis de cada parámetro que se obtiene del ensayo Fénix en función de la temperatura y del tipo de betún	54
5. CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS	64
Referencias Bibliográficas	64
Otra bibliografía consultada	66
Normas consultadas	67
Páginas web consultadas:	67

ANEJOS

Anejo 1. Dimensiones de las probetas

Anejo 2. Calculo de las densidades y contenido de huecos de las probetas

Anejo 3. Curvas carga-desplazamiento de las probetas ensayadas con Fénix



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Energía de fractura que se obtiene como resultado del ensayo DCT.....	11
Tabla 2. Composición detalla de cada uno de los 9 tipos de probetas fabricadas	12
Tabla 3. Parámetros del test de fractura para cada mezcla.....	13
Tabla 4. Resultados de la energía de fractura para ambos ensayos (SCB y DCT)	23
Tabla 5. Resultados de la energía de fractura para ambos modificados, según el contenido de RAP y las temperaturas ensayadas	26
Tabla 6. Características de los 3 betunes utilizados (B15/25, B35/50 y B70/100)	28
Tabla 7. Granulometría Mezcla utilizada para la fabricación de probetas.....	29
Tabla 8. Valores de la densidad máxima.....	35
Tabla 9. Temperaturas de ensayo para cada tipo de betún.....	39
Tabla 10. Valores de la densidad media y porcentaje de huecos medios según los 3 tipos de betún.....	42
Tabla 11. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de -15°C y según el tipo de betún	51
Tabla 12. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de -5°C y según el tipo de betún	52
Tabla 13. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de 5°C y según el tipo de betún	52
Tabla 14. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de 10°C y según el tipo de betún	53
Tabla 15. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de 20°C y según el tipo de betún	53
Tabla 16. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de 30°C y según el tipo de betún	54
Tabla 17. Valores medios de la Resistencia a Tracción [kN/mm] para cada betún y temperatura de ensayo	55
Tabla 18. Valores medios del Índice de Rigidez a Tracción [kN/mm] para cada betún y temperatura de ensayo.....	56



Tabla 19. Valores medios de la Energía de Fractura [J/m ²] para cada betún y temperatura de ensayo	57
Tabla 20. Valores medios del Índice de Tenacidad [Ø] para cada betún y temperatura de ensayo	58
Tabla 21. Valores medios del Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico [mm] para cada betún y temperatura de ensayo	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación del ensayo IDT (a) y rotura de la probeta (b) [3].	6
Figura 2. Relación de fisuración por fatiga y energía de fractura [4]	7
Figura 3. Representación de las dimensiones del espécimen según la ASTM para el ensayo DCT [5].....	8
Figura 4. Curva carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo DCT para varios contenidos de RAP a 0°C, para HMA	10
Figura 5. Curva carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo DCT para varios contenidos de RAP a -12°C, para HMA	10
Figura 6. Resultados de la curva carga-desplazamiento del ensayo DCT. Energía de fractura calculada a partir de la curva y mostrada en el gráfico	14
Figura 7. Efecto de las diferentes temperaturas en la energía de fractura, para un 4% de contenido de huecos.....	15
Figura 8. Efecto de las diferentes temperaturas en la energía de fractura, para un 7% de contenido de huecos.....	15
Figura 9. Efecto de la cantidad de RAP en la energía de fractura, para una temperatura PGLT. 16	
Figura 10. Efecto de la cantidad de RAP en la energía de fractura, para una temperatura PGLT+10C	16
Figura 11. Efecto del tipo de modificadores en la energía de fractura a temperatura PGLT.....	17
Figura 12. Efecto del tipo de modificadores en la energía de fractura a temperatura PGLT+10C.....	17
Figura 13. Efecto del contenido de huecos en el desplazamiento de la energía de fractura a una temperatura de ensayo PGLT	18
Figura 14. Efecto del contenido de huecos en el desplazamiento de la energía de fractura a una temperatura de ensayo PGLT+10C	18
Figura 15. Efecto del nivel de envejecimiento en el desplazamiento de la energía de fractura para cada probeta.....	19



Figura 16. Representación del ensayo SCB. Aplicación de la carga y posición de los extensómetros [10].....	20
Figura 17. Curva carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo SCB para varios contenidos de RAP a 0°C, para HMA	22
Figura 18. Curva carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo SCB para varios contenidos de RAP a -12°C, para HMA	22
Figura 19. Curvas carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo SCB para varios contenidos de RAP a 0°C, para HMA y modificado PG58-28	24
Figura 20. Curvas carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo SCB para varios contenidos de RAP a -12°C, para HMA y modificado PG58-28	24
Figura 21. Curvas carga-desplazamiento como resultados de la aplicación del ensayo SCB según el contenido de RAP a 0°C, para HMA y modificados PG58-28 y PG64-22.	25
Figura 22. Curvas carga-desplazamiento como resultados de la aplicación del ensayo SCB según el contenidos de RAP a -12°C, para HMA y modificados PG58-28 y PG64-22.	25
Figura 23. Plancha y objetos utilizados para la fabricación de probetas	30
Figura 24. Mezcla de árido y betún.....	31
Figura 25. Máquina compactadora	32
Figura 26. Probetas compactadas.....	33
Figura 27. Probetas enfriadas y lisas para desmoldar.....	33
Figura 28. Representación del ensayo Fénix	37
Figura 29. Curva carga-desplazamiento obtenida por el ensayo Fénix	39
Figura 30. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas de betún B15/25, a 20°C	43
Figura 31. Curva carga-desplazamiento de 2 semiprobetas representativas de betunes B35/50 y B70/100, a -15°C	44
Figura 32. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas representativas de betunes B15/25, B35/50 y B70/100, a -5°C.....	45
Figura 33. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas representativas de betunes B15/25, B35/50 y B70/100, a 5°C.	45
Figura 34. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas representativas de betunes B15/25, B35/50 y B70/100, a 10°C.	46
Figura 35. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas representativas de betunes B15/25, B35/50 y B70/100, a 20°C.	46
Figura 36. Curva carga-desplazamiento de la semiprobeta representativa de betún B15/25, a 30°C.....	47
Figura 37. Curva carga-desplazamiento de las semiprobetas representativas de betún B15/25, a -5, 5, 10, 20 y 30°C.	48



Figura 38. Curva carga-desplazamiento de las semiprobetas representativas de betún B35/50, a -15, -5, 5, 10 y 20°C49

Figura 39. Curva carga-desplazamiento de las semiprobetas representativas de betún B70/100, a -15, -5, 5, 10 y 20°C50

Figura 40. Representación de los valores medios de la Resistencia a Tracción [kN/mm] para cada betún y temperatura de ensayo.55

Figura 41. Representación de los valores medios del Índice de Rigidez a Tracción [kN/mm] para cada betún y temperatura de ensayo56

Figura 42. Representación de los valores medios de la Energía de Fractura [J/m²] para cada betún y temperatura de ensayo57

Figura 43. Representación de los valores medios del Índice de Tenacidad [Ø] para cada betún y temperatura de ensayo.....58

Figura 44. Representación de los valores medios del Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico [mm] para cada betún y temperatura de ensayo.59



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Podemos definir las infraestructuras como un elemento de contribución para el desarrollo de una sociedad, tanto desde el punto de vista económico como el social. Las infraestructuras han sido de especial ayuda para estructurar los territorios ya que componen redes que los conectan entre sí, uniendo de esta forma distintas regiones.

Las infraestructuras son consideradas como un motor económico puesto que constituyen un sistema que permite el desplazamiento no sólo de personas, sino también de bienes y mercancías. Además, han ayudado a direccionar el crecimiento de cualquier país y su inversión ha creado y sigue creando bienestar social a los habitantes, contribuyendo a la calidad de vida, facilitando la movilidad y aumentando la seguridad. Este trabajo está enfocado en las infraestructuras del transporte terrestre, concretamente en las principales vías que son las carreteras. Si hacemos un breve repaso histórico, en España, no fue hasta el siglo XVIII cuando se logró crear una red de carreteras de ámbito nacional que fue evolucionando hasta lograr la red que tenemos hoy en día. Dos siglos más tarde, a principios del siglo XX, se creó el Plan de Firmas Especiales, para adaptar la red viaria a las nuevas condiciones de transporte, es decir al automóvil. Posteriormente, en los años 60, se llevaron a cabo distintos cambios en las carreteras para su adaptación. Para ello, se decidió ejecutar el Plan REDIA (Plan de mejora de la Red de Itinerarios Asfálticos, 1967-1971), añadiendo nuevas prestaciones como una mejora del pavimento o señalizaciones. Años más tarde, se elaboró el Plan de Infraestructuras, cuyo objetivo fue mejorar las conexiones con Francia y Portugal.

En España, en los últimos veinte años, el transporte por carretera ha experimentado un crecimiento vertiginoso debido al incremento del número de vehículos y de la necesidad de movilidad de la sociedad española. Hecho que



ha conducido a la construcción de un mayor número de vías. Actualmente, según un ranking realizado por la CIA (Central Intelligence Agency), España se posiciona como el undécimo país del mundo con más kilómetros de carretera, aproximadamente 684.000 km. Encabezando este ranking, se encuentra Estados Unidos con 6.587.000 km, siguiéndole países como India y China. Sin embargo, a nivel Europeo, España se sitúa en segunda posición, solamente detrás de Francia con alrededor 1.2029.000 km.

Esto nos lleva a plantearnos la importancia que demanda este tema, ya que España se ha convertido en cuestión de dos décadas, en el segundo país Europeo con mayor producción de mezcla bituminosa.

Actualmente, se está intentando mejorar cada vez más este elemento, que al fin y al cabo, es ente de bienestar social. Es por ello que se ha decidido apostar por una mayor investigación de los pavimentos (especialmente sobre los de larga duración) principalmente por dos razones: la primera para alargar su vida útil y la segunda, para evitar posibles problemas de sobrecoste a los vehículos usuarios o peligros de seguridad. Para ello, se ha decidido profundizar sobre el deterioro inducido en la capa de rodadura.

Durante años se ha propuesto como objetivo analizar los factores que producen este deterioro y se han obtenido diferentes problemas principales. Los más relevantes son: la fisuración por fatiga, las posibles deformaciones, y los desprendimientos.

Se ha determinado que el más importante de ellos es el primero, es decir, la fisuración por fatiga, que está directamente relacionado con las características de la mezcla bituminosa y por consiguiente, por el tipo de betún y áridos utilizados.

La fisuración de las mezclas bituminosas es el factor que define fundamentalmente la durabilidad del firme asfáltico. Este tipo de deterioro se inicia por la aparición de una microfisura en la capa de rodadura que con el



paso de tráfico de vehículos, debido a la generación de tensiones, puede hacerse mayor o por la generación de tensiones térmicas. Además, en el caso de lluvias, el agua puede acceder por la fisura e infiltrarse llegando a capas inferiores, debilitando así el pavimento, actuación que podría tener graves consecuencias para el usuario pudiendo llegar a producirse el hundimiento de la vía. Por tanto, se debe proporcionar una capa de rodadura segura, pero siempre buscando un equilibrio para que sea confortable y estética.

En España, se han ido desarrollado diferentes líneas de investigación entorno a diversas propiedades de las mezclas asfálticas, como, a título meramente enunciativo: el porcentaje de huecos para determinar el valor óptimo, su resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo para determinar la adhesividad árido-ligante, la relación de la rodadura de los vehículos con la deformación plástica o del módulo elástico con la deformación. Sin embargo, la resistencia a la fisuración sigue siendo un tema muy poco evaluado, pero que con el tiempo tomará una gran relevancia ya que cada vez más, se apuesta por mejorar la vida útil de nuestras carreteras para lograr un mayor ahorro económico y una buena calidad.

De esta necesidad nace este trabajo de final de grado, cuyo **objetivo** es evaluar la influencia que tiene el tipo betún, a diferentes temperaturas, en la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas.

Para evaluar la resistencia a la fisuración, se ha utilizado un ensayo específico, el ensayo Fénix, desarrollado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.

El ensayo Fénix es un ensayo sencillo, económico y fácil de ejecutar que consiste en someter una probeta semicilíndrica a una carga a tracción directa, con una velocidad de deformación constante de 1mm/min. Esta velocidad, puede ser mayor o menor, pero para que no influya en este trabajo, se ha mantenido constante en todos los ensayos. La respuesta frente a la fisuración se determina a partir de la energía disipada en el proceso de fractura. Además,



mediante este ensayo se obtienen parámetros característicos del proceso de fisuración como la Resistencia a Tracción (RT), el Índice de Rigidez a Tracción (IRT), la Energía de fractura (G_D), el Índice de Tenacidad (I_T) y el desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico ($d_{0,5PM}$) que posteriormente serán analizados.

Con anterioridad, en el Laboratorio de Caminos se había desarrollado otro procedimiento de ensayo, el método UCL (Método Universal de Caracterización de Ligantes), que permite caracterizar los ligantes en función de su poder aglomerante, susceptibilidad térmica, adhesividad y durabilidad. El método consiste en ensayar al cántabro probetas fabricadas a partir de una mezcla patrón, sin contenido de filler ni árido fino, por tanto, solamente áridos gruesos (como soporte) y betún. Ya que en estas condiciones se permite aislar los efectos del betún, se decide utilizar esta granulometría en este estudio [1]. Pero en lugar de evaluar la cohesión árido-ligante a partir del ensayo cántabro, se utilizará el ensayo Fénix para evaluar la resistencia a la fisuración.

Como lo que interesa es analizar cómo afecta el tipo de betún en los resultados y no la cantidad, se han utilizado 3 tipos de betunes con diferente penetración (duro, medio, blando), manteniendo constante el porcentaje en peso sobre mezcla para todas las probetas.

En cuanto a las temperaturas, se ha utilizado un amplio rango que corresponde a las que se tienen generalmente en España, entre -15°C y 30°C .

Para el desarrollo de este trabajo, se han fabricado un total de 27 probetas cilíndricas por el procedimiento Marshall, que posteriormente han sido divididas en dos partes para poder realizar un total de 54 ensayos Fénix.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se ha procedido a la descripción de 3 ensayos, cuyo fin es medir la resistencia a la fisuración. Sin embargo, estos tipos de ensayo presentan desventajas respecto al ensayo Fénix [2].

El primer ensayo que se presenta es el “Indirect Tensile Tester” (IDT), es un método simple y representativo para obtener la carga máxima que resiste una mezcla bituminosa, imitando la respuesta de un pavimento flexible. Sin embargo, el estado de tensión es no uniforme y la fuerza depende de la forma del espécimen. A altas temperaturas de carga, se presentan cambios en la forma de la probeta que afecta en el estado de esfuerzos. Además, sobreestima el valor de la deformación permanente.

El segundo ensayo es el “Disk-shaped Compact Tension Test” (DCT). Este ensayo tiene un inconveniente principal, cuando se fabrican las probetas se pueden generar microfisuras en los alrededores de los orificios donde se aplica la carga. Además, es muy difícil de ejecutar a temperaturas superiores a los 10°C.

El tercer ensayo es el “Semi-circular Bending Test” (SCB). Su principal desventaja es que debido a la forma de aplicación de la carga, se produce un complejo estado tensional que afecta en el proceso de propagación de la fisura, generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión en la localidad cercana a la fisura (Wagoner et al, 2005).



2.2. INDIRECT TENSILE TESTER (IDT)

2.2.1. Descripción del ensayo

El ensayo de tensión indirecta es un ensayo normalizado, se puede encontrar su descripción en la norma UNE-EN 12697-23 y permite la caracterización de las mezclas bituminosas en caliente.

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia de una probeta cilíndrica mediante la aplicación de una tracción indirecta. Esta tracción se crea mediante una compresión diametral con placas, que se aplica en una banda ancha estrecha en toda su longitud de manera ortogonal hasta que la probeta rompe (Fig. 1).

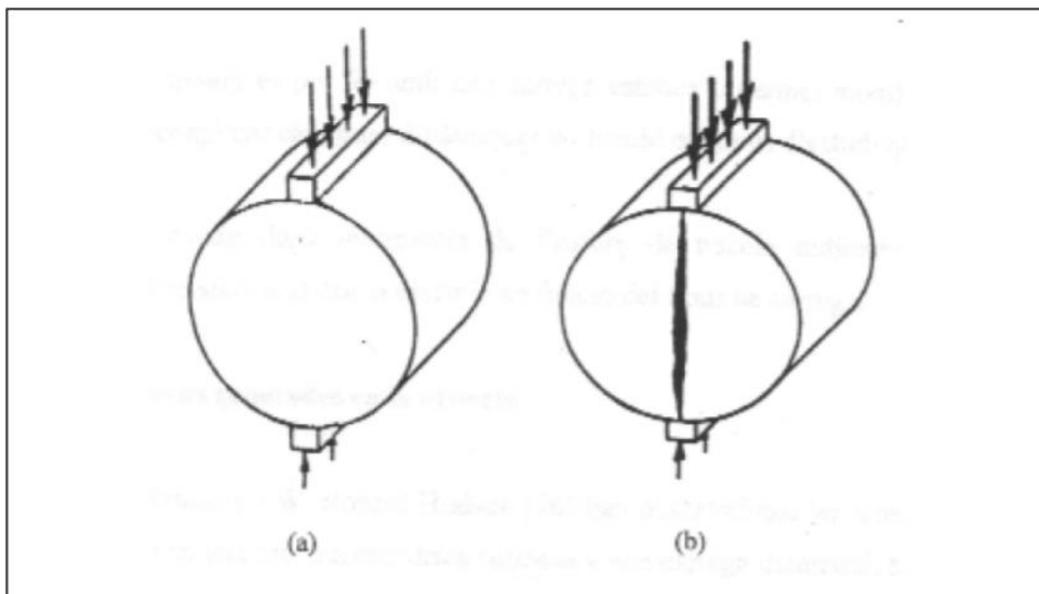


Figura 1. Representación del ensayo IDT (a) y rotura de la probeta (b) [3].

Fuente: Kennedy, 1977

Aunque se suelen utilizar probetas cilíndricas, también se puede efectuar con probetas prismáticas o cúbicas aplicando unos factores de corrección en los resultados, que facilita la norma.



2.2.2. Antecedentes

Debido a que es un ensayo sencillo de aplicar, se ha empleado para diferentes estudios relacionados con el comportamiento de las mezclas asfálticas.

