FIRMADO

NOTA TÉCNICA NT 01/2022

Sobre la utilización del Ensayo Fénix en el control de calidad de las obras de firmes con mezclas bituminosas

El diseño de las mezclas bituminosas en caliente, su control, y el seguimiento y estudio de la evolución a lo largo de tiempo de sus características y desempeño constituyen un ciclo -en el que la innovación es un factor de primer orden- del que pueden derivarse cambios de tipo incremental, consistentes en cambios a pequeña escala, que se van acumulando con el paso del tiempo a medida que se van comprobando su bondad y eficacia, o cambios transformacionales, consistentes en cambios muy significativos que marcan el comienzo de nuevas etapas.

Así, todo nuevo método de control de mezclas bituminosas que sirva para caracterizar, conocer y comparar la evolución de características consideradas esenciales del producto durante su ciclo de vida bajo la acción de las cargas del tráfico y del clima, servirá para un mejor diseño pues, a medida que se profundiza en el conocimiento del comportamiento ante las distintas circunstancias, se podrán establecer mejor las estrategias de gestión, así como determinar los ajustes necesarios en el diseño de cada caso, siempre con el objetivo de dar la respuesta más eficiente y, si es posible, mejorar las prestaciones.

El campo de las mezclas bituminosas en caliente ha sido objeto en las últimas décadas de numerosas novedades y cambios que han aportado grandes mejoras en todas las fases de su diseño, fabricación y puesta en obra y que, entre otras consecuencias, ha conllevado el desarrollo de nuevas familias de mezclas que han venido a incrementar el abanico de posibles soluciones a adoptar en función de las prioridades, objetivos y circunstancias que puedan darse.

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (1 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (2 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

Ahora bien, si nos centramos en su diseño se puede observar que, conceptualmente, éste se ha mantenido bastante estable ya que parte de unos materiales, áridos y ligante, que cumplan las características previamente establecidas en el PG-3, en función del tráfico y el clima, en las características volumétricas de la mezcla y en el cumplimiento de determinados requisitos respecto a la susceptibilidad al agua, las deformaciones plásticas, y, en su caso, al valor del módulo dinámico. En esencia, el planteamiento es que, mediante los correspondientes ensayos, se midan una serie propiedades que, de forma más o menos directa, representan las características del desempeño deseado. El diseño considerado óptimo en cada caso es el que ofrezca un mejor equilibrio entre las diferentes propiedades consideradas.

Mediante esta Nota Técnica y la colaboración y aportación de los Servicios Centrales y de las Demarcaciones de la Dirección General de Carreteras, se da inicio a un nuevo ciclo con el objetivo de profundizar en el conocimiento del comportamiento de las mezclas, a diferentes temperaturas, en lo referente a su resistencia frente a la propagación de fisuras, su ductilidad y su energía de cohesión interna, para poder caracterizar su resistencia y deformabilidad y, una vez logrado, desarrollar, como meta final del ciclo, la correspondiente normativa técnica que incorpore tal conocimiento al diseño de las mezclas.

Así pues, el primer paso ha de ser necesariamente el contar con un ensayo que caracterice de manera bien calibrada tales propiedades. El "Ensayo Fénix", desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña y normalizado por el CEDEX mediante la norma NLT 383/20, viene, precisamente, a determinar el comportamiento de las mezclas bituminosas en cuanto a resistencia y deformabilidad a diferentes temperaturas.

Esta es una cuestión que debe ser abordada de manera amplia pues las conclusiones que se obtengan de las diversas experiencias y conocimientos adquiridos serán de aplicación tanto a firmes de nueva construcción como rehabilitados para su mejor diseño. En este sentido, es también de destacar que ello permitirá establecer los límites adecuados en las mezclas recicladas para tener en cuenta los aspectos ligados a su rigidez.

Todo lo anterior está en consonancia con las líneas de actuación de la Dirección General de Carreteras que priorizan el apoyo a la innovación y desarrollo de nuevos materiales, equipos y procesos que puedan beneficiar la necesaria sostenibilidad, resiliencia y durabilidad de la Red de Carreteras del Estado (RCE) ya que, en ésta, los tráficos son elevados y la climatología muy diversa. En el marco de ello se redacta esta Nota Técnica con el fin de promover el conocimiento y la utilización generalizada del Ensayo Fénix en mezclas de nueva fabricación, así como en recicladas, y que los resultados obtenidos sean compartidos con la Dirección Técnica.

Efectivamente, es importante, no solo que en adelante se realicen estos ensayos, sino que deben cubrir en lo posible todo tipo de actuaciones y

FIRMADO

circunstancias por lo que es imprescindible la aportación de todas las Demarcaciones de Carreteras mediante su documentación y facilitación a la Dirección Técnica para su análisis y fijación de los valores de los parámetros que incorporar a la normativa, y para su puesta a disposición de la comunidad científica dedicada al estudio de las mezclas bituminosas y su comportamiento y facilitar así nuevos avances en este campo.

Se incluye un anejo, preparado por los doctores Félix Pérez y Rodrigo Miró, catedráticos de la Universidad Politécnica de Cataluña, que explica detalladamente cómo se ha aplicado el procedimiento para la caracterización y control de ejecución de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo Fénix, sin perjuicio de la mencionada norma NLT-383/20 del CEDEX "Evaluación de la resistencia, tenacidad y energía de rotura de las mezclas bituminosas mediante el ensayo Fénix" que es referencia obligada.

Este documento ha sido redactado por técnicos de la Dirección General de Carreteras:

Valverde Jiménez Ajo, ITOP, Dirección Técnica
José Manuel Blanco Segarra, ICCPE, Demarcación CE en Extremadura
Javier Payan de Tejada, ICCPE, Demarcación CE en Castilla y León Occidental

Ha contado con la participación de:
Anna París Madrona, Ing. De Montes, Parma Ingeniería
Alberto Bardesi Orúe-Echevarría, ICCP, Parma Ingeniería
Félix Pérez Jiménez, ICCP, Universidad Politécnica de Cataluña
Rodrigo Miró, ICCP, Universidad Politécnica de Cataluña

Además, han intervenido Jose Del Cerro Grau, Jesús Iranzo Sanz, Adolfo Güell Cancela y Alvaro Rodriguez Aguiar, ICCP de la DGC y Javier Loma Lozano, Director de Tecnología y Desarrollo, Padecasa y Marisol Barral Vázquez, Responsable de I+D+i y Control de Calidad, Grupo Campezo.

Ha sido aprobado por Mª Rosario Cornejo Arribas, ICCPE, Directora Técnica de la Dirección General de Carreteras en mayo de 2022.

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (3 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (4 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

1 GENERALIDADES DEL ENSAYO

El ensayo FÉNIX, desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña y normalizado por el CEDEX mediante la norma NLT 383/20, permite determinar el comportamiento de las mezclas bituminosas en cuanto a resistencia y deformabilidad a diferentes temperaturas. Con ello se podrá conocer cómo varía el comportamiento de una mezcla con la temperatura, lo que es importante para valorar su adecuación al entorno climático en que se va a colocar, a la vez que se podrá comparar el comportamiento de mezclas con formulaciones diferentes y discernir cuál de ellas se adapta mejor al clima y a la forma en la que el firme trabaja.

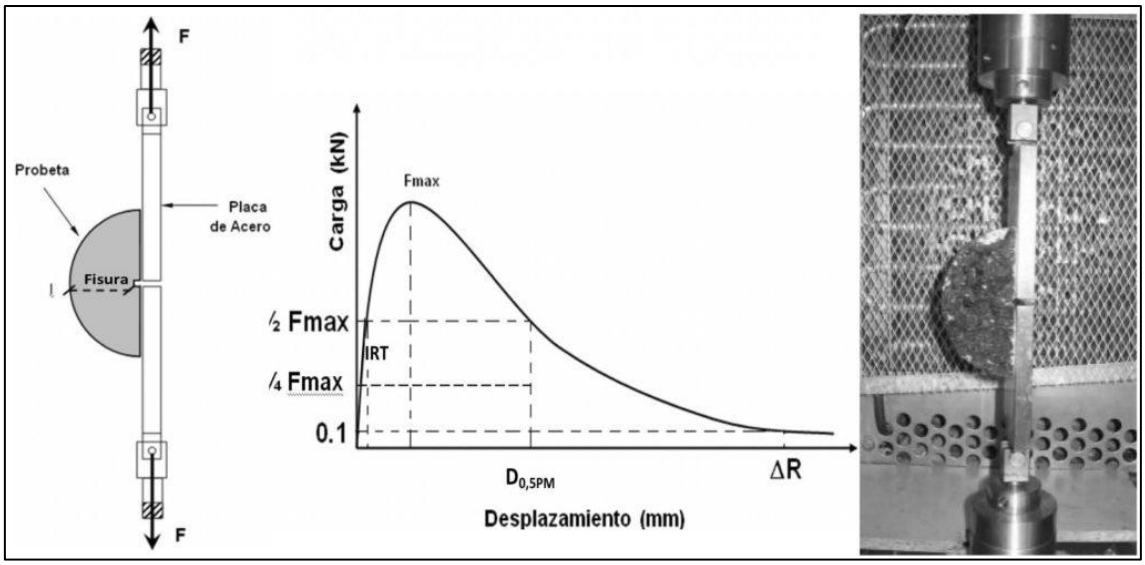
A efectos de control de calidad, el ensayo, en este caso sobre probetas preparadas en planta y testigos extraídos de obra, permitirá determinar las propiedades de la mezcla construida y comparar estas con las características del proyecto lo que nos indicará si la mezcla se ha colocado en condiciones adecuadas o si, por el contrario, ha podido haber excesos en la temperatura de fabricación, defectos de compactación u otros, y, en su caso, poder obtener un índice de calidad en relación con la mezcla aprobada.

El ensayo mide el esfuerzo de tracción directa aplicado para producir su rotura, con el objetivo de valorar la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas, pudiendo considerarse variables tales como la temperatura, la composición de la mezcla, y los efectos del envejecimiento durante su vida útil. Con ello, se obtienen las características mecánicas de la probeta cuando la mezcla está en buen estado (rigidez de la mezcla y resistencia) y también determinar cómo el betún es capaz de mantener la resistencia de la mezcla al irse deformando y propagándose la grieta desde la ranura creada en la base de la probeta (tenacidad). Para ello, a medida que va incrementándose la deformación, se mide la carga que es capaz de resistir.