En el año 2002 en Washington, Richard Kim y Haifang Wen [4] presentaron un estudio sobre la energía de fractura a partir del IDT, para evaluar el fenómeno de la fisuración por fatiga. La energía de fractura se calculó a partir de la tensión en el centro de la muestra y se realizaron los correspondientes ensayos a una temperatura de 20°C. Se obtuvieron unos resultados muy buenos (Fig.2).

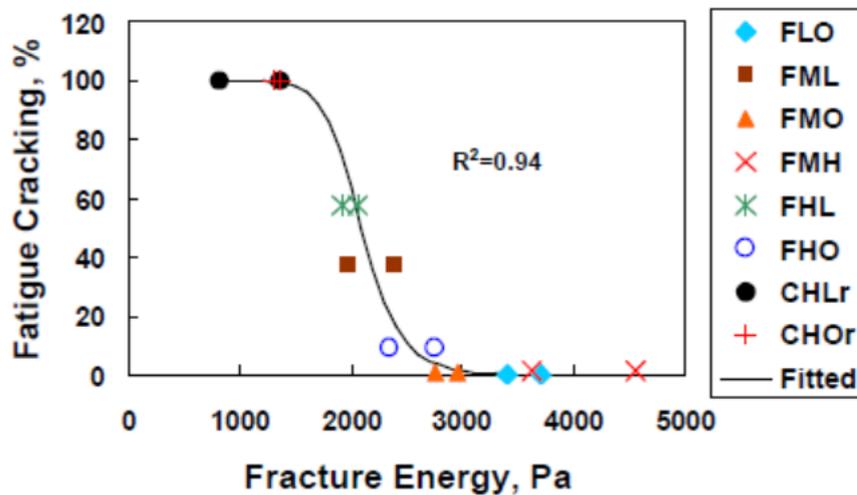


Figura 2. Relación de fisuración por fatiga y energía de fractura [4]

Fuente: Kim et al., 2002



2.3. DISK-SHAPED COMPACT TENSION TEST (DCT)

2.3.1. Descripción del ensayo

El ensayo DCT fue desarrollado en EEUU, por Wagoner en la Universidad de Illinois. Consiste en medir la energía de fractura mediante la aplicación de una tracción directa sobre una probeta con forma de disco circular con una hendidura y dos agujeros circulares (Fig. 3). En cada agujero del espécimen se aplican las fuerzas de tracción.

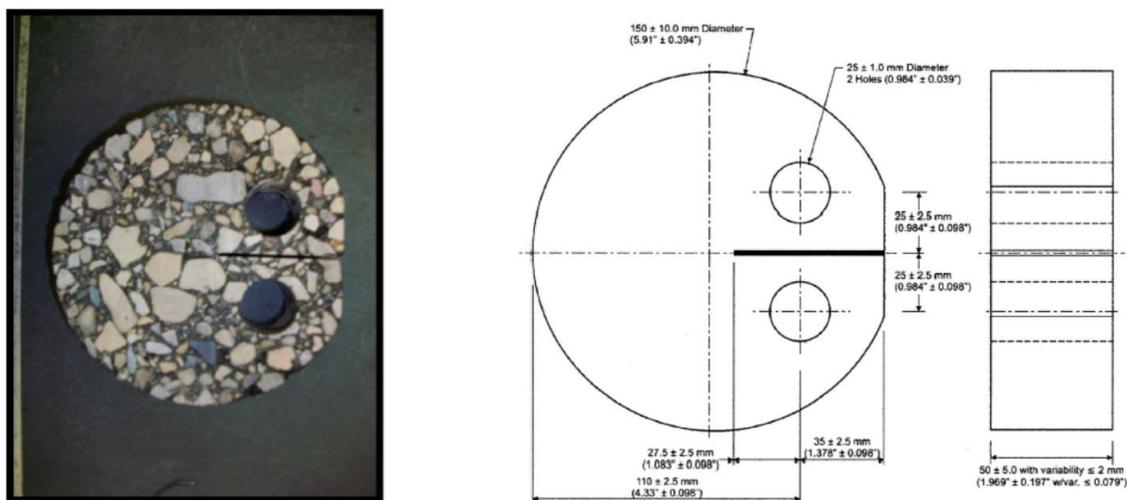


Figura 3. Representación de las dimensiones del espécimen según la ASTM para el ensayo DCT [5].

Fuente: Andrew et al., 2011

El DCT es un ensayo estandarizado que se encuentra en la norma ASTM D7313-07, en la que se indican los parámetros de procedimiento como la velocidad de desplazamiento de 0,017mm/S y la temperatura de ejecución (inferior a 10°C).



2.3.2. Antecedentes

Durante los últimos años se ha realizado una amplia investigación sobre el uso de asfalto reciclado en las carreteras y en relación al ensayo DCT.

Uno de estos estudios se llevó a cabo en el año 2009, por Hasan Ozer, Imad L. Al-Qadi, Samuel H. Carpenter, Qazi Aurangzeb, Geoffrey L. Roberts y James Trepanier [6] pertenecientes a al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Illinois. El objetivo era evaluar el impacto de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) en el diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA, "Hot Mixt Asphalt").

Este estudio investigó el comportamiento del pavimento asfáltico reciclado (RAP) mediante un programa experimental que pretendía medir la energía de fractura. Esta energía se calculó a partir del área que comprende la curva carga-desplazamiento que se obtuvo al aplicar el ensayo DCT. Debido a que se pretendía evaluar la influencia de la cantidad de RAP y cómo se comportaba a diferentes temperaturas, se fabricaron las probetas con 3 porcentajes diferentes de material de RAP (0, 20 y 40%), dos para cada cantidad y se realizaron los ensayos a 0 y -12°C.

A continuación se muestran las curvas carga-desplazamiento que se obtuvieron mediante el ensayo DCT y por consiguiente, los valores de la energía de fractura según los diferentes contenidos de RAP y las dos temperaturas de ensayo (Fig. 4, 5 y Tabla 1)

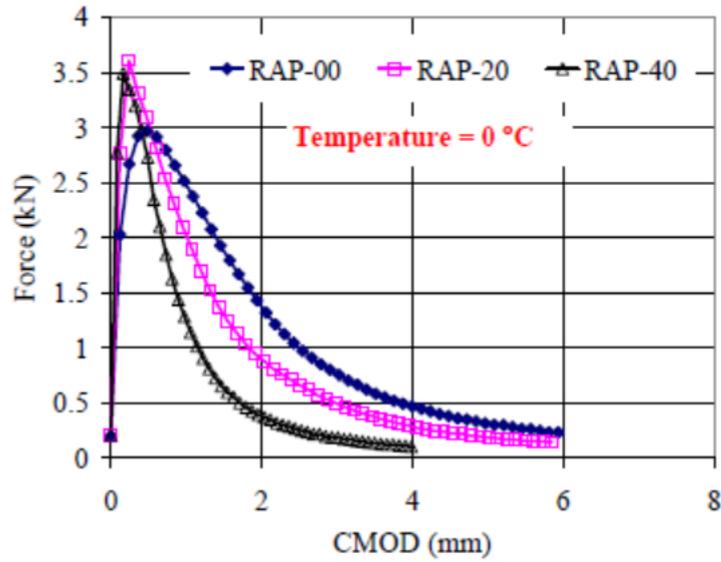


Figura 4. Curva carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo DCT para varios contenidos de RAP a 0°C, para HMA

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009

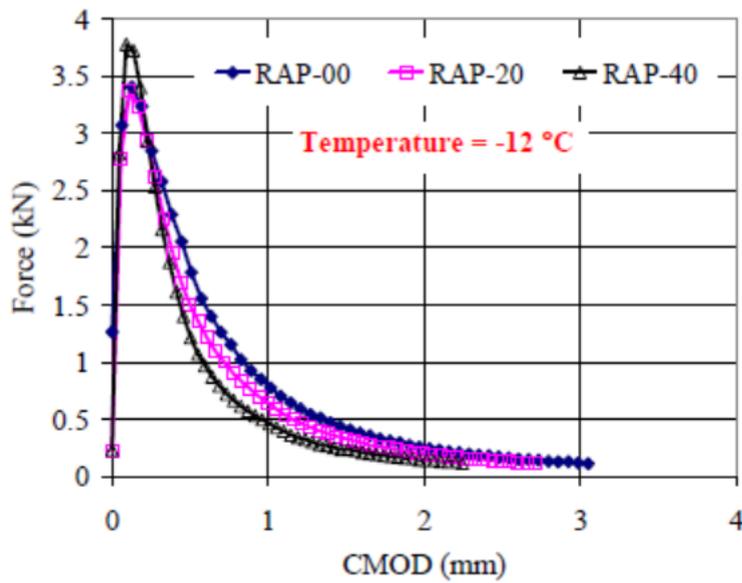


Figura 5. Curva carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo DCT para varios contenidos de RAP a -12°C, para HMA

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009



Temperature (°C)	RAP Content (%)	DCT Average Fracture Energy (J/m ²)
0	0	1639
	20	1332
	40	843
-12	0	597
	20	532
	40	438

Tabla 1. Energía de fractura que se obtiene como resultado del ensayo DCT

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009

La conclusión que se obtuvo de estos resultados era que a medida que el contenido de RAP aumentaba, los especímenes exhibían un comportamiento más frágil, ya que presentaban un área menor bajo la curva carga-desplazamiento.

En cuanto a la energía de fractura, esta disminuía de manera considerable cuando el porcentaje de RAP aumentaba y este efecto era muy pronunciado sobre todo para las HMA con 40% de contenido de RAP.

Sin embargo, debido a que solamente se habían ensayado dos probetas para cada contenido de RAP y temperatura, se concluyó que era necesaria la fabricación de un mayor número de probetas para asegurar los resultados obtenidos.

En los últimos años, aparte de investigar la influencia de RAP, también se han realizado estudios utilizando RAP y modificadores a la vez, para evaluar la influencia en el comportamiento de las mezclas asfálticas

El siguiente estudio, fue realizado por Eshan V. Dave, Behzad Behnia, Sarfraz Ahmed, William G. Butlar y Henrique Reis [7], profesores de la Universidad de Minnesota e Illinois, en el año 2011. Describe la caracterización de fractura por



baja temperatura de 9 tipos de mezclas. La energía de fractura se determinó utilizando el DCT. El diseño experimental incluyó pruebas con diferentes porcentajes de contenidos de huecos, dos temperaturas y dos niveles de envejecimiento (Tablas 2 y 3), además del uso de RAP y modificadores.

Section	Virgin Binder Grade	Binder Modification	RAP Content
20	PG58-28	Unknown	30%
21	PG58-28		30%
22	PG58-34		30%
33	PG58-34	PPA	0%
34	PG58-34	PPA + SBS	
35	PG58-34	SBS	
77	PG58-34	PPA + Elvaloy®	
NY	PG64-22	Unmodified	
WI	PG58-34	Unknown	

Tabla 2. Composición detalla de cada uno de los 9 tipos de probetas fabricadas

Fuente: Eshan et al., 2011

Varios años antes de realizar este trabajo, se había establecido que a baja temperatura las mezclas asfálticas se comportaban de una manera cuasi-frágil y para la completa evaluación del comportamiento de fisuración en la mezcla de asfalto, se debía tener en cuenta la respuesta de la mezcla más allá de la fuerza máxima. En este trabajo se decidió estudiar un total de 9 mezclas con diferentes tipos de modificadores (“Binder”).

De estas 9 probetas, 6 de ellas fueron fabricadas con material de Minnesota y las otras 2 con material de secciones de pavimento de Wisconsin y Nueva York. De las 6 primeras, 3 de ellas se fabricaron con un 30 % de contenido de RAP y el resto sin RAP.

En cuanto a las temperaturas de ensayo, se utilizaron 2 (0 y 10°C). Además de 2 niveles de porcentaje de huecos (4 y 7%) y 2 niveles de envejecimiento (a largo y corto término) (Tabla 3).



Testing Temperature	Air Void Levels	Aging Level
PGLT	4% and 7%	Short-Term
PGLT+10C	4% and 7%	
PGLT	7%	Long-Term

PGLT = Superpave Low Temperature Performance Grade of Virgin Binder

Tabla 3. Parámetros del test de fractura para cada mezcla

Fuente: Eshan et al., 2011

Para determinar la energía de fractura de las mezclas se utilizó el ensayo DCT, siguiendo el procedimiento de ensayo ASTM D7313-07. La prueba se controló para obtener una velocidad constante de desplazamiento de la hendidura de 0,0167mm/s (o 1mm/min). Song et al. [8] propuso el uso de medidores en la cara lateral de los especímenes para medir el desplazamiento de la apertura en un lapso de 25mm. En los resultados, se hizo referencia a esta medida como δ_{25} desplazamiento y se previó que iba a estar más cerca la energía de la fractura local. En este estudio, tanto el desplazamiento normal (CMOD) como el δ_{25} (desplazamiento a 25mm de apertura), para 0 y 10°C, fueron registrados y evaluadas sus respectivas energías de fractura (Fig. 6).

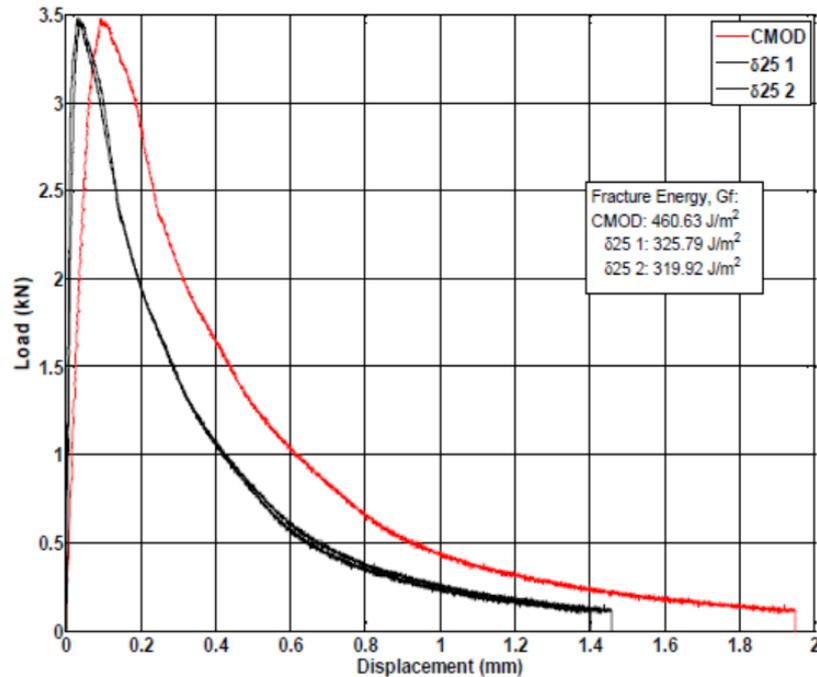


Figura 6. Resultados de la curva carga-desplazamiento del ensayo DCT. Energía de fractura calculada a partir de la curva y mostrada en el gráfico

Fuente: Eshan et al., 2011

Para comprobar la calidad de los resultados se analizaron más en profundidad estos valores y se realizó un estudio estadísticos que tuvo como resultado unos buenos coeficientes de variación, menores al 20%.

Posteriormente, se decidió avanzar este análisis y estudiar en profundidad los diversos parámetros que podían tener influencia sobre la energía de fractura:.

- El efecto de las 2 temperaturas para cada porcentaje de contenido de huecos (Fig. 7 y 8)
- El efecto de RAP (Fig. 9 y 10)
- La influencia que tenía el uso de modificadores en la mezcla (Fig. 11 y 12)
- El contenido de huecos (Fig. 13 y 14)
- El nivel de envejecimiento (Fig. 15)

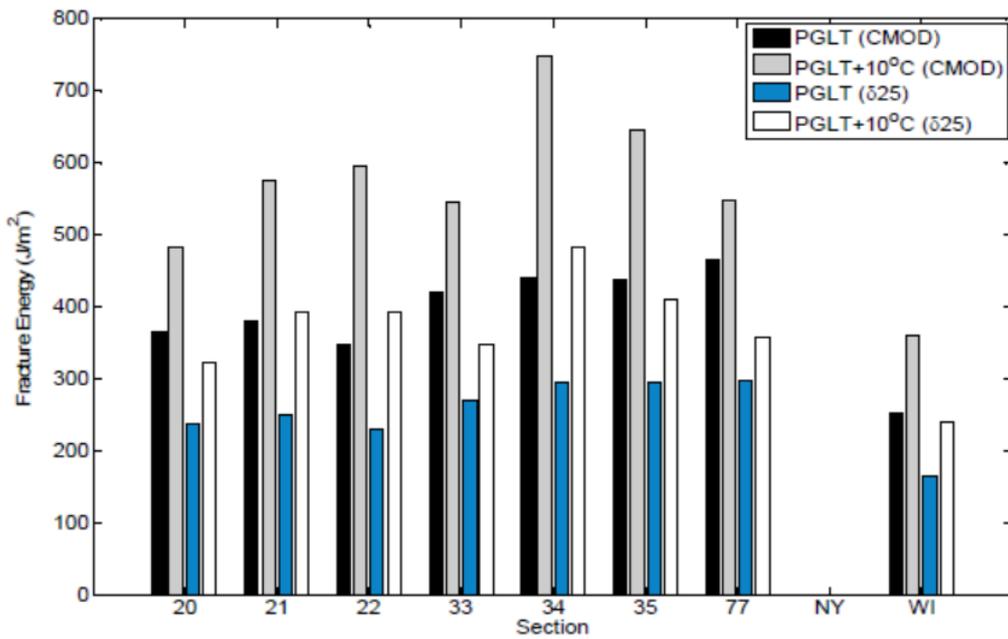


Figura 7. Efecto de las diferentes temperaturas en la energía de fractura, para un 4% de contenido de huecos