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (5 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

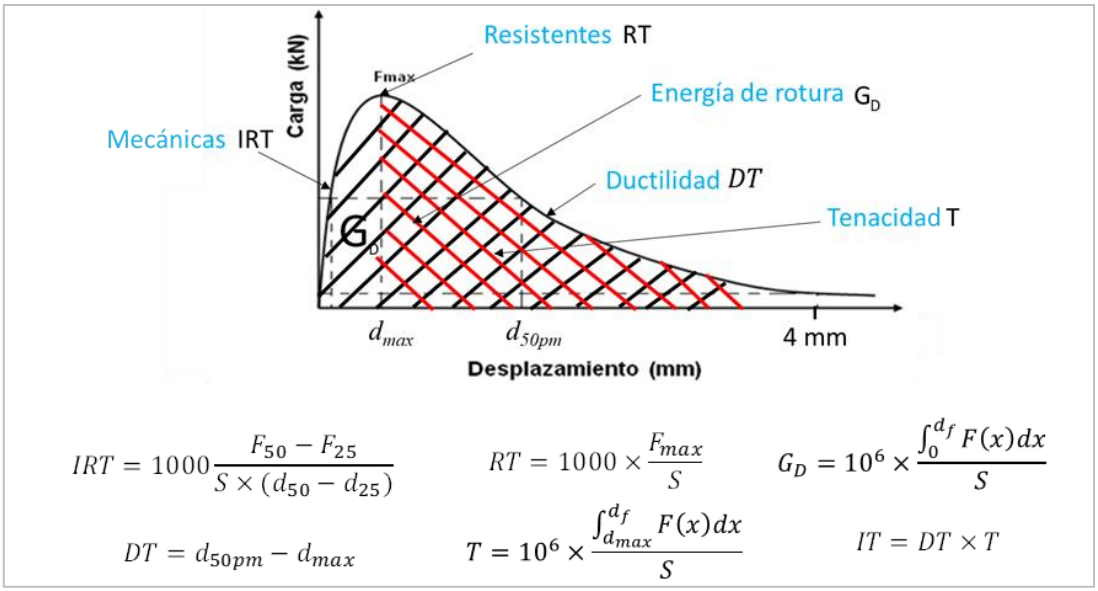
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA



Curva carga-desplazamiento Ensayo Fénix. Fuente NLT 383/20.

En la curva carga-desplazamiento, inicialmente se produce un aumento casi lineal del esfuerzo aplicado, que depende de la rigidez de la mezcla. En el ensayo Fénix se determina un índice de rigidez a tracción, IRT, que es la pendiente de la curva carga-desplazamiento entre el 25 y el 50 % de la carga máxima. Por su parte, la resistencia máxima de la curva carga-desplazamiento está asociada con la cohesión proporcionada por el mástico (polvo mineral + betún).

La cohesión de la mezcla está relacionada con la energía empleada por la máquina para la rotura total de la probeta. Esta energía disipada (GD) se corresponde con la integral del área bajo la curva de carga-desplazamiento respecto de la superficie de fractura. Cuanto mayor es GD, mayor es la resistencia a la fisuración de la mezcla. Este parámetro tiene en cuenta todo el proceso de rotura del material tras la carga máxima, lo que representa la respuesta dúctil de la mezcla bituminosa.



FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (6 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

Para el diseño de mezclas resistentes a la fisuración es importante no sólo una alta energía disipada, sino que ésta se manifieste especialmente después de la carga máxima, lo que indica que la mezcla es capaz de alcanzar una mayor deformación hasta su rotura, manteniendo parte de su resistencia desde que se inicia su fallo hasta que éste realmente se produce.

El ensayo es un procedimiento sencillo, que aporta varios parámetros muy útiles (ver resumen en la figura) para la caracterización y control de calidad de las mezclas bituminosas. La combinación de estos parámetros permite analizar en el diagrama Fénix (curvas térmicas tensión-ductilidad de las mezclas fabricadas) la variación de las características de resistencia y ductilidad de la mezcla en función de la temperatura como se expone en el Anejo 1 para diferentes tipologías de mezclas bituminosas.

2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN OBRAS DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS

El principal objetivo de este Nota Técnica es iniciar la aplicación de este procedimiento de caracterización y control de ejecución de mezclas bituminosas sea en obras de firmes de nueva construcción o en rehabilitaciones de los existentes con el objeto de ir ganando experiencia sobre su aplicabilidad y su posible inclusión en las especificaciones. Para ello, en las distintas fases de ejecución de las obras se realizarán los siguientes ensayos:

- Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.

  Además de lo indicado en los correspondientes epígrafes de los artículos 542, 543 y 544 del PG-3, y del artículo 22 del PG-4, la fórmula de trabajo estudiada en laboratorio y verificada en la central de fabricación incluirá los resultados del ensayo Fénix a +20, +5 y -5 °C señalando los valores de:

  - **IRT:** Indicador de Rigidez a Tracción (MPa/mm)
  - **RT:** Resistencia a Tracción (MPa)
  - **DT:** Desplazamiento de tenacidad (mm),
  - **T:** Tenacidad (J/m^2)
  - **S:** Superficie transversal de carga (mm^2)

  Se incluirá, además, la curva característica Fénix.

FIRMADO

- Control de fabricación.

  A efectos de la obtención de experiencia y valores de referencia para cada tipo de mezcla, se considera suficiente definir como lote la cantidad de mezcla extendida y compactada por capa en una jornada de trabajo.

  Para cada lote de mezcla, se determinará la curva característica de la mezcla fabricada a partir del ensayo de un mínimo de cuatro muestras (obtenidas dividiendo longitudinalmente por la mitad dos probetas) por cada temperatura de ensayo. Ambas curvas deberán haber sido obtenidas con el mismo procedimiento de compactación y con mezcla recién fabricada, nunca recalentada.

- Control de recepción de la unidad terminada.

  De la capa correspondiente a cada lote (extensión de un día de trabajo) se extraerán tres grupos de dos testigos, situadas en tres zonas aproximadamente equidistantes del lote: principio, mitad y final del tramo. Los testigos, divididos por la mitad, proporcionarán cuatro muestras por zona, que se ensayarán a +5 y +20 ºC, dos muestras por temperatura. Se promediarán los resultados de los ensayos de las tres zonas por temperaturas, para así tener la curva característica de los testigos.