Fuente: Eshan et al., 2011

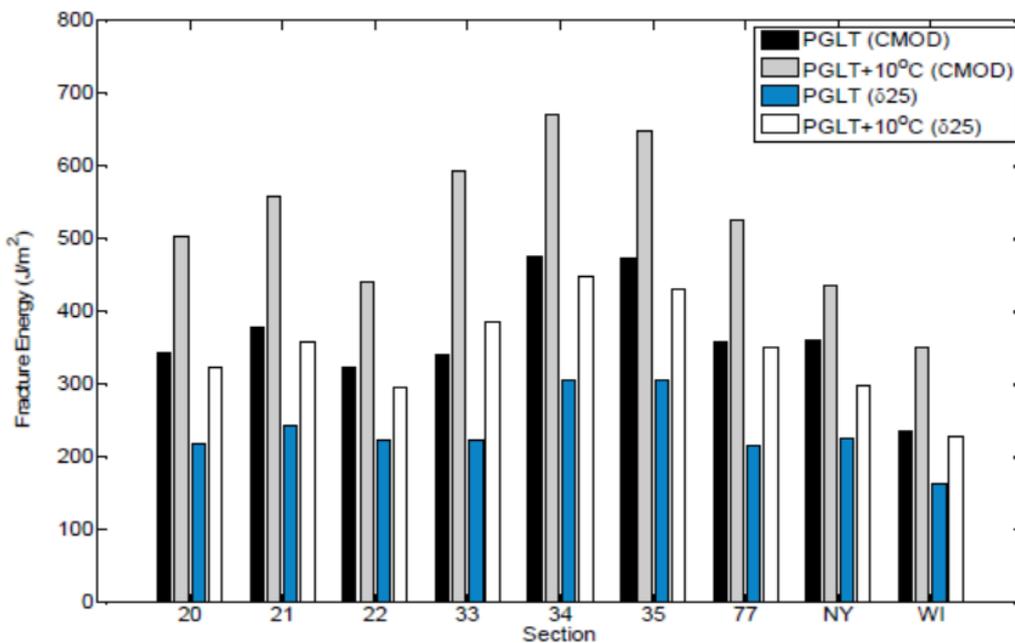


Figura 8. Efecto de las diferentes temperaturas en la energía de fractura, para un 7% de contenido de huecos

Fuente: Eshan et al., 2011

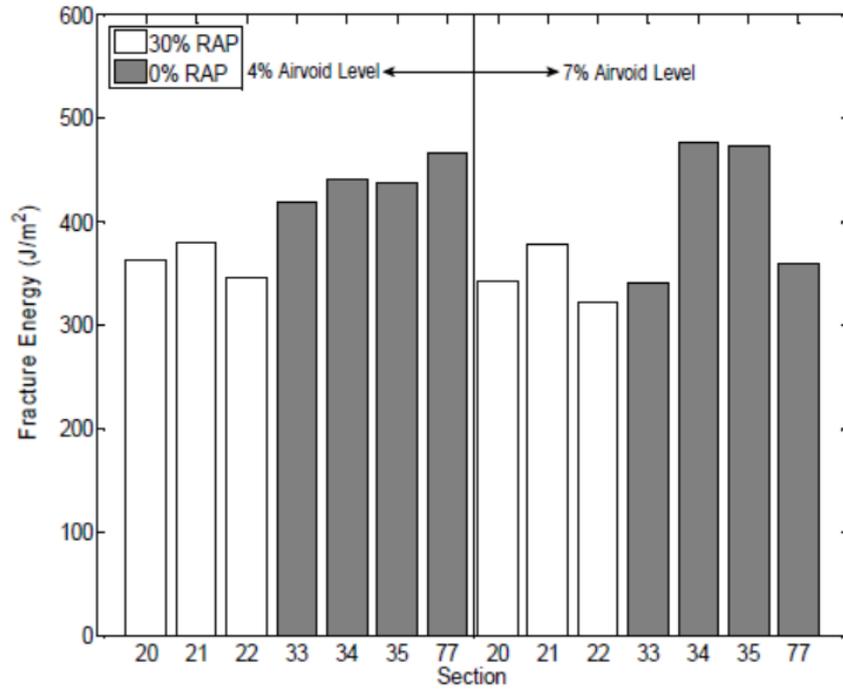


Figura 9. Efecto de la cantidad de RAP en la energía de fractura, para una temperatura PGLT

Fuente: Eshan et al., 2011

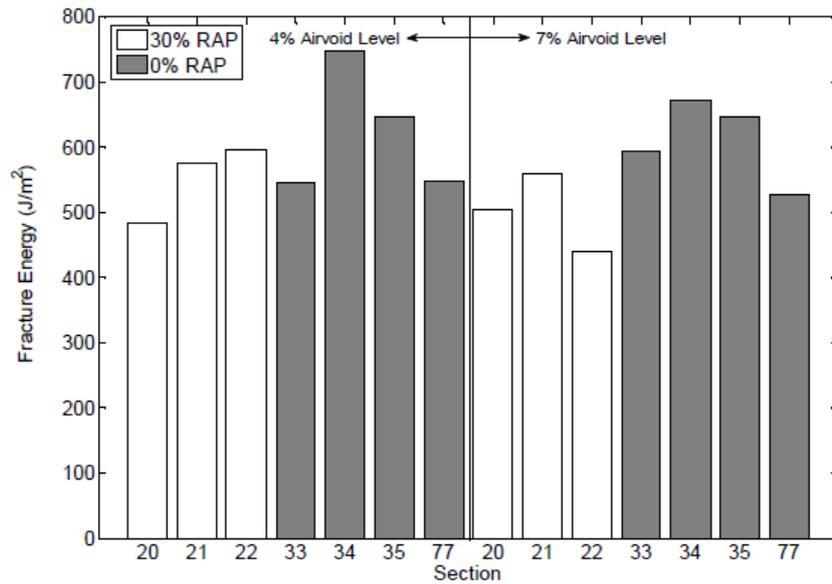


Figura 10. Efecto de la cantidad de RAP en la energía de fractura, para una temperatura PGLT+10C

Fuente: Eshan et al., 2011

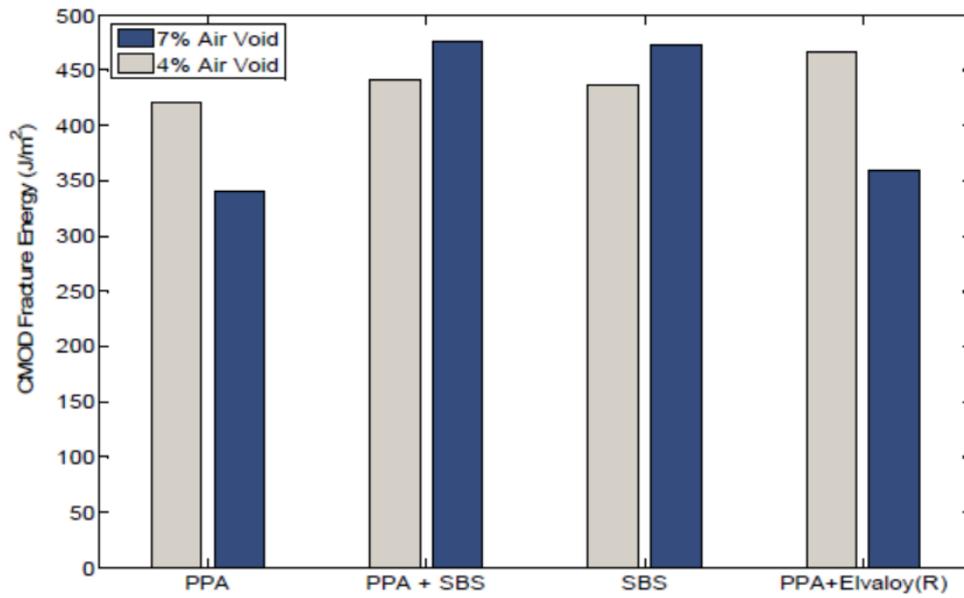


Figura 11. Efecto del tipo de modificadores en la energía de fractura a temperatura PGLT

Fuente: Eshan et al., 2011

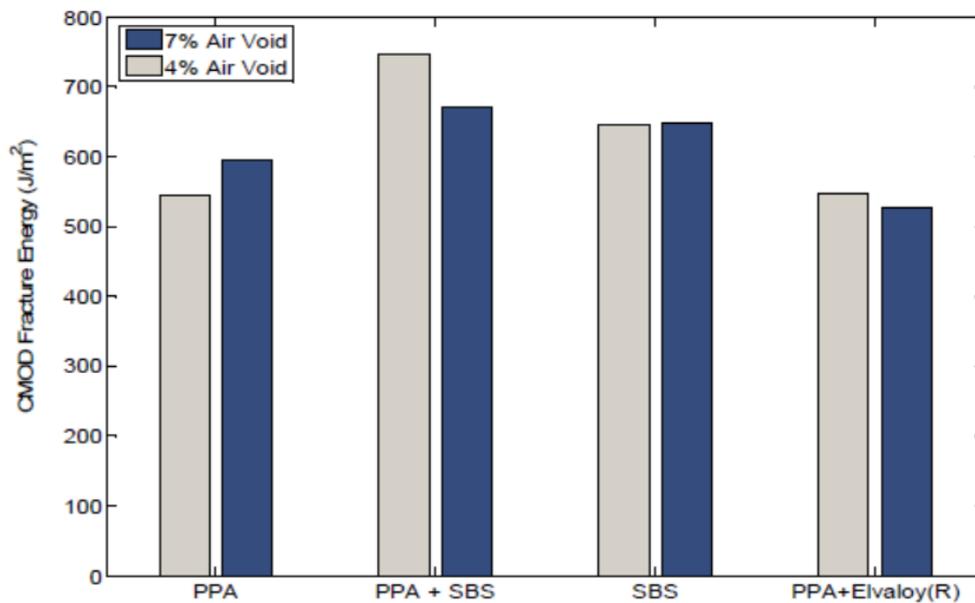


Figura 12. Efecto del tipo de modificadores en la energía de fractura a temperatura PGLT+10C

Fuente: Eshan et al., 2011

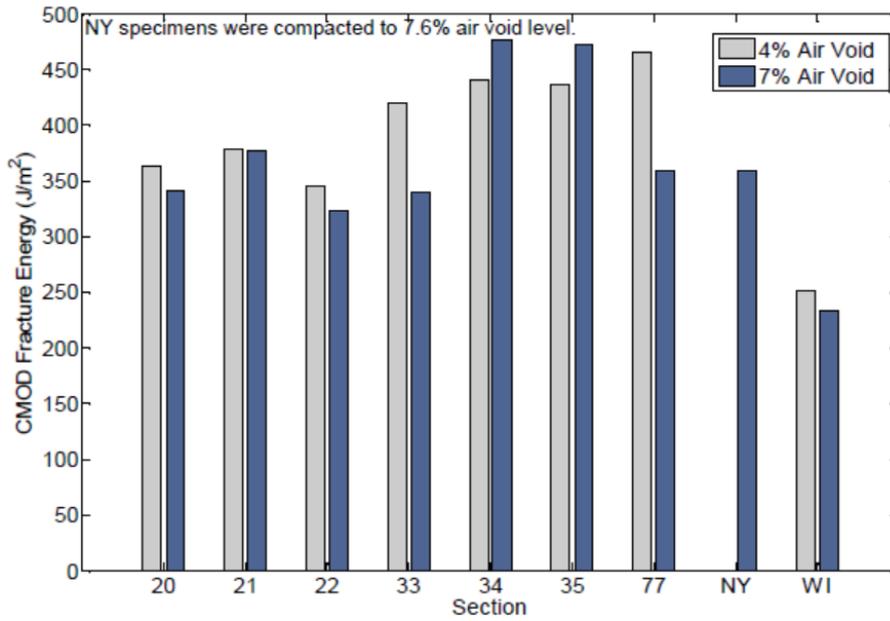


Figura 13. Efecto del contenido de huecos en el desplazamiento de la energía de fractura a una temperatura de ensayo PGLT

Fuente: Eshan et al., 2011

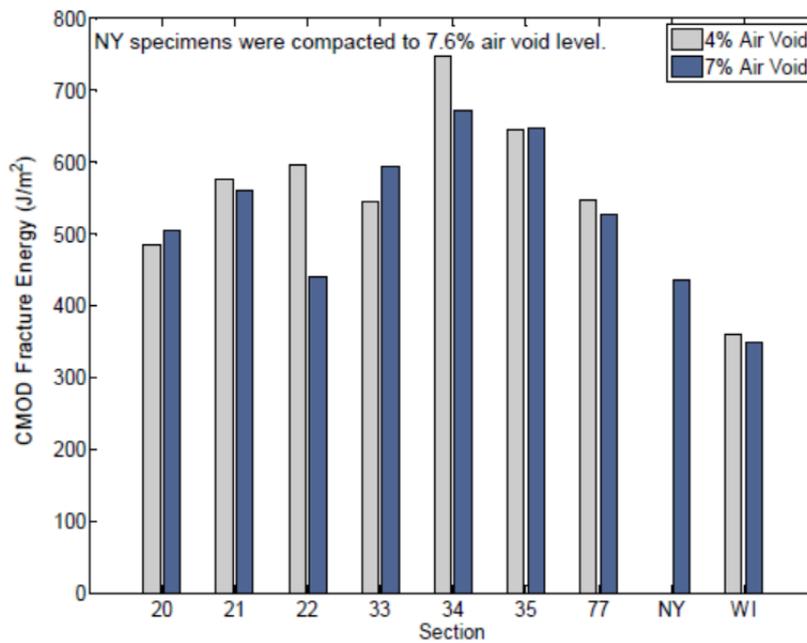


Figura 14. Efecto del contenido de huecos en el desplazamiento de la energía de fractura a una temperatura de ensayo PGLT+10C

Fuente: Eshan et al., 2011

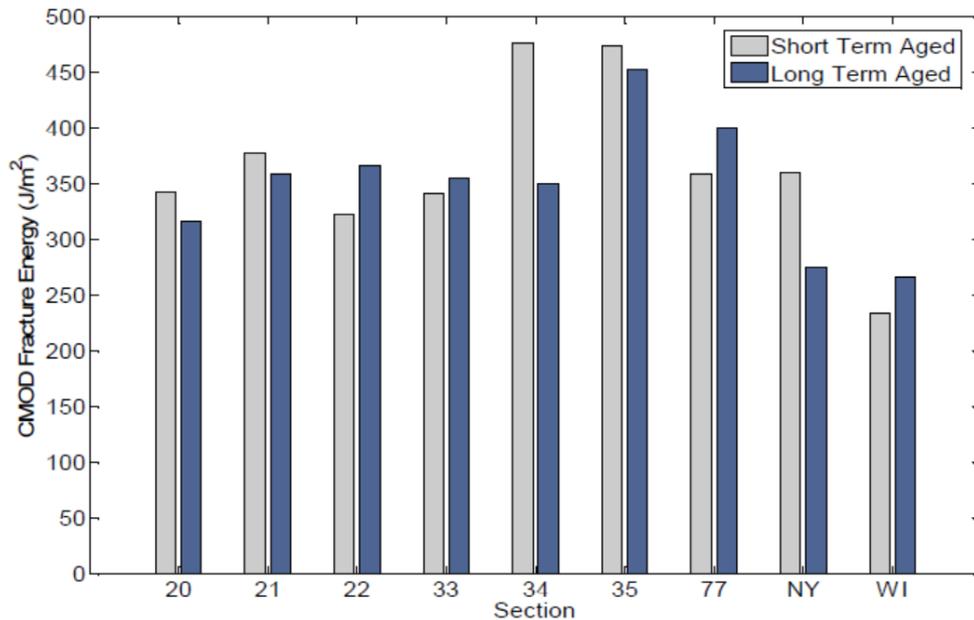


Figura 15. Efecto del nivel de envejecimiento en el desplazamiento de la energía de fractura para cada probeta.

Fuente: Eshan et al., 2011

Como conclusiones más importantes de los resultados, se obtuvo:

- La temperatura tenía un efecto significativo sobre la resistencia a la fractura de los materiales asfálticos y a medida que se aumentaba la temperatura de ensayo, la energía de fractura aumentaba sustancialmente. Este grado de aumento de la energía de fractura, parecía ser dependiente del tipo de mezcla (ligante, contenido de huecos, etc.).
- Los efectos de los diferentes tipos de modificadores parecían ser sensibles al nivel de temperatura de ensayo y al porcentaje de huecos de las mezclas, pero mínimos para el 4% de huecos y temperatura PGLT.
- En cuanto al envejecimiento, los resultados fueron bastante intrigantes puesto que para algunas mezclas con el envejecimiento a largo plazo, la energía de fractura aumentaba mientras que para otras, la energía disminuía con el aumento de la edad.



- El efecto de la presencia de RAP quedó como no concluyente en este estudio respecto la influencia que tenía en la energía de fractura, debido a que la cantidad de probetas fabricadas no era suficiente para determinar un comportamiento exacto.

2.4. SEMI-CIRCULAR BENDING TEST (SCB)

2.4.1. Descripción del ensayo

El SCB es un ensayo desarrollado en la Universidad de Delft por Wagoner [9]. Para este ensayo se utilizan probetas de geometría semicircular (Fig. 16), de manera que de cada probeta circular fabricada se pueden extraer dos muestras. A cada muestra se le induce una pequeña fisura en el centro del diámetro. Para este ensayo, la muestra se coloca biapoyada y se le aplica una carga vertical en el centro de la parte superior a una velocidad constante induciendo a una flexión sobre la muestra (Fig. 16). A partir de este ensayo se obtiene la curva carga-desplazamiento y por consiguiente, se consigue evaluar la energía de fractura de las mezclas asfálticas.

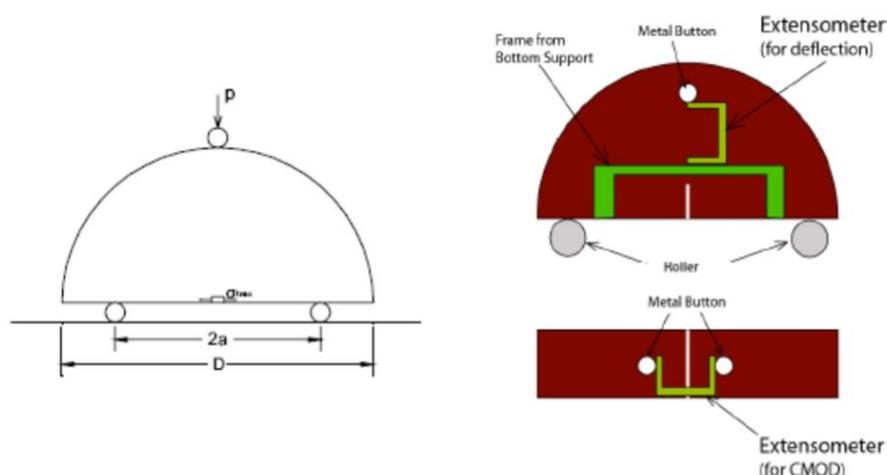


Figura 16. Representación del ensayo SCB. Aplicación de la carga y posición de los extensómetros [10]

Fuente: Brian K. Egan et al., 2004



Sin embargo, este tipo de ensayo presenta ciertas desventajas según Wagoner et al (2005) [9], ya que en la zona donde se aplica la carga vertical, se produce un estado tensional que puede afectar al proceso de propagación de la fisura.

Además, otra desventaja presentada es que la rotura de la probeta se lleva a cabo de una manera muy brusca y no permite evaluar bien el comportamiento de la propagación de la fisura, salvo en las mezclas que son muy flexibles y ensayadas a altas temperaturas.

2.4.2. Antecedentes

En la literatura, durante los últimos años se ha utilizado este ensayo para determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas. A continuación, se presentan algunos de los trabajos encontrados en relación a su uso.

Uno de estos estudios se llevó a cabo en el año 2009, por Hasan Ozer, Imad L. Al-Qadi, Samuel H. Carpenter, Qazi Aurangzeb, Geoffrey L. Roberts y James Trepanier [6] pertenecientes a al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Illinois, para evaluar el impacto de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) en el diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA, "Hot Mixt Asphalt") y el uso de modificadores.

Este proyecto se realizó de manera paralela a la investigación explicada anteriormente con el ensayo DCT, con el fin de poder comparar los resultados de ambos métodos y se obtuvieron las siguientes curvas carga-desplazamiento (Fig. 17 y 18).

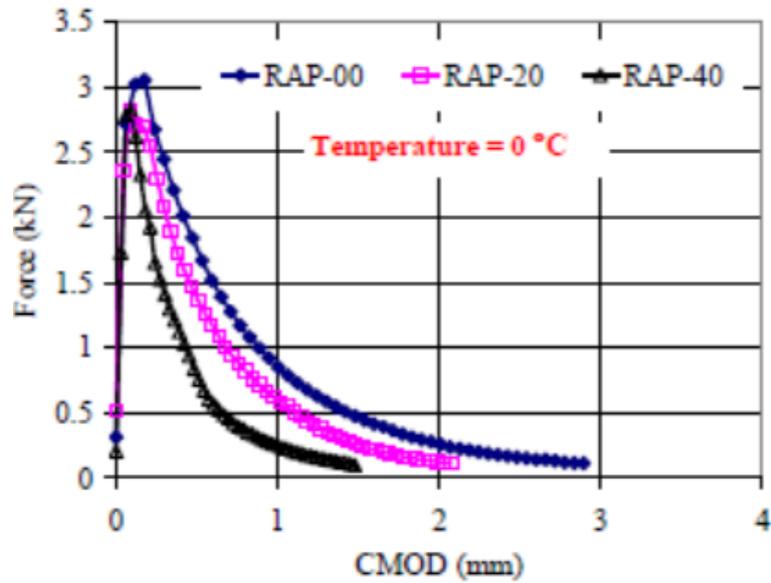


Figura 17. Curva carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo SCB para varios contenidos de RAP a 0°C, para HMA

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009

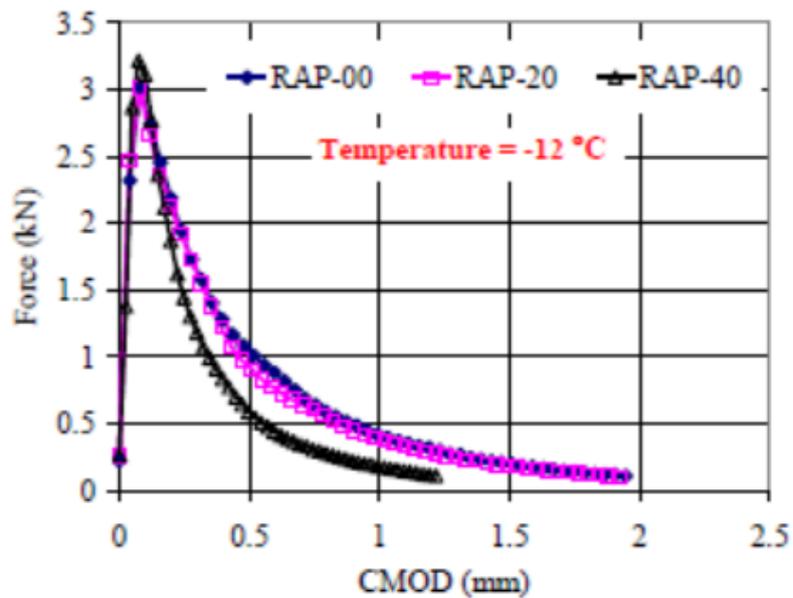


Figura 18. Curva carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo SCB para varios contenidos de RAP a -12°C, para HMA

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009



Estos resultados fueron consistentes y totalmente de acuerdo con los mismos ensayos que se habían realizado anteriormente con el DCT (Tabla 4), cuando el contenido de RAP aumentaba, el área bajo la curva carga-desplazamiento disminuía. Esto sugería que a medida que más RAP había, la mezcla se comportaba de una manera más frágil.

Temperature (°C)	RAP Content (%)	SCB Average Fracture Energy (J/m ²)	DCT Average Fracture Energy (J/m ²)
0	0	1621	1639
	20	1243	1332
	40	750	843
-12	0	986	597
	20	916	532
	40	652	438

Tabla 4. Resultados de la energía de fractura para ambos ensayos (SCB y DCT)

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009

Posteriormente, los mismos autores realizaron un estudio sobre el comportamiento de las HMA con modificadores PG58-28 y PG64-22. El SCB también fue el ensayo usado en esta fase de estudio para conocer cómo los modificadores afectaban al grado de fractura de las mezclas asfálticas con contenido de RAP.

En las figuras 19 y 20 se muestran los resultados de la curva carga-desplazamiento con 0, 20 y 40% de RAP y modificadores PG58-28 para las temperaturas de 0 y -12°C, respectivamente.

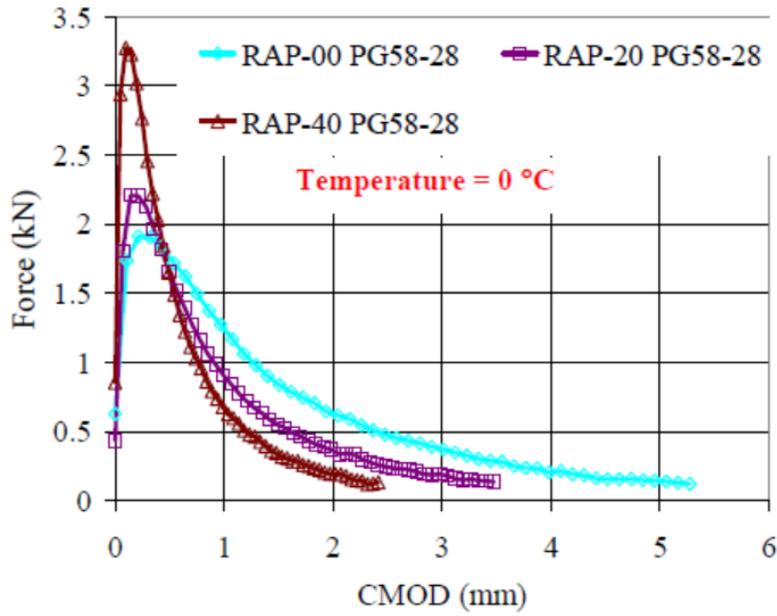


Figura 19. Curvas carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo SCB para varios contenidos de RAP a 0°C, para HMA y modificado PG58-28

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009

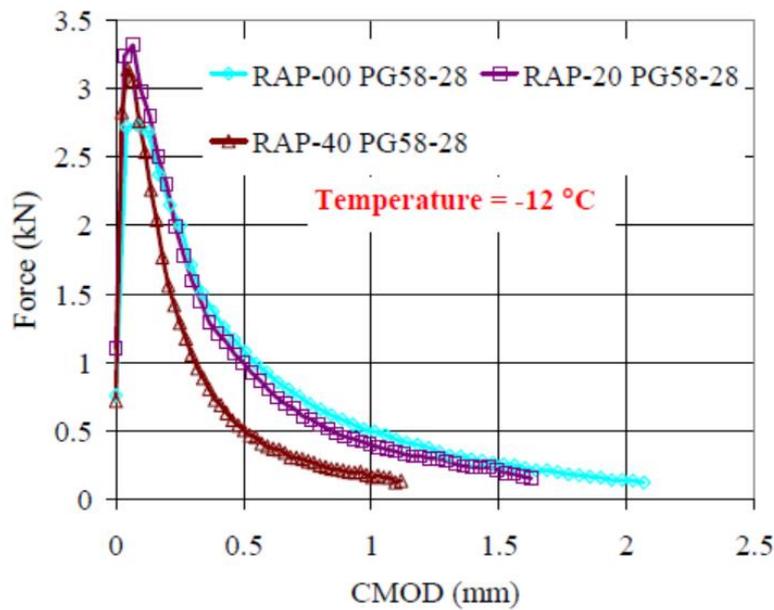


Figura 20. Curvas carga-desplazamiento como resultado de la aplicación del ensayo SCB para varios contenidos de RAP a -12°C, para HMA y modificado PG58-28

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009



A continuación, se presentan los gráficos que utilizaron para comparar la influencia de los dos tipos de modificadores (Fig. 21 y 22) y sus respectivos valores de energía de fractura (Tabla 5).

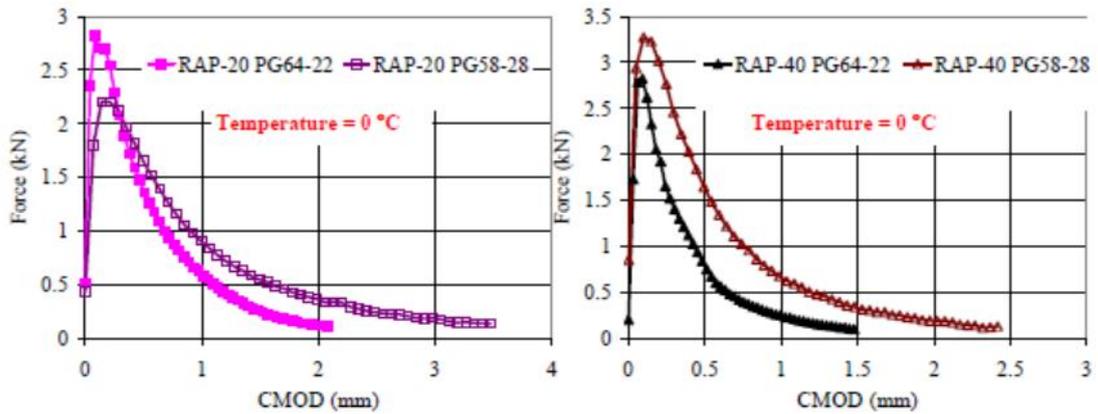


Figura 21. Curvas carga-desplazamiento como resultados de la aplicación del ensayo SCB según el contenido de RAP a 0°C, para HMA y modificados PG58-28 y PG64-22.

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009

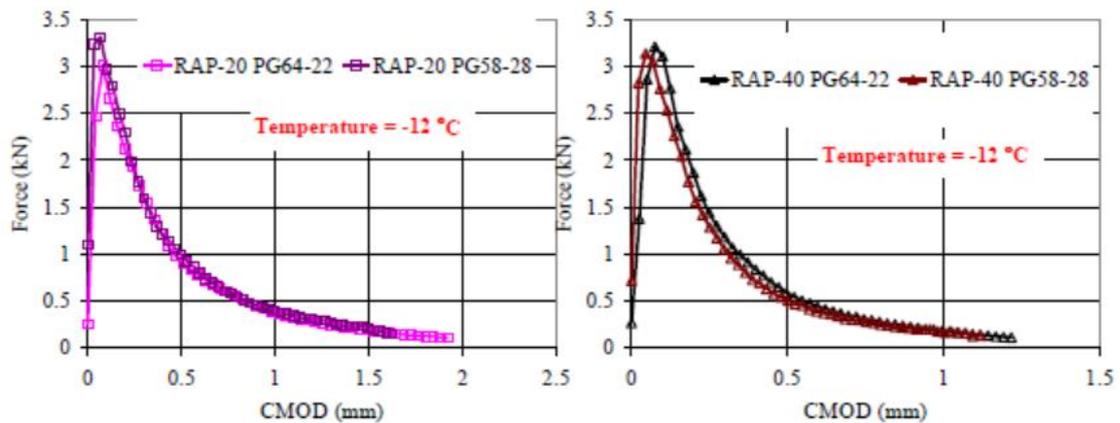


Figura 22. Curvas carga-desplazamiento como resultados de la aplicación del ensayo SCB según el contenidos de RAP a -12°C, para HMA y modificados PG58-28 y PG64-22.

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009



Temperature (°C)	RAP %	Fracture Energy w/PG64-22 (J/m ²)	Fracture Energy w/PG58-28 (J/m ²)
0	0	1621	2845
	20	1243	1788
	40	750	1365
-12	0	986	1098
	20	916	988
	40	652	639

Tabla 5. Resultados de la energía de fractura para ambos modificados, según el contenido de RAP y las temperaturas ensayadas

Fuente: Hasan Ozer et al., 2009

El procedimiento de diseño de la mezcla utilizada en el estudio había producido un resultado importante y práctico que daba una idea de cómo afectaba la utilización de modificadores en mezclas asfálticas con RAP. Se concluyó que a veces, el hecho de añadir modificadores no suponía una variación significativa en los resultados, especialmente en HMA con 40% de RAP.

Con este método, también se demostró que cuando el contenido de RAP aumentaba, aumentaba la susceptibilidad al agrietamiento de la HMA, especialmente a bajas temperaturas.



3. METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

Siguiendo esta línea de investigación, en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha desarrollado un nuevo ensayo experimental, denominado Fénix, cuya finalidad es evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de fisuración de las mezclas [11 y 12].

En este trabajo, se utilizará el ensayo Fénix para evaluar la influencia del tipo de betún y de la temperatura en la resistencia a la fisuración de las mezclas. Para ello, se han utilizado 3 betunes de penetración diferente y 6 temperaturas de rango entre -15 y 30°C.

Para aislar el efecto del betún se utiliza una mezcla con una granulometría compuesta solamente por árido grueso (sin finos, ni filler), definida en el método UCL, que permite caracterizar los ligantes en función de su poder aglomerante [13 y 14].

En este apartado se procederá a la descripción de la preparación de las probetas y la ejecución de los ensayos.

3.2. PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Se han conformado muestras con 3 tipos de betunes con un 4,5% de peso sobre áridos y un 4,3% de peso sobre la mezcla. Para cada tipo de betún, se realizarán 9 probetas, por tanto, un total de 27 probetas que posteriormente serán divididas en dos partes y ensayadas a sus correspondientes temperaturas.



3.2.1. Materiales empleados

3.2.1.1. Betún

Para la fabricación de las probetas, se han utilizado tres tipos de betunes asfálticos de penetración: B 15/25 (duro), B 35/50 (medio) y B 70/100 (blando), con las siguientes características (Tabla 6):

Característica	Unidad	B 15/25	B 35/50	B 70/100
Penetración a 25°C	0,1 mm	24	39	80
Punto de Reblandecimiento	°C	62	53,6	56
Índice de Penetración	-	-0,19	-0,9	-0,73

Tabla 6. Características de los 3 betunes utilizados (B15/25, B35/50 y B70/100)

El contenido de betún en cada probeta ha permanecido constante, puesto que lo que interesa es ver el efecto no de la cantidad de este sino del tipo. Se utiliza un 4,5% por ciento del peso de los áridos de la mezcla, por tanto, como el peso de los áridos de las probetas es de 900g, se utilizan 40,5 g aproximadamente de betún, lo que conlleva a que cada probeta acaba pesando alrededor de 940,5 g.

3.2.1.2. Áridos

Como se ha especificado anteriormente, solamente se usa árido grueso como material de soporte, ni filler ni árido fino, ya que pueden modificar los resultados. También, debe asegurarse que estos áridos tengan un desgaste de Los Ángeles inferior a 25 y una absorción inferior al 1,5%.

Para este material de soporte, se han necesitado dos tamaños de árido grueso. Por tanto, el árido recibido ha sido tamizado. Para ello se ha utilizado una



tamizadora con tres tamices de 5mm, 2,5mm y 0,63mm establecidos por la norma UNE-7050.

En cada muestra se ha utilizado un 80% del tamaño mayor (5 – 2,5mm), y un 20% del tamaño menor (2,5 – 0,63mm) del peso total de áridos.

Para determinar el peso o cantidad de áridos necesario, se han conformado dos probetas de prueba. Una con 850g y otra de 900g. La primera debida a un resultado de espesor muy bajo ha sido descartada, por lo que se ha optado por utilizar la cantidad de 900g de árido para el resto de las probetas.

3.2.2. Fabricación de las probetas

3.2.2.1. Preparación de los áridos

Como se ha comentado anteriormente, se han necesitado dos tamaños de áridos para las probetas. Para ello el árido recibido ha sido separado por tamaños gracias a una tamizadora vibratoria con tamices normalizados por la norma UNE-7050. En la tabla 7 se presenta la granulometría utilizada [15]:

Tamiz	% Pasa
5	100
2,5	20
0,63	0

Tabla 7. Granulometría Mezcla utilizada para la fabricación de probetas

A continuación, se procede a pesar los áridos necesarios para conformar cada probeta. Para cada probeta se pesan un total de 900g de árido, un 80 % del tamaño mayor que corresponde a 720g y un 20 % del árido de menor tamaño que son 180g.



3.2.2.2. Fabricación de las mezclas

La fabricación de las probetas está basada en el procedimiento Marshall. Una vez se han pesado los áridos, estos deben alcanzar la temperatura de fabricación de $155\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante un mínimo de 3 horas. A su vez, el betún también debe alcanzar la misma temperatura durante 1,5 horas. Además, es importante dejar en la estufa solamente la cantidad de betún que se va a usar para fabricar en ese momento, ya que puede sufrir un proceso de envejecimiento anticipado.

El procedimiento de elaboración de cada probeta es siempre el mismo pero cambiando el tipo de betún. Por temas de organización, se enumera cada probeta con una tiza y se marca un tipo de betún utilizado.