Con base en la experiencia existente, en la tabla siguiente se establecen unos valores de referencia que pueden servir de orientación al Contratista y al Director de Obra en relación con los resultados del ensayo Fénix.

El valor de desplazamiento a tracción (DT) es característico de la ductilidad de la mezcla. Se busca que las mezclas del tipo AC no sean frágiles (límite de 0,25 mm a 5 ºC) y que las mezclas discontinuas BBTM y SMA sean dúctiles (límite de 0,5 mm a 5 ºC).

Por otro lado, el valor del producto de resistencia a tracción (RT) por desplazamiento a tracción (DT) es característico de la energía de rotura y la tenacidad de la mezcla y su posición en el diagrama del ensayo Fénix es muy significativa del comportamiento de la mezcla.

Se han excluido, por sus particularidades, las mezclas de alto módulo (AM) y las drenantes (PA).

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (7 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (8 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

Tabla 1. Valores de referencia del ensayo Fénix (NLT-383/20)

Fase de obra	Característica mecánica	Temperatura de ensayo	Ud.	Tipo de mezcla	
				AC (1)	BBTM, SMA (2)
Fórmula de trabajo (FT) (3)	DT	5 °C	mm	≥ 0,25	≥ 0,5
	RTxDT	5 y 20 °C (4)	MPa·mm	≥ 0,20	≥ 0,30
Control de fabricación (F)	DT, respecto a FT	5 °C	%	≥ 90	≥ 80
	RTxDT, respecto a FT	5 y 20 °C (4)	%	≥ 80	≥ 90
Control sobre testigos	RT, respecto a F	5 y 20 °C (4)	%	≥ 65	
	RTxDT, respecto a F	5 y 20 °C (4)	%	≥ 80	

(1): Referidas a probetas sin recalentar compactadas por impacto, 75 golpes por cara
(2): Referidas a probetas sin recalentar compactadas por impacto, 50 golpes por cara
(3): Datos obtenidos sobre probetas fabricadas en laboratorio
(4): Se determinarán los valores a ambas temperaturas para todas las mezclas, pero en el caso de las mezclas AC el valor de referencia será a 5 °C para mezclas con betunes 50/70 y betunes modificados PMB 45/80-(60-65-75) y PMB-75/130-60; y a 20 °C para mezclas con 35/50 y PMB 25/55-65

Notas finales para la realización de los ensayos:

- Se seguirá fielmente lo indicado en el NLT-383/20.
- Es importante que la mezcla no sufra envejecimiento excesivo antes de la confección de las probetas. A tal efecto, las probetas se prepararán lo más rápidamente posible con las muestras tomadas en la planta de fabricación. Si no se dispusiera de un laboratorio equipado para ello a pie de planta, las muestras se enviarán a laboratorio en recipientes que conserven lo mejor posible la temperatura de la mezcla y a la llegada al laboratorio se introducirán en estufa durante 75 y 90 minutos a la temperatura de compactación, evitando sobrecalentamientos, y se compactarán las probetas de forma inmediata.
- Se deberá prestar atención a las indicaciones del suministrador de la resina de pegado (Nota: a título de ejemplo *Sikadur®-31 EF ó -31+*) de las probetas a las placas metálicas para asegurar una correcta adherencia.
- Aunque el empleo de prensas universales para la realización de este ensayo es viable, se recomienda el empleo de equipos específicos, así como un cuidadoso calibrado para evitar mediciones erróneas.

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (9 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM0250E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (10 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

ANEJO DE LA NOTA TÉCNICA 01/2022

FIRMADO

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA APLICACIÓN DEL ENSAYO Y DIAGRAMA FÉNIX A LA CARACTERIZACIÓN Y CONTROL DE EJECUCIÓN DE LAS MEZCLAS USADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE DOS TRAMOS DEL FIRME DE LA AUTOVÍA SG-20

1 PRESENTACIÓN

Se recoge, a modo de ejemplo, la aplicación del ensayo y diagrama Fénix a la identificación y caracterización de las mezclas empleadas en la construcción de dos tramos del firme de la autovía de circunvalación de Segovia construidos por las empresas Padecasa y Tecnofirmes en el año 2019. Se emplearon tres tipos de mezclas: una mezcla G en la capa de base (AC32 base G), otra tipo S en la capa intermedia (AC22 bin S) y una M en la capa de rodadura (BBTM11 B).

Previo al análisis de resultados se comenta como afecta el tipo de betún y composición de la mezcla en los resultados del ensayo Fénix y la metodología seguida a la hora de establecer unos valores de referencia a exigir a los diferentes tipos de mezcla, teniendo en cuenta también la climatología de la zona donde van a ser usadas.

La caracterización de estas mezclas se llevó a cabo a partir de probetas fabricadas en laboratorio y de testigos extraídos en obra. Las probetas fueron fabricadas por impacto en laboratorio con mezcla recién fabricada, sin dejarla enfriar, o con mezcla recogida y almacenada para más tarde recalentarla en el momento de fabricar las probetas. Los ensayos fueron hechos a la vez por tres laboratorios (Universidad Politécnica de Cataluña, Padecasa y Campezo).

2 ENSAYO Y DIAGRAMA FÉNIX

La caracterización y diseño de las mezclas bituminosas, hasta ahora, no se ha basado realmente en las propiedades aportadas por el ligante bituminoso, aglomerar y cohesionar los agregados minerales, sino, fundamentalmente, en evitar su deformación, no utilizando betunes demasiado blandos o evitando el relleno excesivo de los huecos dejados por el esqueleto mineral.