También cabe destacar que debido a que todos los materiales están a altas temperaturas, hay que respetar ciertas normas de seguridad, por lo que hay que usar ropa y calzado adecuado, guantes ignífugos y toda protección necesaria.

La mezcla se lleva a cabo en una plancha de gas. Se vierten los áridos en un recipiente de metal con forma de cazo y se les da unas vueltas con una cuchara para que no pierdan el calor de la estufa al ser sacados (Fig. 23).



Figura 23. Plancha y objetos utilizados para la fabricación de probetas



Seguidamente, se lleva el recipiente a la báscula donde se añade el betún, también sacado directamente de la estufa. Se vierte la cantidad necesaria hasta llegar a los 940,5 g de mezcla. Para añadir la cantidad más exacta posible se hace un agujero en el centro del recipiente entre los áridos, de esta manera en caso de exceder la cantidad de betún, con la ayuda de un pequeño trozo de papel se puede extraer y no se extraen áridos a la vez.

Se lleva de nuevo el recipiente a la plancha, se mezcla todo con la ayuda de la cuchara hasta que los áridos quedan totalmente impregnados del ligante bituminoso (Fig. 24).

En la misma plancha, al lado, se prepara el molde cilíndrico, compuesto por una base y dos moldes cilíndricos que se superponen. Uno de estos cilindros tiene en el lateral exterior un asa, este es el molde principal, mientras que el otro, es un molde complementario y una vez se ha acabado la compactación de la probeta se puede extraer y utilizar para la siguiente.



Figura 24. Mezcla de árido y betún

Se superponen las tres partes, primero la base, luego el molde cilíndrico con el asa y encima el molde cilíndrico complementario. Se inserta un círculo de papel en la base, del mismo diámetro, para evitar que la mezcla se quede pegada a ella. Se vierte la mezcla en el molde con la ayuda de un embudo y una espátula todo de golpe, para evitar que se quede pegada en el cazo. La mezcla, queda



un poco por debajo de la interfaz entre los dos cilindros, de esta manera posteriormente se podrá extraer el molde complementario. En la superficie se vuelve a colocar un círculo de papel y se lleva a la compactadora.

La compactadora, está situada dentro de una cámara insonora. Está formada por una base donde apoyar el molde con la mezcla. Esta base se cubre con aceite para poder deslizar el molde al insertarlo ya que si en vez de deslizar, se apoya de golpe, este golpe puede descompactar lo compactado. También en la base hay tres pequeños pivotes, para poder centrar el molde y mediante una palanca se bloquea su movimiento para que el pistón de compactación caiga directamente sobre la mezcla de manera centrada (Fig. 25). Se golpea la muestra 50 veces por un lado, se saca el molde, se coloca la base en la superficie y el cilindro complementario al otro lado (esta es la manera más cómoda para dar la vuelta a la probeta), se vuelve a deslizar el molde en la base y se compacta por esta otra cara.



Figura 25. Máquina compactadora

Se saca de la compactadora y se retira en cilindro complementario y la base para poder utilizarse en la siguiente probeta. Se esperan unos segundos o



minutos, para que se enfríe la probeta y se retira el papel (Fig. 26). Este paso se realiza debido a que al estar todavía caliente la probeta, los áridos con el betún podrían quedarse pegados al papel y en el momento de despegarlo, se podría perder parte de la mezcla y sus superficies no quedarían lisas.



Figura 26. Probetas compactadas

Para cada probeta se repite el mismo proceso.

Una vez se han enfriado totalmente a temperatura ambiente, se procede a desmolde con la ayuda de un pistón como puede verse en la siguiente figura. Se coloca la muestra de manera centrada en su base y con una palanca conectada al pistón se saca la probeta del molde (Fig. 27).



Figura 27. Probetas enfriadas y lisas para desmoldar



3.3. ENSAYOS INICIALES

3.3.1. Densidad

Dos tipos de densidad se han calculado, la densidad aparente y la densidad máxima.

El valor de la densidad aparente de una probeta puede determinarse mediante un procedimiento teórico o experimental. En este caso se ha utilizado el procedimiento teórico debido a que da un valor más exacto.

Según la norma UNE-EN 993-1, la densidad aparente es el cociente entre la masa de la materia seca de un cuerpo poroso y su volumen aparente como puede verse en la siguiente expresión:

$$\rho_b = \frac{\text{peso de la probeta en seco}}{\text{volumen aparente de la probeta}} \quad [\text{g/cm}^3 \text{ o Kg/m}^3]$$

El volumen aparente se calcula a partir de la suma de los volúmenes de la materia sólida, los poros abiertos y los poros cerrados dentro de un cuerpo poroso. Por tanto, se calculará directamente a partir de la fórmula del cilindro.

$$\text{volumen probeta} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot h^1$$

Los resultados de este ensayo pueden consultarse en el **Anejo 2**.

Para obtener la densidad máxima, se sigue la norma UNE-EN 12697-5.

En primer lugar se esparce la mezcla caliente sobre una bandeja y una vez se ha enfriado se desmenuza, de manera que las partículas que quedan sean menores a 6mm. Se divide la muestra en dos, ya que se realizan dos ensayos mediante picnómetros. En primer lugar, estos picnómetros se pesan vacíos y

¹ El valor de la altura de la probeta corresponde a la media de 3 alturas medidas (**Anejo 1**).



secos con la pieza de cabeza. En segundo lugar, se inserta cada muestra con la ayuda de un embudo y una cuchara. A continuación, se vuelven a pesar también con la cabeza y se añade agua destilada pero sin cubrir todo el picnómetro, ya que mediante una máquina de succión de aire se procede a eliminar el aire que hay, durante 30 minutos. Una vez haya pasado este tiempo, se llena de agua hasta llegar a la raya de enrase y se vuelve a pesar.

Con los pesos medidos, el volumen del picnómetro hasta la marca de referencia y sabiendo que la densidad del agua a 25°C de temperatura (es la que hay aproximadamente en el laboratorio, que es de 0,997 g/cm³), se calcula la densidad máxima mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{max} = \frac{m_2(g) - m_1(g)}{V_P(cm^3) - \frac{m_3(g) - m_2(g)}{\rho_w(g/cm^3)}} \quad [g/cm^3]$$

Siendo:

m_1 [g] = masa del picnómetro con la cabeza.

m_2 [g] = masa del picnómetro con la cabeza y la muestra.

m_3 [g] = masa del picnómetro con la cabeza, la muestra y el agua destilada.

V_P [g/cm³] = volumen del picnómetro cuando está lleno hasta la marca de referencia.

ρ_w [g/cm³] = es la densidad del agua a 25°C.

El resultado de la densidad máxima² es de **2,561g/cm³**.

Mezcla	m_1	m_2	m_3	m_4	V_p	$P_{m\acute{a}xima}$
1	816,2	1243,7	2376,7	2118,2	1302,6	2,570
2	8871,2	1393,5	2467,9	2162,9	1275,9	2,552

Tabla 8. Valores de la densidad máxima

² El valor de la densidad máxima corresponde a la media de los resultados obtenidas en cada uno de los ensayos (Tabla 8)



3.3.2. Contenido de huecos

El contenido de huecos, según la norma UNE-EN 12697-8, se define como el volumen ocupado por los huecos de aire que hay en una mezcla bituminosa. Se expresa en porcentaje del volumen total de la probeta.

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_m = \left(\frac{d_m - d_{ap}}{d_m} \right) \cdot 100 \text{ [%]}$$

Siendo:

V_m [%] = contenido de huecos de aire en la mezcla.

d_m [g/cm³] = densidad teórica máxima de la mezcla.

d_{ap} [g/cm³] = densidad aparente de la probeta.

Los resultados de este ensayo pueden consultarse en el **Anejo 2**.

3.4. ENSAYO FÉNIX

3.4.1. Introducción

El ensayo Fénix es un ensayo de fisuración a tensión. Consiste en someter una muestra semicilíndrica con una ranura (para inducir la fisuración) a una tracción directa a velocidad constante hasta la fractura. El objetivo es evaluar la respuesta frente a la fisuración de mezclas asfálticas a partir de la energía disipada en el proceso de fractura.



3.4.2. Procedimiento

Para poder ensayar en Fénix, todas las probetas han sido cortadas en dos partes, mediante una sierra de disco y en el centro de la superficie de corte, se ha realizado una ranura que tiene la función de inducir la fisuración.

Posteriormente, las dos zonas lisas de la superficie de corte se han pegado en una placa, cada una respectivamente, que sirve para poder instalar el molde en la cámara de tracción directa (Fig. 28). Estas placas primero han sido limpiadas, para ello se ha utilizado papel de lija, para eliminar restos que puedan haber quedado de otros ensayos y se les ha aplicado cloruro de metileno, debido a la toxicidad de este líquido es altamente recomendable el uso de una mascarilla.

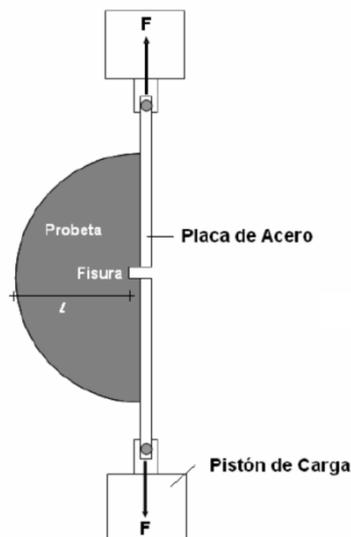


Figura 28. Representación del ensayo Fénix [12]

Fuente: Miró et al., 2014

La semiprobeta se ha pegado con una resina blanca especial, llamada Epoxi. Esta resina se distribuye por las dos zonas lisas de corte de la semi probeta de manera uniforme con una espátula dejando aproximadamente 0,5 cm al lado



de la hendidura sin cubrir. Se coloca de manera centrada sobre las dos placas, pero ambas deben quedar separadas en la zona de la ranura, para ello se utiliza un pequeño soporte de plástico que una vez pegado se extrae.

Este proceso ha sido realizado sobre una superficie totalmente plana y lisa para que las placas quedasen totalmente rectas y no hubiese problemas en el momento de ensayar.

Debido, a que en el laboratorio hay más usuarios, el número de placas es limitado, por lo que se hacen varias tandas. Cada placa al finalizar el ensayo, se coloca en la plancha hasta que se calienta y se puede despegar tanto la muestra como la resina. Posteriormente, se vuelve a limpiar con el papel de lija para eliminar todo posible residuo pegado y se vuelven a utilizar.

Una vez se tienen las muestras preparadas, se colocan antes de ensayarlas en una cámara climática a la temperatura correspondiente de ensayo el suficiente tiempo hasta que adquieren la temperatura. Seguidamente se realiza el ensayo, se aplica una tracción directa a una velocidad constante de 1 mm/min hasta la fisuración. Para ello cada probeta se coloca en una prensa MTS con cámara de temperatura controlada, que también debe estar a la temperatura de ensayo.

Esta cámara está conectada a un equipo de adquisición de datos que mide las cargas que se han generado hasta la fisuración en función del desplazamiento. A partir de estos datos, posteriormente se pueden calcular los parámetros que interesan para la resistencia a la fisuración que son: la Resistencia a Tracción (RT), el Índice de Rigidez a Tracción (IRT), la Energía de fractura (G_D), el Índice de Tenacidad (I_T) y el Desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico ($d_{0,5PM}$)



3.4.2.1. Temperaturas

Se ensaya a un amplio rango de temperaturas para poder valorar su influencia.

En un principio se decide ensayar a -15, -5, 5, 10, 20°C, sin embargo, en el caso del B15/25, debido a que es un betún duro, se ve mayor interés ensayar a 30°C ya que a 10°C su comportamiento no variará mucho respecto los 5 o 20°C.

BETÓN	TEMPERATURAS (°C)					
	- 15	- 5	5	10	20	30
B15/25	✓	✓	✓		✓	✓
B35/50	✓	✓	✓	✓	✓	
B70/100	✓	✓	✓	✓	✓	

Tabla 9. Temperaturas de ensayo para cada tipo de betún

Generalmente, se da mayor importancia a bajas temperaturas debido a que a estas temperaturas la mezcla asfáltica se vuelve más frágil y el proceso de fisuración puede resultar más crítico.

3.4.2.2. Procesamiento de datos

Como se ha especificado anteriormente, los datos que se adquieren de manera directa del ensayo son la carga en función del desplazamiento como puede verse en la siguiente figura:

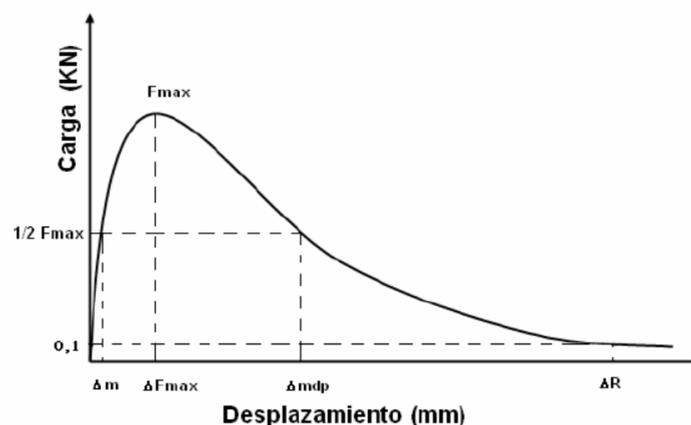


Figura 29. Curva carga-desplazamiento obtenida por el ensayo Fénix [12]

Fuente: Miró et al., 2014



A partir de esta curva carga-desplazamiento se pueden evaluar y calcular los siguientes parámetros [11]:

1. **La Resistencia a Tracción (RT)**: es la relación entre la carga máxima registrada y el área de fractura.

$$RT = \frac{1000 \cdot F_{max}}{h \cdot l} \text{ [kN/mm]}$$

Siendo:

F_{max} [kN] = carga máxima registrada

h [mm] = espesor de la probeta

l [mm] = longitud inicial de ligamento

2. **El Índice de Rigidez a Tracción (IRT)**: es un parámetro representativo de la flexibilidad de un firme y es la relación entre la diferencia entre las cargas y el desplazamiento del pistón al 50% y 25% de la carga máxima.

$$IRT = \frac{F_{max50\%} - F_{max25\%}}{\Delta F_{max50\%} - \Delta F_{max25\%}} \text{ [kN/mm]}$$

Siendo:

$F_{max50\%}$ [kN] = carga máxima registrada al 50%

$F_{max25\%}$ [kN] = carga máxima registrada al 25%

$\Delta F_{max50\%}$ [mm] = desplazamiento antes de la carga máxima al 50% de F_{max}

$\Delta F_{max25\%}$ [mm] = desplazamiento antes de la carga máxima al 25% de F_{max}

3. **La Energía de fractura (G_D)**: es el cociente entre el trabajo total realizado en el proceso de fisuración y el área de fractura (perpendicular a la fuerza aplicada)



$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l} \quad [\text{J/m}^2]$$

Siendo:

W_D [kN-mm] = trabajo realizado en el proceso de fisuración. Es el área que hay debajo de la curva de la carga y el desplazamiento

h [m] = espesor de la probeta

l [m] = longitud inicial de ligamento

4. El Índice de Tenacidad (I_T): es la ausencia de fragilidad y se define como el producto de la energía disipada en el periodo de relajación de la curva carga-desplazamiento por un factor de fragilidad. Este factor corresponde a la diferencia entre el desplazamiento requerido para que el valor de la carga máxima disminuya a la mitad de su valor y el desplazamiento a carga máxima.

$$I_T = \frac{W_D - W_{Fmax}}{h \cdot l} \cdot (d_{0,5PM} - d_M) \quad [\emptyset]$$

Siendo:

W_D [kN-mm] = trabajo disipado en el proceso de fisuración

W_{Fmax} [kN-mm] = trabajo disipado hasta la carga máxima

h [m] = espesor de la probeta

l [m] = longitud inicial de ligamento

$d_{0,5PM}$ [mm] = desplazamiento a $1/2F_{max}$ post-pico

d_M [mm] = desplazamiento a F_{max}

5. Desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico ($d_{0,5PM}$): es un parámetro que se obtiene directamente de los datos del ensayo Fénix. Es alternativo al Índice de tenacidad y sirve también para valorar la ductilidad y la tenacidad.



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se procede al análisis de los resultados que se han obtenido de los ensayos realizados sobre probetas fabricadas en el laboratorio a partir de la mezcla patrón con 3 betunes diferentes. Para el ensayo Fénix, se ha mantenido una velocidad de aplicación de carga de 1mm/min constante y se han utilizado un total de 6 temperaturas diferentes (-15, -5, 5, 10, 20 y 30°C).

4.2. ANÁLISIS DE LA DENSIDAD Y EL PORCENTAJE DE HUECOS OBTENIDOS

En la tabla 10 se indican los resultados de la densidad media y el porcentaje de huecos medios de las probetas conformadas con los 3 tipos de betún, así como su desviación estándar y coeficiente de variación.

		B 15/25	B 35/50	B 70/100
Densidad³ [g/cm³]	Media	1,911	1,895	1,898
	Desviación estándar [σ]	0,00	0,00	0,00
	Coeficiente de variación [C_v]	0,00	0,02	0,00
Huecos [%]	Media	27,637	28,263	28,129
	Desviación estándar [σ]	0,05	1,70	0,46
	Coeficiente de variación [C_v]	0,01	0,05	0,08

Tabla 10. Valores de la densidad media y porcentaje de huecos medios según los 3 tipos de betún

³ La densidad media es la media aritmética de como mínimo 3 valores de densidades aparentes.



4.3. RESULTADOS QUE PROPORCIONA EL ENSAYO FÉNIX

Para cada semiprobeta ensayada, correspondiente a cada tipo de betún y temperatura de ensayo, el ensayo Fénix proporciona una curva de carga-desplazamiento como las que pueden verse a continuación (**Anejo 3**).

A modo de ejemplo, en la figura 30 se han representado las curvas obtenidas de 3 semiprobetas de betún B15/25, ensayadas a una temperatura de 20°C, con objeto de visualizar la dispersión del ensayo.