Estos métodos de diseño no tienen en cuenta el mecanismo de deterioro que realmente se produce en el firme, su fisuración. Aunque se han desarrollado varios ensayos para valorar la resistencia a la fisuración de las mezclas, estos

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (11 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (12 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

ensayos no evalúan adecuadamente la respuesta de la mezcla respecto a su fallo por fisuración.

Se han utilizado ensayos monotónicos que miden la carga máxima de rotura de la mezcla al aplicar un esfuerzo o una deformación a una velocidad constante. Estos ensayos son, en su mayoría, adaptaciones de equipos y procedimientos desarrollados para caracterizar materiales rígidos y elásticos, Figura 1. En el caso de las mezclas bituminosas, es necesario realizarlos a temperaturas bajas o velocidades de aplicación de carga altas, para que la respuesta de éstas sea lo más rígida y elástica posible, de forma que no vaya cambiando la configuración de la probeta durante el ensayo, afectando al estado de esfuerzos o de deformación aplicada.

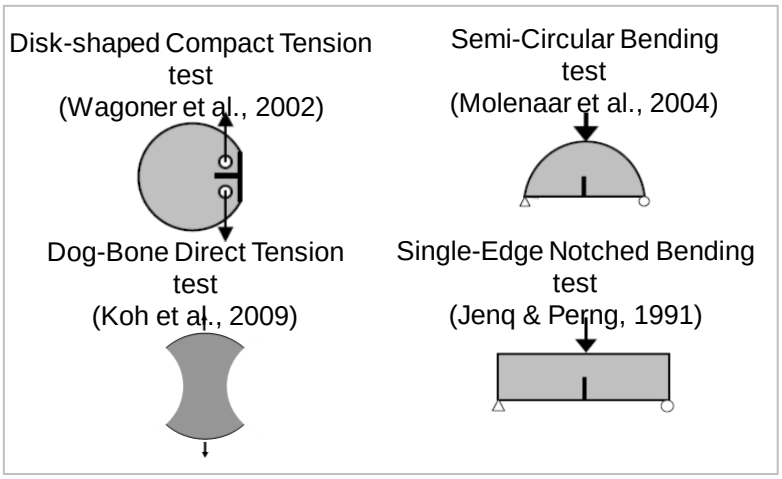


Figura 1. Ensayos para la medida de la resistencia a la fisuración

Con el fin de conocer mejor la respuesta de las mezclas, el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) ha diseñado un ensayo para valorar este comportamiento de la mezcla, el ensayo Fénix.

El ensayo Fénix es un ensayo de tracción esviada en el que se mide el esfuerzo aplicado en la base de una probeta semicilíndrica para producir su rotura. Durante este proceso, a una velocidad de desplazamiento controlada (1mm/min), se va produciendo el fallo de la probeta de forma lenta y progresiva al propagarse la grieta y la fisura radialmente desde la ranura creada en su base, Figura 2.

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (13 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

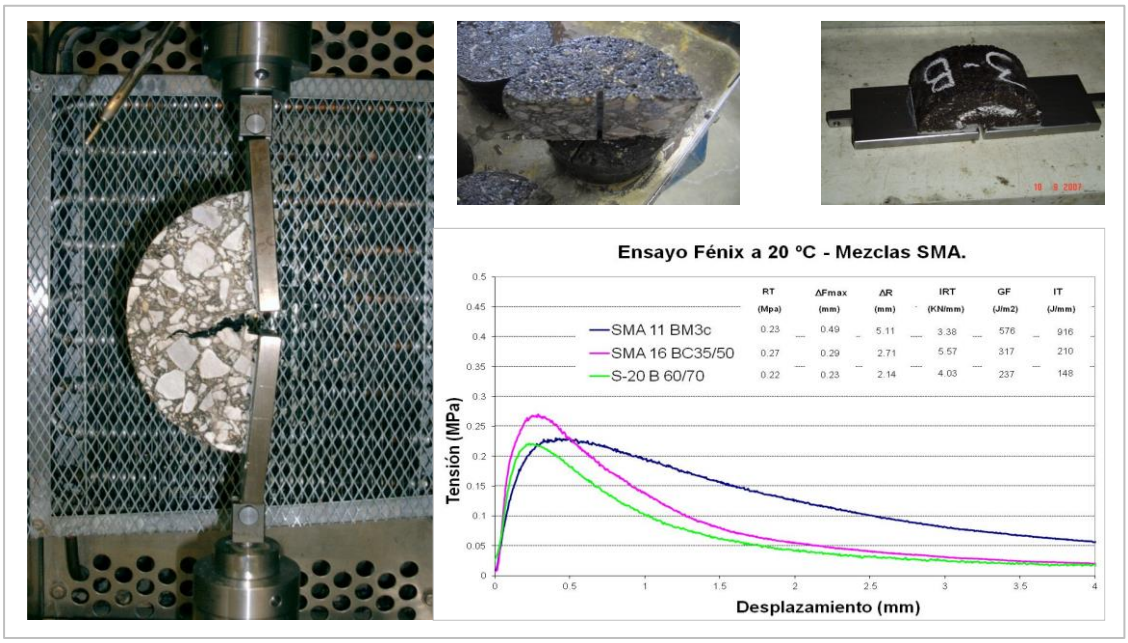


Figura 2. Imágenes del ensayo Fénix y ejemplo de curvas tensión-desplazamiento

Esto permite obtener no sólo las características mecánicas de la probeta cuando la mezcla está en buen estado (rigidez de la mezcla y resistencia), sino cómo el betún es capaz de mantener la resistencia de la mezcla al irse deformando y propagándose la grieta (tenacidad). Para ello, a medida que va incrementándose la deformación, se mide la carga que es capaz de resistir.

A partir de este ensayo se determinan, Figura 3, los siguientes parámetros relacionados con sus propiedades mecánicas y resistentes, con su ductilidad y su energía de rotura:

Mecánicas y resistentes

IRT: Indicador de Rigidez a Tracción (MPa/mm)
RT: Resistencia a Tracción. Máxima carga/Sección de rotura (MPa)

Ductilidad

DT: Desplazamiento de tenacidad (mm)

Energía

GD: Energía Total de Rotura por unidad de superficie (J/m2)
T: Tenacidad. Energía disipada a partir de la carga máxima (J/m2)

El ensayo se realiza a diferentes temperaturas para evaluar la susceptibilidad de la mezcla al cambio de la temperatura y cómo su respuesta pasa de un comportamiento dúctil y tenaz a temperaturas altas a una respuesta más frágil, más resistente y rígida a bajas temperaturas.

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (14 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

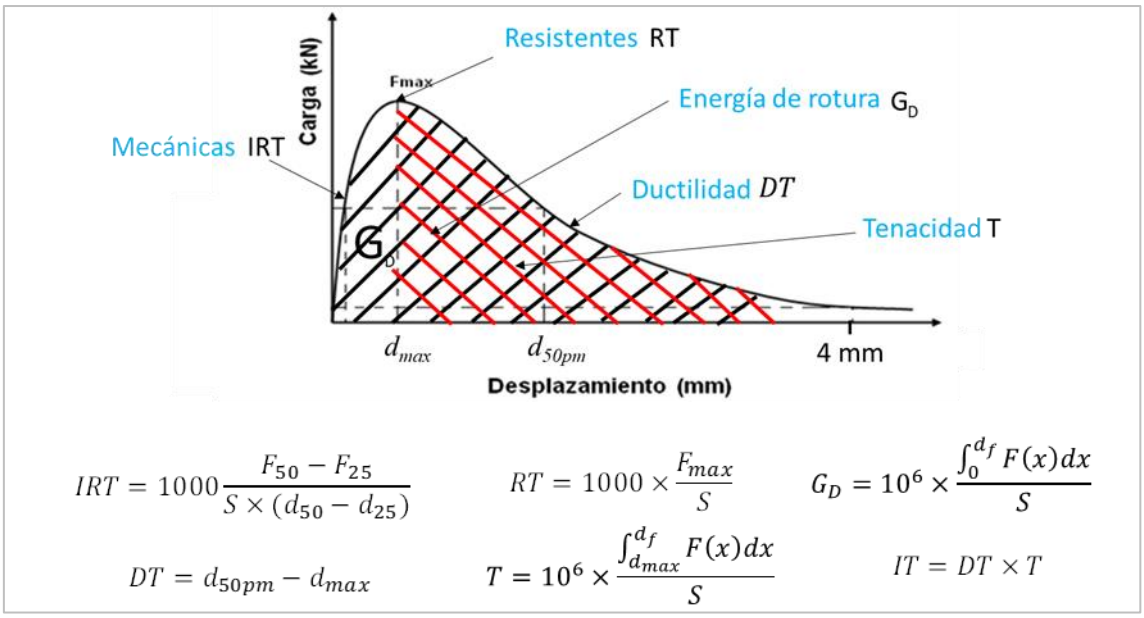


Figura 3. Parámetros obtenidos del ensayo Fénix

Diagrama Fénix:

Para observar mejor el cambio de propiedades se ha diseñado un gráfico especial "Diagrama Fénix" en el que se representa la ductilidad de la mezcla DT (mm), eje de abscisas, frente a su resistencia RT (MPa), en ordenadas, Figura 4. En este gráfico se han colocado también unas curvas del tipo RTxDT = cte ($0{,}25^2$ - rojo; $0{,}5^2$ - verde; $0{,}75^2$ - lila; 1 - azul). Estas curvas permiten valorar la tenacidad de la mezcla ensayada, asimilando el área de la curva de rotura a un triángulo rectángulo, donde la altura es RT y la base dos veces DT, suponiendo que el descenso de la carga es lineal:

$$T \approx (RT \times 2DT) / 2 = RT \times DT$$

En el gráfico también se han considerado unos valores relacionados con la mayor o menor fragilidad que presentan las mezclas en su rotura:

- Respuesta frágil: DT < 0,25 mm
- Respuesta dúctil: DT > 0,50 mm
- Respuesta muy dúctil: DT > 1,25 mm
-

Al colocar en este gráfico los resultados de los ensayos de una mezcla a diferentes temperaturas, normalmente 20, 5 y -5 ºC, se tiene para cada mezcla una curva característica que refleja la variación de sus características de resistencia, ductilidad y tenacidad, lo que permite comparar la respuesta entre mezclas y entre probetas y testigos de una misma mezcla.

La forma y los resultados de la curva característica de cada mezcla están relacionados con su composición y el tipo y porcentaje de betún empleado.

FIRMADO

El tipo y contenido de betún tiene una gran influencia en la tenacidad y ductilidad de la mezcla, como puede observarse en las Figuras 5 y 6, donde se han recogido las curvas características de una mezcla AC fabricada con distintos contenidos de un betún 50/70 y de una mezcla BBTM con un betún modificado con polímero. El aumentar el contenido de betún repercute en un aumento de la ductilidad y tenacidad. El uso de betunes modificados da lugar a mezclas más tenaces.

El tipo y contenido de betún también determina la resistencia a rotura de la mezcla (RT) así como su índice de rigidez (IRT). Estos dos parámetros mecánicos, RT e IRT, al igual que el DT, se ven afectados también por el tipo de mezcla. Mezclas tipo denso o semidenso (AC D y S) son más rígidas y rompen más frágilmente, mientras que mezclas con mayor contenido de huecos (BBTM tipo B) son más flexibles y dúctiles.