En cada gráfico, además de la curva, se pueden ver indicados los siguientes valores:

- F_{\max} [kN] = Carga máxima
- DF_{\max} [mm] = Desplazamiento cuando se produce la carga máxima
- DR [mm] = Desplazamiento de rotura
- IRT [kN/mm] = Índice de rigidez a tracción
- G_D [J/m²] = Energía de fractura
- I_t [mN] = Índice de tenacidad

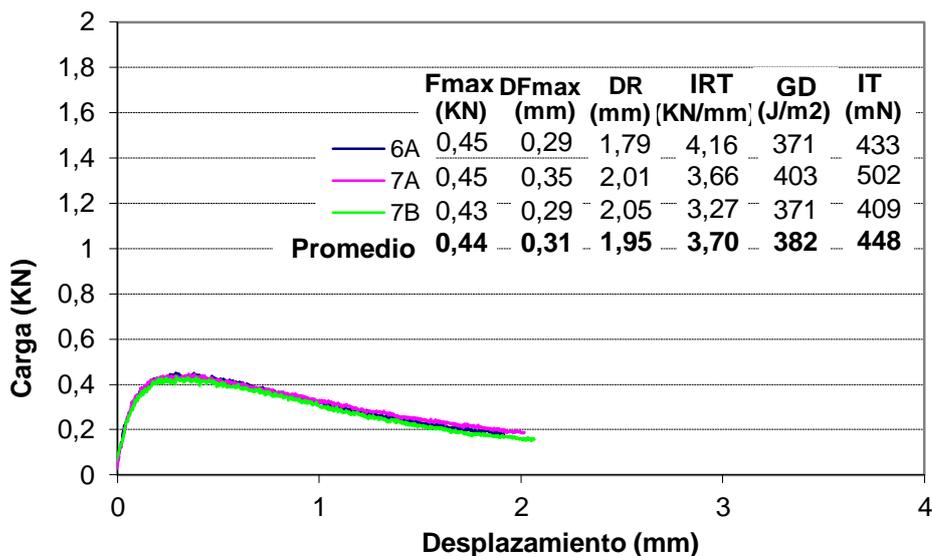


Figura 30. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas de betún B15/25, a 20°C



4.3.1. Influencia del tipo de betún, a cada temperatura de ensayo

A continuación se muestran las curvas carga-desplazamiento representativas obtenidas para cada tipo de betún, figura 31 a 36. Los resultados se muestran para cada temperatura de ensayo.

En cada gráfico se muestran también los valores de los parámetros que se obtienen de cada ensayo.

Ensayo Fénix a -15°C:

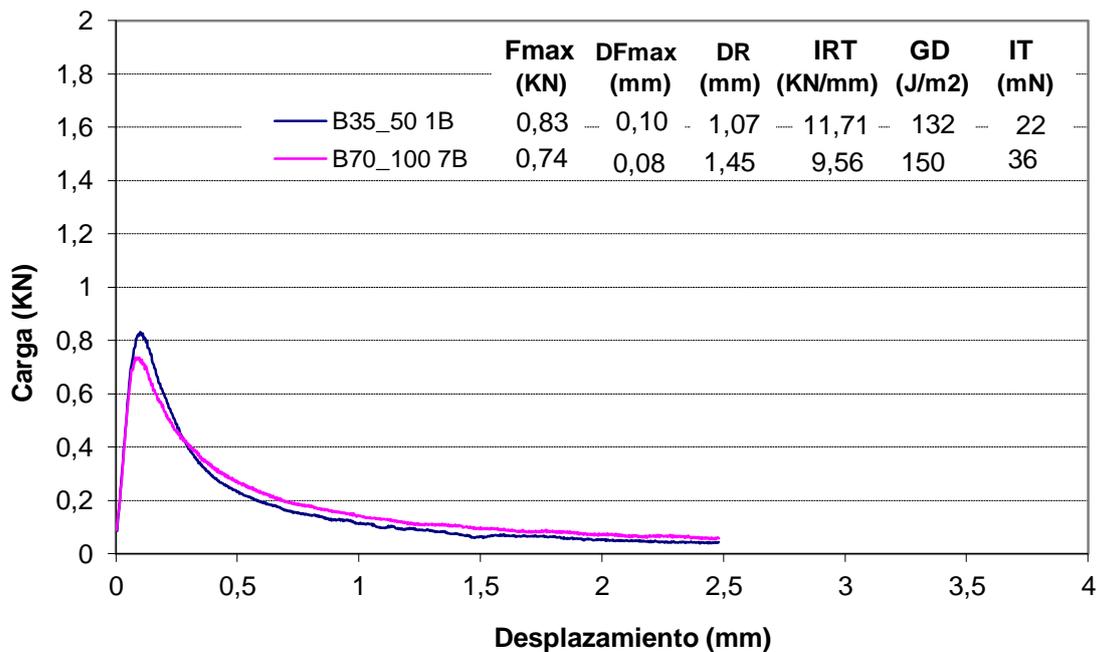


Figura 31. Curva carga-desplazamiento de 2 semiprobetas representativas de betunes B35/50 y B70/100, a -15°C



Ensayo Fénix a -5°C:

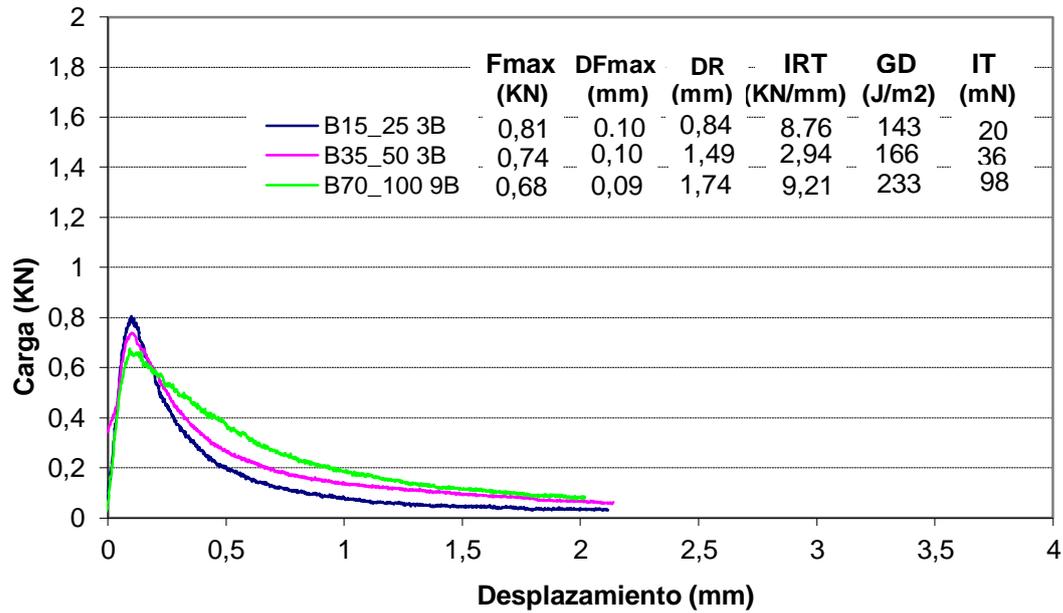


Figura 32. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas representativas de betunes B15/25, B35/50 y B70/100, a -5°C.

Ensayo Fénix a 5°C:

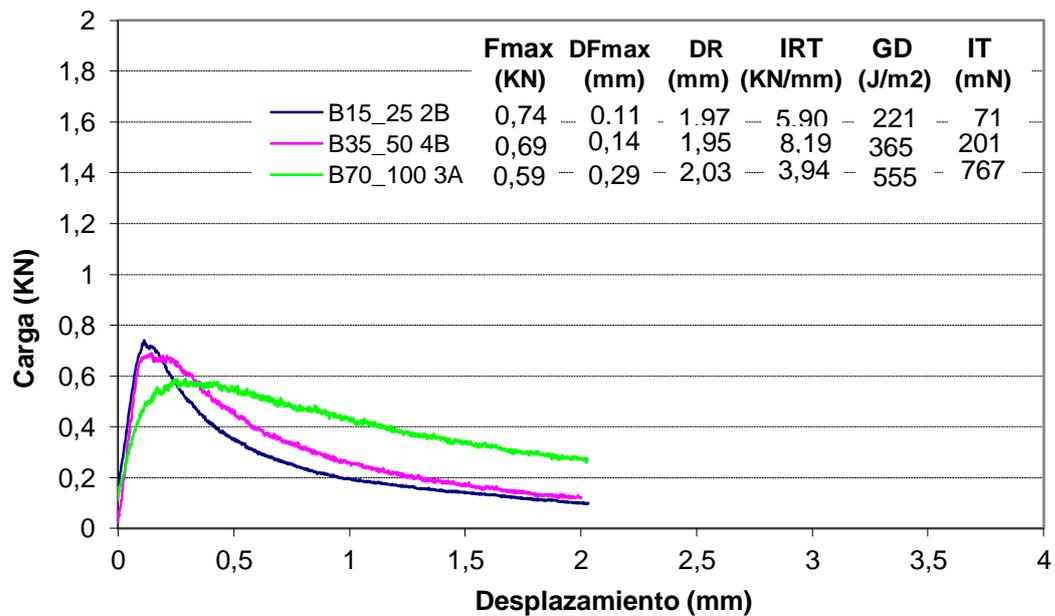


Figura 33. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas representativas de betunes B15/25, B35/50 y B70/100, a 5°C.



Ensayo Fénix a 10°C:

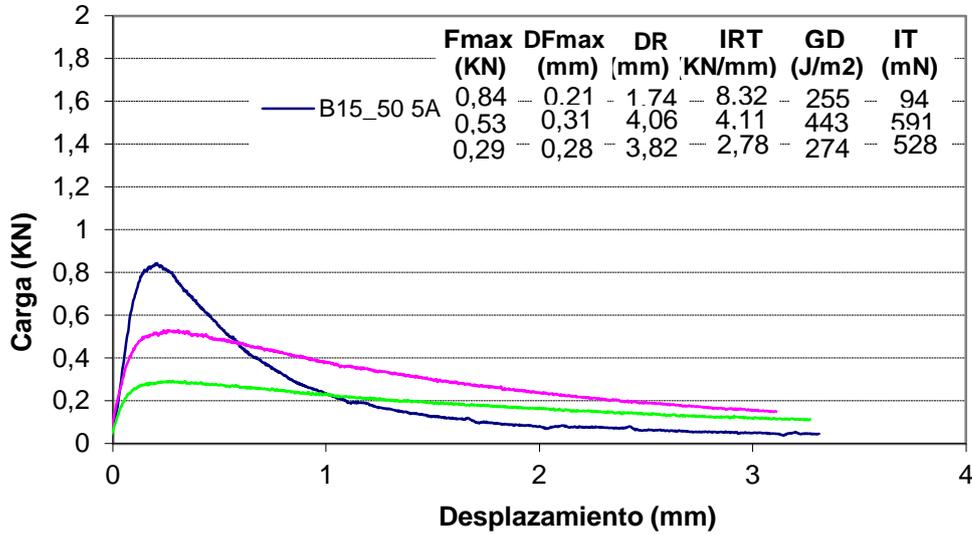


Figura 34. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas representativas de betunes B15/25, B35/50 y B70/100, a 10°C.

Ensayo Fénix a 20°C:

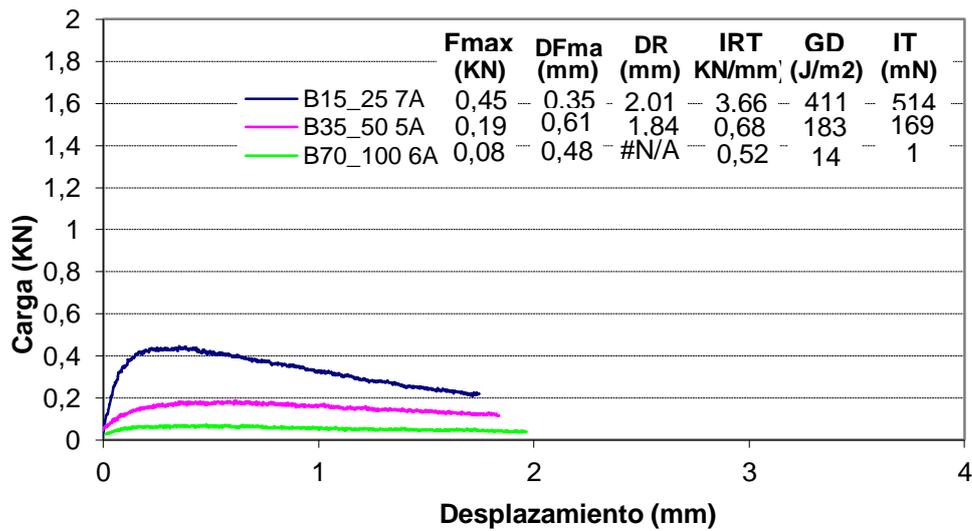


Figura 35. Curva carga-desplazamiento de 3 semiprobetas representativas de betunes B15/25, B35/50 y B70/100, a 20°C.

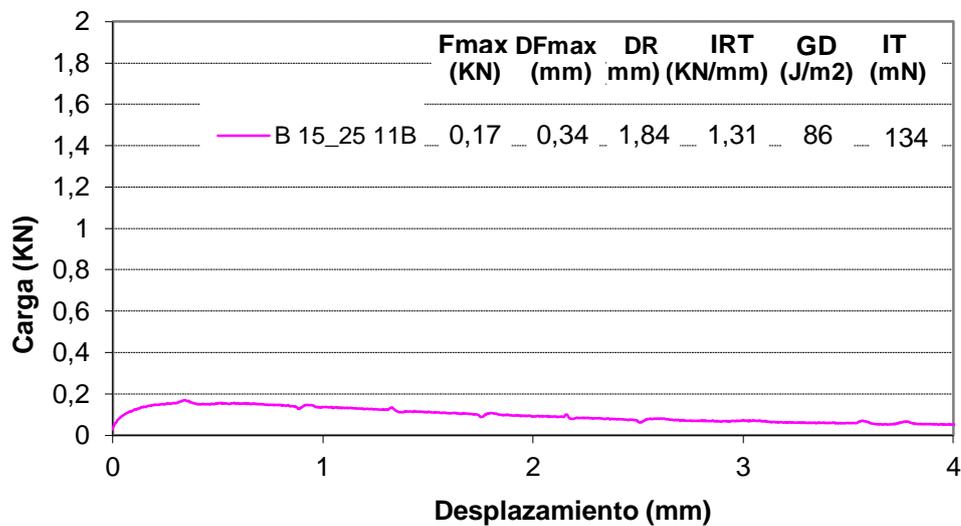
Ensayo Fénix a 30°C:

Figura 36. Curva carga-desplazamiento de la semiprobeta representativa de betún B15/25, a 30°C.

A partir de estas curvas representativas del tipo de betún, se pueden analizar los diferentes comportamientos de cada tipo a las distintas temperaturas de ensayo.

Se puede ver como a bajas temperaturas los betunes tienen un comportamiento prácticamente idéntico entre sí, ya que presentan unas curvas casi totalmente iguales, picudas y de caída muy rápida, debido a que se comportan de una manera más rígida.

En cambio, a medida que se aumenta la temperatura, empiezan a ponerse de manifiesto las diferencias. El betún blando es el primero que comienza a tener una caída postpico menos rápida y posteriormente acaba perdiendo su forma picuda. En cuanto se sigue aumentando la temperatura, lo mismo sucede con el betún medio que pasa a tener una curva más suave, similar a la del betún blando, pero con una carga máxima mayor. Finalmente, a temperaturas medias-altas, los 3 tipos de betún tienen unas curvas totalmente diferentes, con distintas cargas máximas y con una forma mucho más plana.



4.3.2. Influencia de la temperatura, para cada tipo de betún

En este apartado se presentan los resultados del ensayo Fénix para poder evaluar cómo afecta la temperatura en la fisuración.

Se han realizado 3 gráficos, según el tipo de betún, a partir de las curvas carga-desplazamiento representativas a las correspondientes temperaturas de ensayo.

B15/25:

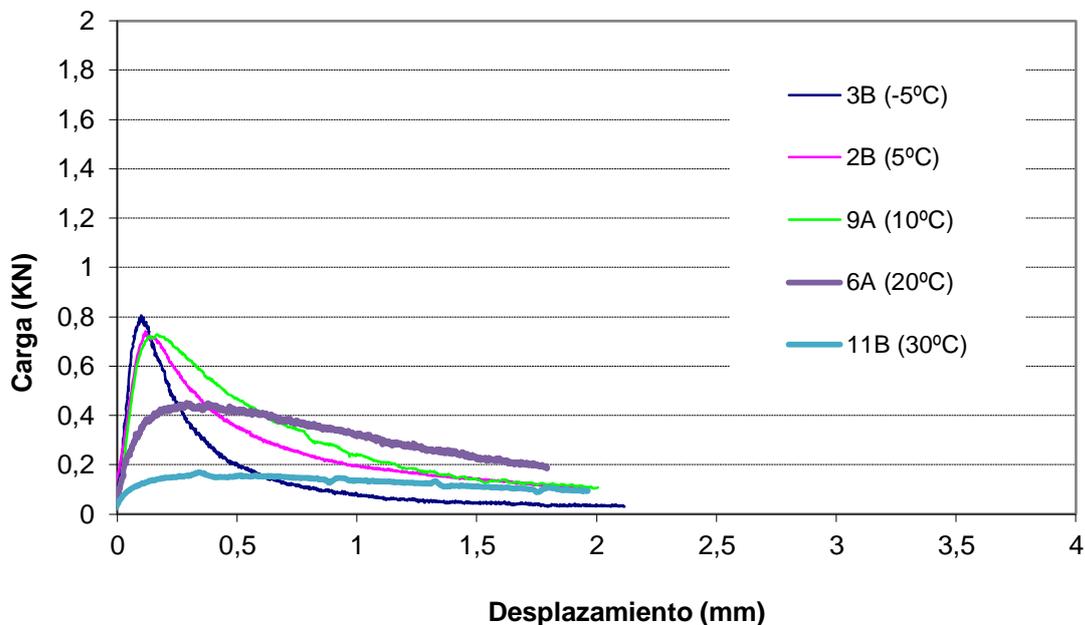


Figura 37. Curva carga-desplazamiento de las semiprobetas representativas de betún B15/25, a -5, 5, 10, 20 y 30°C.

Este betún es el que tiene una menor penetración y por tanto es más duro. Para este betún, el comportamiento para las 3 temperaturas más bajas (-5, 5 y 10°C) es parecido, hay muy poca divergencia entre los picos, pero la diferencia se pone de manifiesto en la caída de las curvas postpico.