Se aprecia también que, así como la resistencia RT y ductilidad DT varían de forma notable con la temperatura, el valor RTxDT, tenacidad, se mantiene con menores variaciones. La curva característica se ubica toda ella en una zona de similar tenacidad. El valor de RTxDT se mantiene o aumenta ligeramente al pasar de 20 a 5 ºC y cae a -5 ºC. Esta caída es más apreciable cuanto más rígida y frágil sea la mezcla a esa temperatura.

En la valoración de estos resultados hay que tener por tanto muy en cuenta la dureza del betún y la climatología donde va a utilizarse la mezcla. Si se mantienen las tres temperaturas de ensayo fijas (20, 5 y -5 ºC) los betunes blandos (50/70) usados en climas más fríos han de mantener una respuesta dúctil y tenaz a las temperaturas más bajas (-5 y 5 ºC), mientras que los betunes duros (35/50) cuyo uso está recomendado para climas más cálidos por problemas de deformaciones plásticas, presentan a temperaturas bajas (-5 y 5 ºC) una respuesta más frágil. Las especificaciones a exigir a una mezcla habrán de considerar por tanto su composición y tipo de betún usado, así como la climatología donde va a ser usada.

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (15 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (16 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

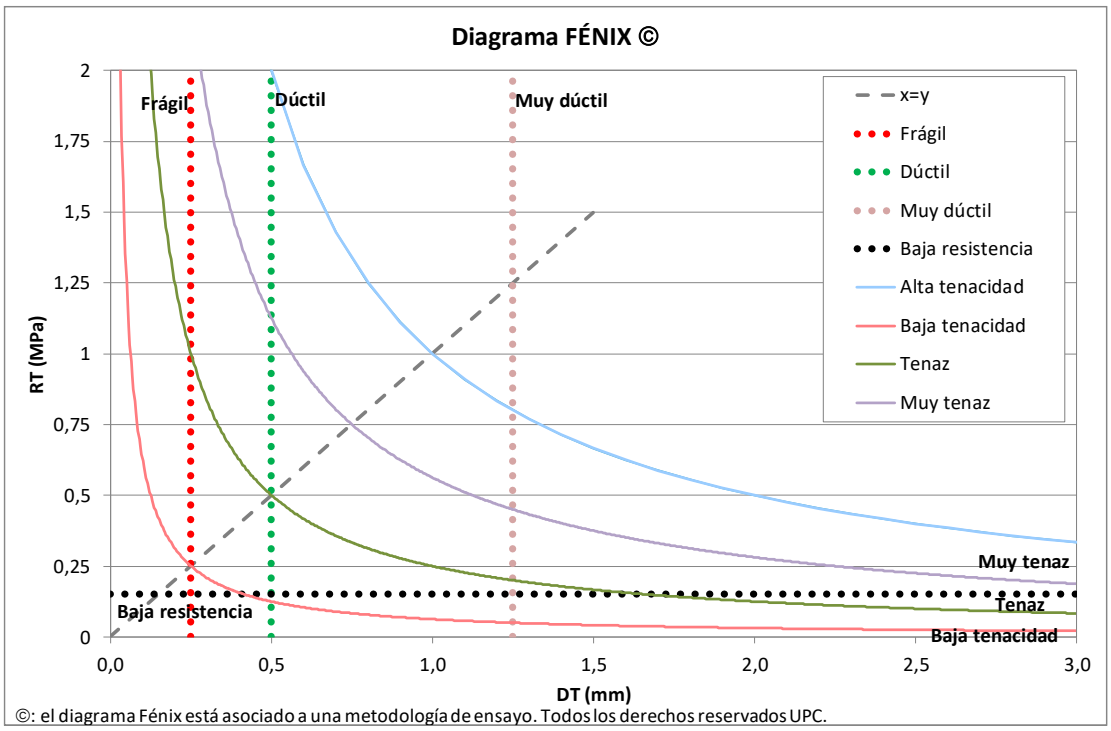


Figura 4. Diagrama Fénix[1]

[1] "*La UPC otorga una licencia gratuita de los derechos de uso del diagrama Fénix a la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*". (*Válido para las figuras de la 5 a la 12 incluidas en esta Nota Técnica.)*