En cambio, para las 2 temperaturas más altas (20 y 30°C) la diferencia es notable ya que dejan de ser picudas, tienen una caída muy lenta y la carga máxima tiene unos valores completamente distintos entre ellas y respecto las 3 temperaturas anteriores.

B35/50:

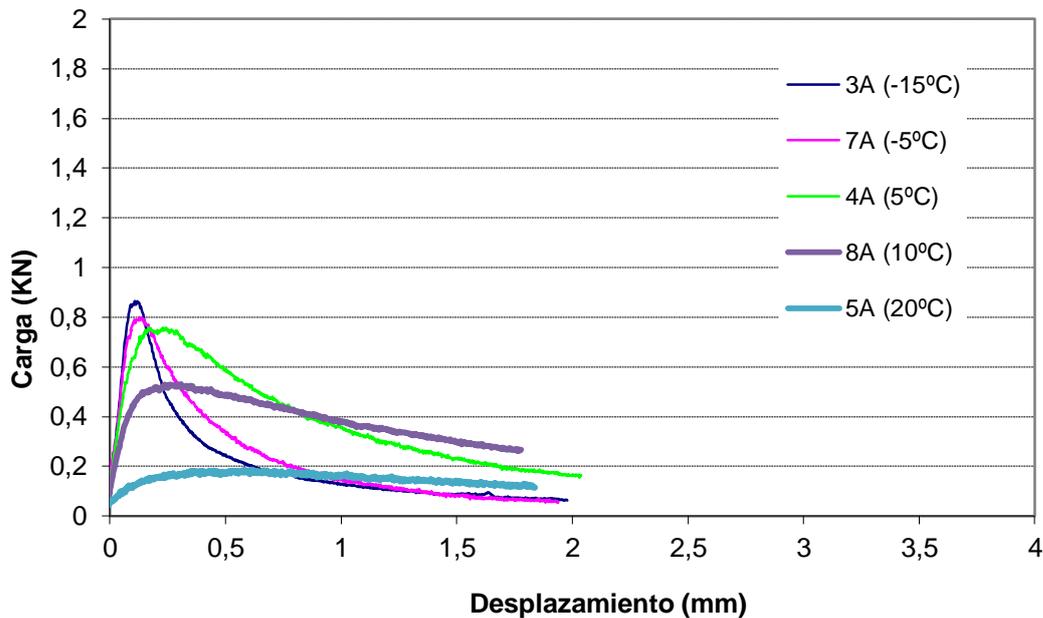


Figura 38. Curva carga-desplazamiento de las semiprobetas representativas de betún B35/50, a -15, -5, 5, 10 y 20°C

Para este betún de penetración media, sucede lo mismo para las dos temperaturas más bajas, los picos son muy similares, pero hay ligeras diferencias entre la caída de las curvas. Sin embargo, para la temperatura de 5°C la curva cambia, ya no es tan picuda y la diferencia de su curva postpico empieza a ser más parecida a las curvas de las temperaturas más altas (20 y 30°C).



B70/100:

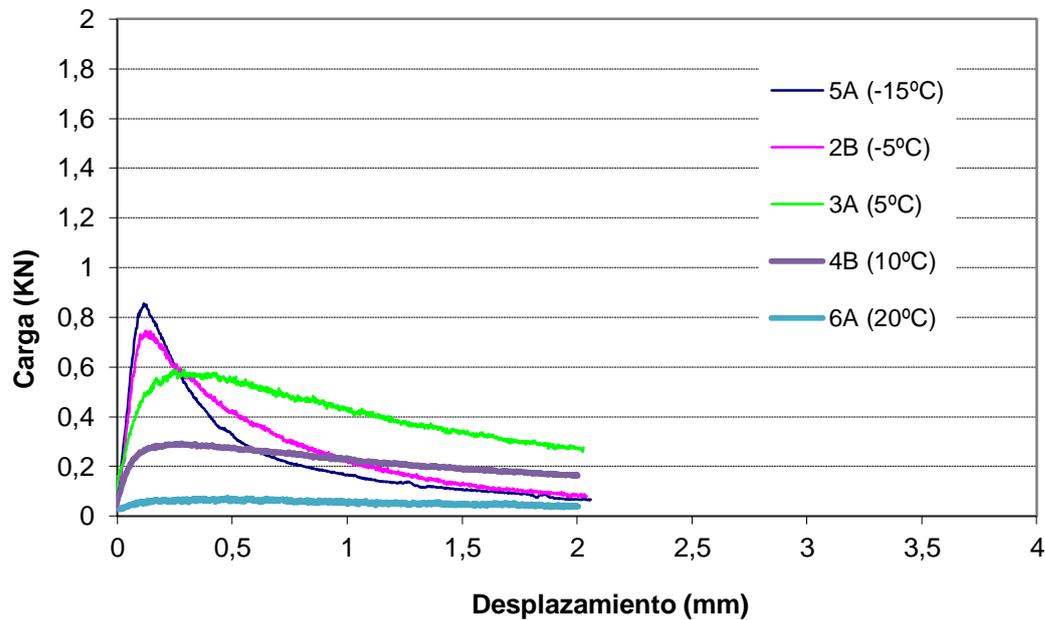


Figura 39. Curva carga-desplazamiento de las semiprobetas representativas de betún B70/100, a -15, -5, 5, 10 y 20°C

Para este betún más blando, la curva de temperatura 5°C ha abandonado totalmente el comportamiento picudo que tenía con los betunes duro y medio y su carga máxima también ha descendido respecto estas dos.

A las dos temperaturas más bajas no se pueden apreciar diferencias muy significativas pero si con las 3 temperaturas medias-altas.



4.3.3. Análisis de los parámetros que se obtienen del ensayo Fénix para cada temperatura, en función del tipo de betún

A continuación se presentan los resultados medios de la Resistencia a Tracción (RT), el Índice de Rigidez a Tracción (IRT), la Energía de fractura (G_D), el Índice de Tenacidad (I_T) y el desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico ($d_{0,5PM}$) que se han obtenido para cada tipo de betún. Se han agrupado según las distintas temperaturas de ensayo y se han calculado las desviaciones estándar y los coeficientes de variación para verificar la variabilidad de los resultados que se han obtenido.

TEMPERATURA:	-15°C	B15/25	B35/50	B70/100
Resistencia a Tracción (RT) [kN/mm]	media		0,35	0,32
	σ_v		0,00	0,03
	Cv		0,01	0,10
Índice de Rigidez a Tracción (IRT) [kN/mm]	media		10,24	9,06
	σ_v		1,48	0,40
	Cv		0,14	0,04
Energía de Fractura (G_D) [J/m ²]	media		139,0	191,5
	σ_v		7,00	33,95
	Cv		0,05	0,15
Índice de Tenacidad (I_t) [Ø]	media		21,5	56,3
	σ_v		0,50	26,08
	Cv		0,02	0,46
Desplazamiento al 50%Fmax postpico ($d_{0,5PM}$) [mm]	media		0,28	0,43
	σ_v		0,01	0,11
	Cv		0,03	0,27

Tabla 11. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de -15°C y según el tipo de betún



TEMPERATURA:	-5°C		B15/25	B35/50	B70/100
Resistencia a Tracción (RT) [kN/mm]	media		0,32	0,28	0,31
	σ_v		0,01	0,04	0,03
	Cv		0,03	0,13	0,09
Índice de Rigidez a Tracción (IRT) [kN/mm]	media		10,46	6,49	8,22
	σ_v		1,55	0,15	0,37
	Cv		0,15	0,02	0,04
Energía de Fractura (G_D) [J/m ²]	media		163,3	180,0	263,0
	σ_v		14,38	16,81	21,35
	Cv		0,09	0,09	0,08
Índice de Tenacidad (I_i) [Ø]	media		30,3	48,3	100,3
	σ_v		7,41	9,73	11,95
	Cv		0,24	0,20	0,12
Desplazamiento al 50%Fmax postpico ($d_{0,5PM}$) [mm]	media		0,34	0,46	0,57
	σ_v		0,03	0,03	0,01
	Cv		0,10	0,07	0,02

Tabla 12. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de -5°C y según el tipo de betún

TEMPERATURA:	5°C		B15/25	B35/50	B70/100
Resistencia a Tracción (RT) [kN/mm]	media		0,26	0,31	0,24
	σ_v		0,03	0,01	0,02
	Cv		0,12	0,04	0,10
Índice de Rigidez a Tracción (IRT) [kN/mm]	media		7,43	6,43	5,35
	σ_v		0,29	0,05	1,14
	Cv		0,04	0,01	0,21
Energía de Fractura (G_D) [J/m ²]	media		175,4	434,3	647,3
	σ_v		37,26	70,67	77,99
	Cv		0,21	0,16	0,12
Índice de Tenacidad (I_i) [Ø]	media		51,6	281,0	847,0
	σ_v		16,82	102,77	82,00
	Cv		0,33	0,37	0,10
Desplazamiento al 50%Fmax postpico ($d_{0,5PM}$) [mm]	media		0,46	0,88	1,65
	σ_v		0,04	0,23	0,20
	Cv		0,09	0,26	0,12

Tabla 13. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de 5°C y según el tipo de betún



TEMPERATURA:	10°C		B15/25	B35/50	B70/100
Resistencia a Tracción (RT) [kN/mm]	media		0,32	0,22	0,13
	σ_v		0,02	0,04	0,03
	Cv		0,07	0,20	0,23
Índice de Rigidez a Tracción (IRT) [kN/mm]	media		7,80	3,86	2,67
	σ_v		0,52	0,26	0,53
	Cv		0,07	0,07	0,20
Energía de Fractura (G_D) [J/m ²]	media		244,7	373,3	271,0
	σ_v		13,91	52,03	71,47
	Cv		0,06	0,14	0,26
Índice de Tenacidad (I_i) [Ø]	media		99,3	426,7	463,0
	σ_v		11,26	136,84	104,91
	Cv		0,11	0,32	0,23
Desplazamiento al 50%Fmax postpico ($d_{0,5PM}$) [mm]	media		0,63	1,52	2,29
	σ_v		0,04	0,35	0,09
	Cv		0,06	0,23	0,04

Tabla 14. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de 10°C y según el tipo de betún

TEMPERATURA:	20°C		B15/25	B35/50	B70/100
Resistencia a Tracción (RT) [kN/mm]	media		0,18	0,08	0,03
	σ_v		0,00	0,00	0,00
	Cv		0,03	0,06	0,18
Índice de Rigidez a Tracción (IRT) [kN/mm]	media		3,70	0,80	0,09
	σ_v		0,36	0,15	0,04
	Cv		0,10	0,18	0,44
Energía de Fractura (G_D) [J/m ²]	media		387,7	158,7	0,0
	σ_v		19,96	18,93	0,00
	Cv		0,05	0,12	0,00
Índice de Tenacidad (I_i) [Ø]	media		456,0	228,3	0,0
	σ_v		47,08	40,67	0,00
	Cv		0,10	0,18	0,00
Desplazamiento al 50%Fmax postpico ($d_{0,5PM}$) [mm]	media		1,57	2,37	2,94
	σ_v		0,03	0,23	0,05
	Cv		0,02	0,10	0,02

Tabla 15. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de 20°C y según el tipo de betún



TEMPERATURA:	30°C		B15/25	B35/50	B70/100
Resistencia a Tracción (RT) [kN/mm]	media		0,07		
	σ_v		0,00		
	Cv		0,00		
Índice de Rigidez a Tracción (IRT) [kN/mm]	media		0,99		
	σ_v		0,23		
	Cv		0,23		
Energía de Fractura (G_D) [J/m ²]	media		115,7		
	σ_v		25,72		
	Cv		0,22		
Índice de Tenacidad (I_t) [Ø]	media		198,0		
	σ_v		48,01		
	Cv		0,24		
Desplazamiento al 50%Fmax postpico ($d_{0,5PM}$) [mm]	media		2,44		
	σ_v		0,14		
	Cv		0,06		

Tabla 16. Valores medios de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix con sus correspondientes desviaciones estándar y coeficiente de variación, a temperatura de 30°C y según el tipo de betún

Estudiadas las desviaciones estándar y los coeficientes de variación, se puede ver que se han obtenido unos los coeficientes de variación bajos, con alguna excepción en el que la dispersión ha sido mayor, ya que el número de probetas ensayadas por tipo de betún y temperatura ha sido limitado. Sin embargo, prácticamente todos los valores han dado resultados muy fiables.

4.3.4. Análisis de cada parámetro que se obtiene del ensayo Fénix en función de la temperatura y del tipo de betún

En este apartado se ha analizado cada parámetro obtenido por el ensayo Fénix en función de las temperaturas de ensayo, para los 3 tipos de betún: B15/25 (duro), B35/50 (medio) y B70/100 (blando).

Para cada parámetro se muestra una tabla con los valores medios calculados para cada tipo de betún y temperatura, y seguidamente un gráfico con estos valores representados.

**Resistencia a Tracción (RT) [kN/mm]:**

Temperaturas [°C]	B15/25	B35/50	B70/100
-15		0,35	0,32
-5	0,32	0,28	0,31
5	0,26	0,31	0,24
10	0,32	0,22	0,13
20	0,18	0,08	0,03
30	0,07		

Tabla 17. Valores medios de la Resistencia a Tracción [kN/mm] para cada betún y temperatura de ensayo

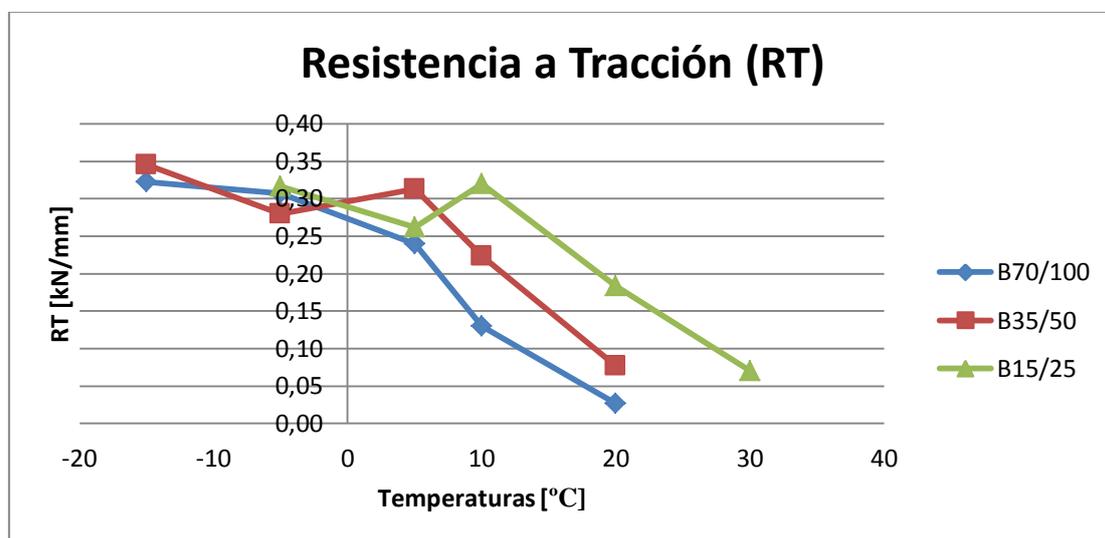


Figura 40. Representación de los valores medios de la Resistencia a Tracción [kN/mm] para cada betún y temperatura de ensayo.

En primer lugar, de modo general se puede ver como la resistencia a tracción aumenta a medida que bajan la temperatura de ensayo. En segundo lugar, se aprecia que a bajas temperaturas los tres tipos de betún tienen prácticamente las mismas resistencias. Sin embargo, a medida que se aumenta la temperatura empiezan a presentarse diferencias entre los 3 betunes; el betún más duro tiene una mayor resistencia a tracción que el medio, y éste a su vez mayor que el blando.

**Índice de Rigidez a Tracción (IRT) [kN/mm]:**

Temperaturas [°C]	B15/25	B35/50	B70/100
-15		10,24	9,06
-5	10,46	6,49	8,22
5	7,43	6,43	5,35
10	7,80	3,86	2,67
20	3,70	0,80	0,09
30	0,99		

Tabla 18. Valores medios del Índice de Rigidez a Tracción [kN/mm] para cada betún y temperatura de ensayo

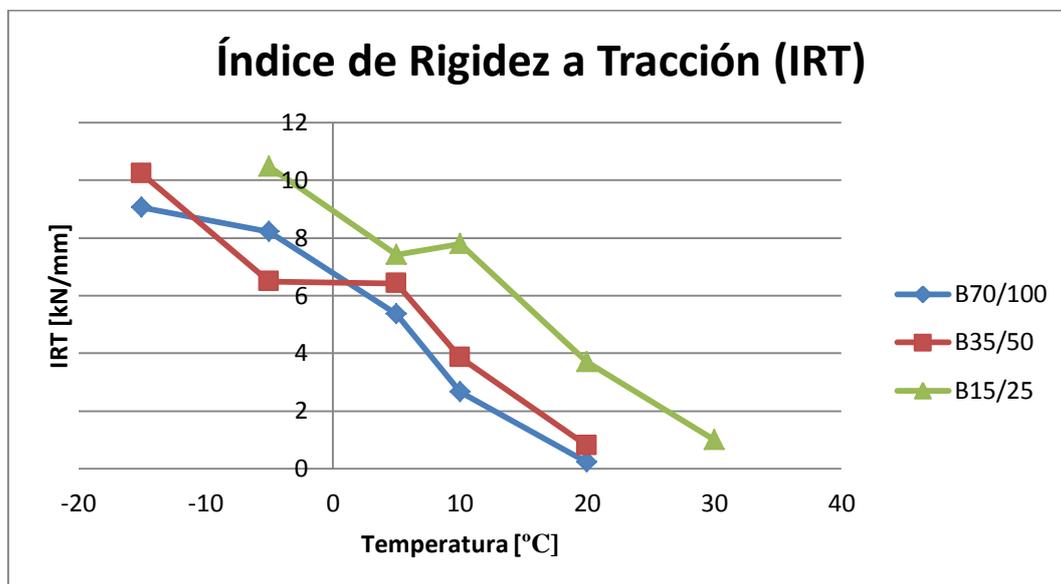


Figura 41. Representación de los valores medios del Índice de Rigidez a Tracción [kN/mm] para cada betún y temperatura de ensayo

El índice de rigidez a tracción también aumenta a medida que se baja la temperatura y los 3 betunes tienden a valores similares. Pero también, a medida que se ensaya a temperaturas más altas, se pueden apreciar las diferencias de valores. Entre el betún medio y el blando hay poca diferencia, en cambio, respecto al betún duro, la diferencia es notable.



Energía de Fractura (G_d) [J/m^2]:

Temperaturas [°C]	B15/25	B35/50	B70/100
-15		139,00	191,50
-5	163,30	180,00	263,00
5	175,40	434,30	647,30
10	244,70	373,30	271,00
20	387,70	158,70	0,00
30	115,70		

Tabla 19. Valores medios de la Energía de Fractura [J/m^2] para cada betún y temperatura de ensayo

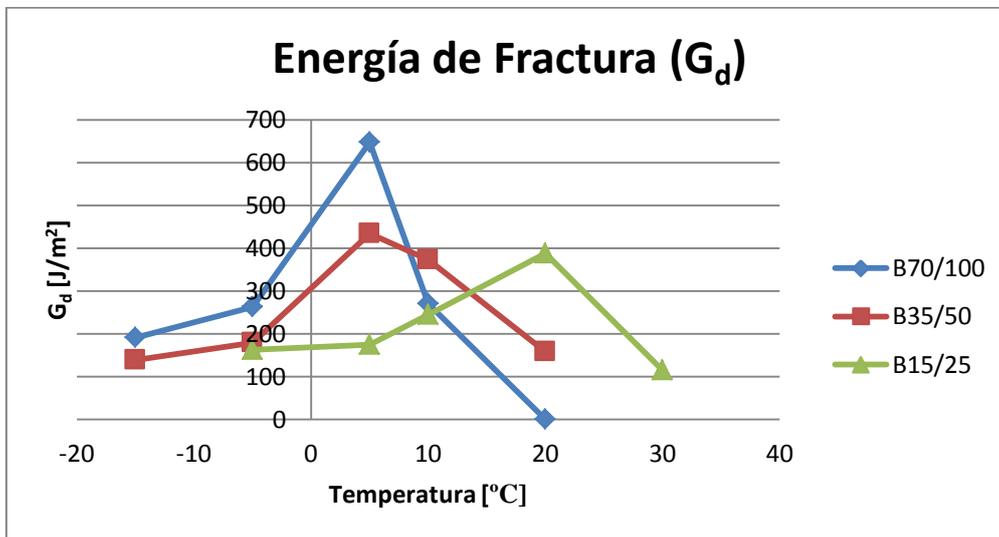


Figura 42. Representación de los valores medios de la Energía de Fractura [J/m^2] para cada betún y temperatura de ensayo

Para cada tipo de betún, la energía de fractura presenta un valor máximo que se produce a una temperatura intermedia de ensayo. A medida que aumenta la temperatura, primero aparece para el betún blando, luego para el medio y por último para el duro. Este hecho conlleva a que a ciertas temperaturas estas curvas se crucen, mostrando valores muy similares, como por ejemplo ocurre a 10°C; el betún blando y el duro presentan una energía de fractura casi idéntica. De aquí la importancia de realizar el ensayo en un amplio rango de temperaturas, ya que si no se podría pensar que diferentes betunes tienen el mismo comportamiento.

**Índice de Tenacidad (I_t) [\emptyset]:**

Temperaturas [°C]	B15/25	B35/50	B70/100
-15			21,50
-5	30,33	48,25	100,33
5	51,60	281,00	847,00
10	99,33	426,67	463,00
20	456,00	228,33	
30	198,00		

Tabla 20. Valores medios del Índice de Tenacidad [\emptyset] para cada betún y temperatura de ensayo

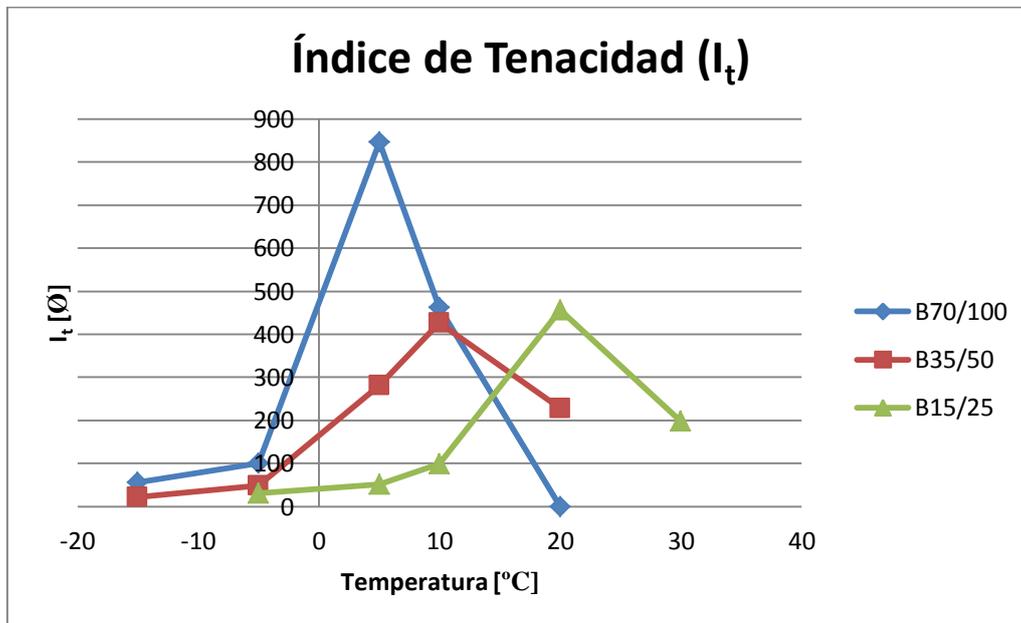


Figura 43. Representación de los valores medios del Índice de Tenacidad [\emptyset] para cada betún y temperatura de ensayo

El índice de tenacidad a bajas temperaturas es muy bajo y los 3 tipos de betún se comportan de manera muy parecida. A temperaturas a partir de -5°C se empiezan a marcar las diferencias en función del tipo de betún. Sin embargo, igual que ocurría con el parámetro anterior, los resultados presentan un máximo; a medida que la temperatura aumenta va apareciendo un pico a una temperatura más o menos elevada en función del tipo de betún (de blando a



duro). Estas curvas se cruzan, provocando que a ciertas temperaturas algunos valores puedan ser prácticamente iguales. Por ejemplo, alrededor de 15°C se puede apreciar como hay muy poca diferencia entre los 3 betunes, lo que conlleva de nuevo a darse cuenta de la importancia que tiene realizar estos ensayos a distintas temperaturas.

Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico [mm]:

Temperaturas [°C]	B15/25	B35/50	B70/100
-15		0,28	0,43
-5	0,34	0,46	0,57
5	0,46	0,88	1,65
10	0,63	1,52	2,29
20	1,57	2,37	2,94
30	2,44		

Tabla 21. Valores medios del Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico [mm] para cada betún y temperatura de ensayo

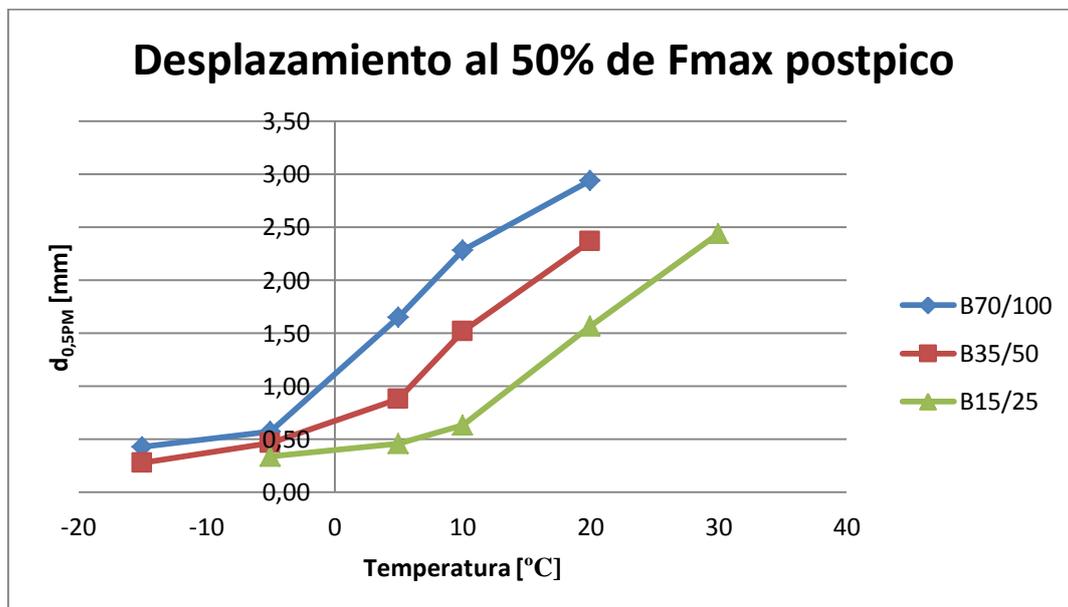


Figura 44. Representación de los valores medios del Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico [mm] para cada betún y temperatura de ensayo.



A bajas temperaturas el desplazamiento al 50% de la carga máxima que representa la ductilidad de la mezcla, es relativamente bajo. Los 3 tipos de betunes tienen valores prácticamente iguales, pero a medida que se aumenta la temperatura de ensayo, aumenta el desplazamiento y se presentan diferencias en todo el rango de temperaturas. Debido a que no hay picos, en este caso no coinciden los valores a una misma temperatura, a no ser que sean bajas.



5. CONCLUSIONES

Las carreteras son un importante ente para el desarrollo económico y social, como se indicaba al principio de este trabajo, y debido a la alta inversión que suponen, se busca hallar una máxima rentabilidad y la manera de preservarlas el mayor tiempo posible. Para conseguir una mayor vida útil, se realizan estudios sobre las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, para evitar su deterioro causado principalmente por el tráfico de los vehículos y las condiciones climatológicas. Sin embargo, una propiedad tan importante como la resistencia a la fisuración hasta ahora ha sido poco analizada en España.

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia que tiene el tipo de betún y la temperatura en la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas mediante la aplicación de un ensayo a tracción directa, el ensayo Fénix. Este ensayo permite determinar los parámetros que representan las principales propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas, como son la rigidez y capacidad de deformación, entre otras.

Para realizar esta investigación, se ha aplicado una metodología de trabajo experimental y se han determinado los parámetros relacionados con el comportamiento frente a la fisuración. Por último, se ha desarrollado un estudio estadístico para poder evaluar la fiabilidad de los resultados.

Para aislar la influencia del betún, se ha utilizado una mezcla patrón, sin filler ni árido fino y 3 tipos de betún de diferente penetración (duro, medio y blando) con un porcentaje constante en peso sobre la mezcla. Para evaluar la influencia de la temperatura, el ensayo se ha realizado en un amplio rango de temperaturas, entre -15 y 30°C.



Después de realizar los ensayos se puede concluir que el ensayo Fénix es un ensayo rápido y sencillo, que puede realizarse a diferentes temperaturas, utilizando el mismo equipo que para realizar otros tipos de ensayos.

Tras evaluar los resultados obtenidos, se ha podido constatar que el ensayo Fénix es un ensayo lo suficientemente sensible, para diferenciar de manera clara cómo se comporta cada uno de los 3 betunes.

La sensibilidad de este ensayo también se ha puesto de manifiesto en cuanto a las diversas temperaturas a las que ha sido aplicado, reflejando la importancia que tiene realizar estos ensayos en un amplio rango de temperaturas. Para algunos de los parámetros, los valores que se han obtenido para diferentes betunes son iguales para una cierta temperatura; si no se hubiera ensayado a más temperaturas se habría pasado por alto la importancia de su influencia.

A modo de breve resumen de los parámetros obtenidos:

- La resistencia a tracción (RT) aumenta a medida que disminuye la temperatura de ensayo, para cualquiera de los 3 betunes ensayados, aunque no presenta importantes diferencias en cuanto al tipo de betún.
- El índice de rigidez a tracción (IRT) también aumenta conforme disminuye la temperatura de ensayo; entre el betún blando y el medio la diferencia es poco sensible, pero notable respecto el duro.
- La energía de fractura (G_d) es diferente para cada tipo de betún, pero a medida que aumenta la temperatura siempre aumenta y posteriormente disminuye, presentando un máximo.
- El índice de tenacidad (I_t) también es diferente para cada tipo de betún, a medida que la temperatura aumenta primero el resultado aumenta hasta llegar a un máximo y luego disminuye.



- El desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$) aumenta a medida que la temperatura aumenta para los 3 tipos de betún, de una manera prácticamente paralela.

Cabe destacar que a bajas temperaturas los 3 tipos de betún tienen el mismo comportamiento y es crítico. El índice de rigidez a tracción de los diferentes betunes es elevado, mientras que la energía de fractura, el índice de tenacidad y el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico son pequeños, lo que indica que a estas temperaturas los betunes tienen un comportamiento más crítico en cuanto a la fisuración ya que se rigidizan y pierden su ductilidad.

Por último, se ha comprobado que la dispersión de los resultados es aceptable, por lo que los datos obtenidos son lo suficientemente representativos como para avalar estas conclusiones.



REFERENCIAS

Referencias Bibliográficas

- [1] Pérez F., R. Miró y A. Martínez. Estudio, Diseño y Control de Mezclas Bituminosas. 1º edición, Ediciones Asociación Española de la Carretera, Madrid, España, 2006.
- [2] G. Valdés. Evaluación del proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental - Ensayo Fénix -. Tesis Doctoral, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2011.
- [3] Kennedy, T.W. Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test. Asphalt paving technology 1977. Proceedings Association of Asphalt Paving Technical Sessions (San Antonio, Texas), Vol. 46, 132-149.
- [4] Richard Kim Y., H. Wen. Fracture Energy from Indirect Tension Testing. Proceedings Association of Association of Asphalt Paving Technologists, Colorado Springs, Colorado, 2002. The Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 71, 904-950.
- [5] Andrew A. Cascione, A. A., Williams, R. C., Buttlar, W. G., Ahmed, S., Hill, B., Haugen, D. S., & Gillen, S. Laboratory evaluation of field produced hot mix asphalt containing post-consumer recycled asphalt shingles and fractionated recycled asphalt pavement. Asphalt paving technology 2011. In Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, Vol. 80, 377-414.
- [6] Hasan Ozer, Al-Qadim Carpenter, Aurangzeb, Roberts, Trepanier. Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test.. Evaluation of RAP Impact on Hot-Mix Asphalt Design and Performance. Asphalt paving technology 1977. Proceedings Association of Asphalt Paving Technical Sessions (San Antonio, Texas), Vol. 46, 317-351.



- [7] Eshan V. Dave, Behzad Behnia, Sarfraz Ahmed, William G. Buttlar and Henrique Reis. Low Temperature Fracture Evaluation of Asphalt Mixtures Using Mechanical Testing and Acoustic Emissions Techniques. *Asphalt paving technology* 2011, Vol. 80, 193-226.
- [8] S. H. Song, M. P. Wagoner, G. H. Paulino, and W. G. Buttlar (2008). "delta(25) Crack opening displacement parameter in cohesive zone models: experiments and simulations in asphalt concrete," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*. Vol. 31, No. 10, 850–856.
- [9] Wagoner M., W. Buttlar and G. Paulino. Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, *Experimental Mechanics*, Vol. 45, N° 3, pp 270-277, 2005.
- [10] Brian K. Egan, Baoshan Huang William R. Kingery, Zhixiang Zhang and Gang Zuo Laboratory Study of Fatigue Characteristics of HMA Surface Mixtures Containing RAP. Transportation Research Board, Transportation Research Record, Annual Meeting, 2004.
- [11] Miró R., A. Martínez, F. Pérez-Jiménez, R. Botella. Analysis of cracking resistance of bituminous mixtures using Fénix test. *Construction and Building Materials* 59, 2014, pp. 32–38.
- [12] Pérez Jiménez, Valdés, Miró Recasens, Botella. Fénix Test: Development of a new test procedure for evaluation cracking resistance in bituminous mixtures. Submitted for Presentation and Publication at the 2010 Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- [13] Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R. Nueva metodología para caracterización de ligantes asfálticos: el Método UCL. *Carreteras*, nº 73, pp 27-48. Octubre-Noviembre, 1994.
- [14] Pérez Jiménez, F.E.; Miró Recasens, R.; Khalid, H.A.; Walsh, C.M(1998). Procedimientos funcionales para la caracterización de ligantes. *Métodos SHRP y UCL*. Revista Carreteras No.100.



[15] Perez, F.; Miro, R. Nuevos ensayos para la caracterización de ligantes y mezclas asfálticas. Carreteras, 2002, no. 122, p. 28.

Otra bibliografía consultada

- Teresa López-Montero, Rodrigo Miró. Differences in cracking resistance of asphalt mixtures due to ageing and moisture damage. Construction and Building Materials 112 (2016) 299–306.

- Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A. “Caracterización de los ligantes bituminosos a partir de su tenacidad y energía de rotura”. XIII Congreso IberoLatinoamericano del Asfalto, San José, Costa Rica, 2005.

- E. Garrote Villar. Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas. Tesina, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2006.

- Pérez F., R. Miró y A. Martínez. Estudio, Diseño y Control de Mezclas Bituminosas. 1º edición, Ediciones Asociación Española de la Carretera, Madrid, España, 2006.

- Pérez F., R. Miró, A. Martínez y E. Garrote. Nuevo Procedimiento de Ensayo para Evaluar la Tenacidad de las Mezclas Bituminosas. Revista Carreteras, Nº 153, 2007.

- Miró R., F. Pérez-Jiménez, A. Martínez, R. Botella. Criterios de diseño para diferentes tipos de mezclas bituminosas basado en el ensayo Fénix. Universidad Politécnica de Catalunya. XI JORNADA NACIONAL DE ASEFMA, 2016.



Normas consultadas

- UNE-EN 12697-23. Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.
- ASTM D7313-07. Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry
- UNE-EN 993-1. Métodos de ensayo para productos refractarios conformados densos. Parte 1: Determinación de la densidad aparente, de la porosidad abierta y de la porosidad total.
- UNE-EN 12697-5. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima.
- 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.

Páginas web consultadas:

- www.cia.gov
- www.fomento.gob.es
- www.aecarretera.com
- www.aacarreteras.org.ar
- www.cedex.es
- www.pavementinteractive.org