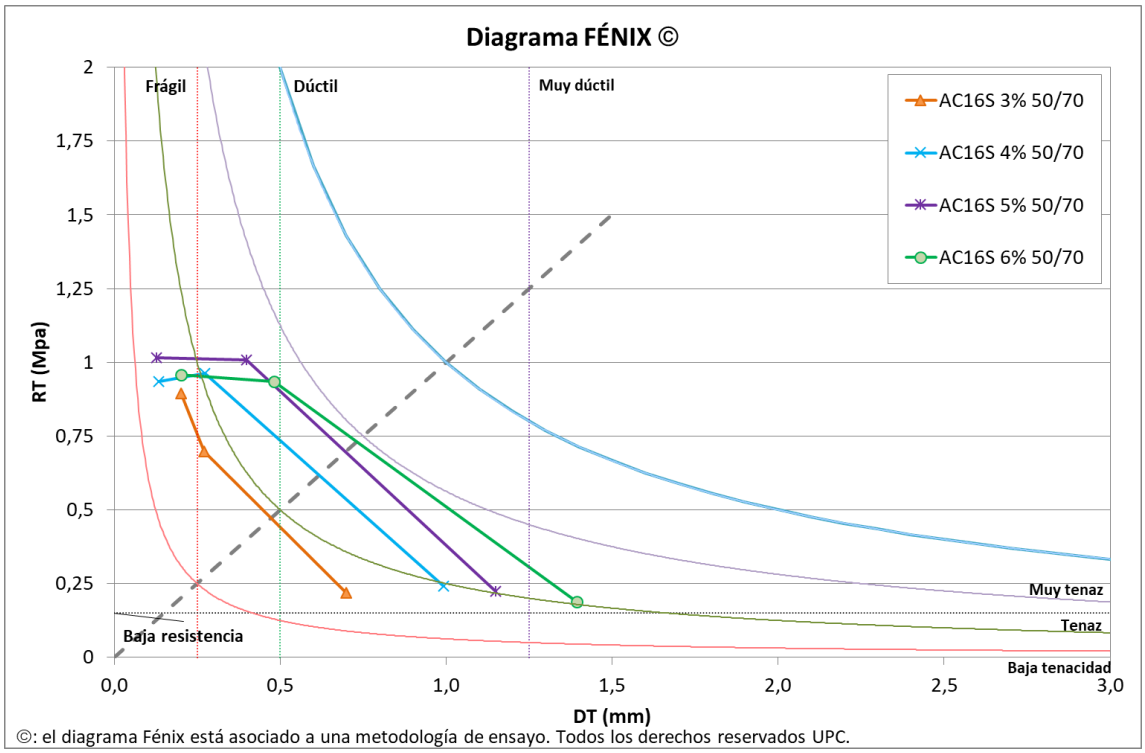


Figura 5. Curvas característica mezclas AC, distintos contenidos de betún

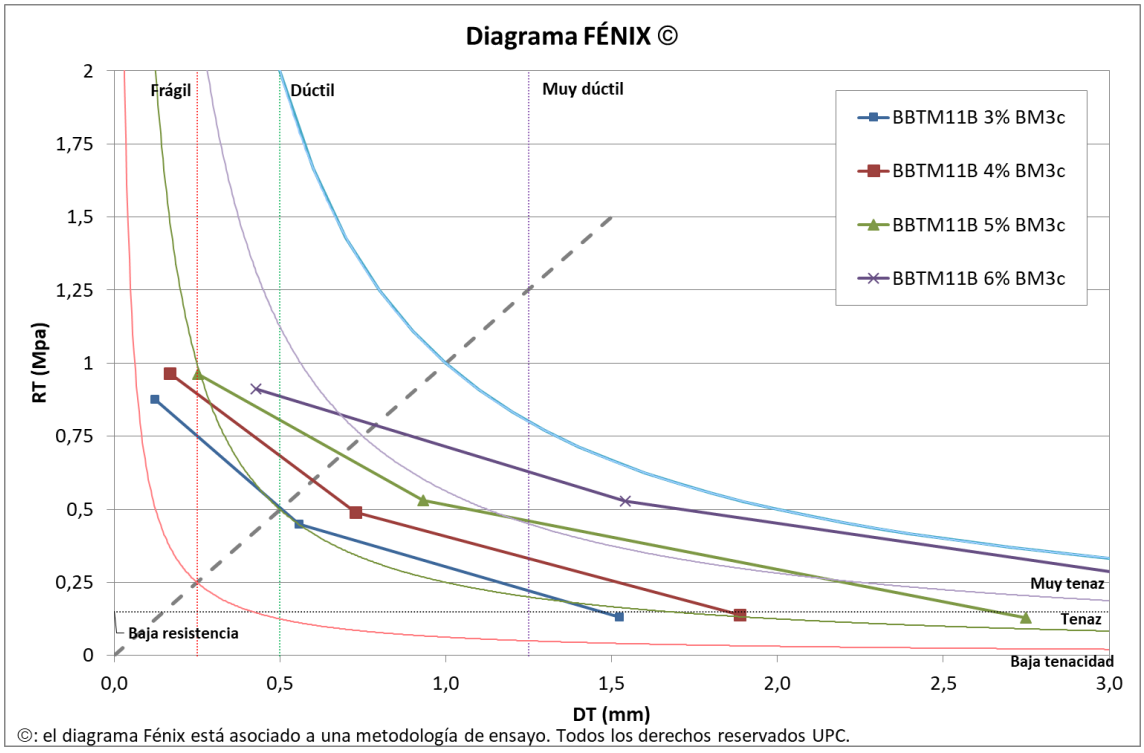


Figura 6. Curvas característica mezclas BBTM B, distintos contenidos de betún

FIRMADO
FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (17 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (18 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

3 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A LA CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS y CONTROL EJECUCIÓN

3.1 Clasificación y caracterización de las mezclas fabricadas. Diferencias en su respuesta y comportamiento

Aunque las mezclas fabricadas por los dos fabricantes son de características similares, el ensayo y diagrama Fénix pone de manifiesto las diferencias que existen para el mismo fabricante, por la tipología y composición de la mezcla y, también, las pequeñas diferencias que entre fabricantes introduce la composición y los materiales utilizados en la fabricación de una misma tipología de mezcla.

Se recogen los resultados de Padecasa para el tramo realizado por su propia empresa y de Campezo para el tramo realizado por Tecnofirmes.

Los dos gráficos Fénix adjuntos, Figura 7, mezclas Padecasa y Figura 8, mezclas Tecnofirmes, muestran la clara diferencia entre las mezclas AC y BBTM B. Estas últimas presentan mayor ductilidad y tenacidad.

Las mezclas tipo AC muestran en el caso de Padecasa una diferencia notable de respuesta. La mezcla tipo G, con un mayor contenido de huecos, se comporta de forma más dúctil. Por el contrario, la mezcla tipo S ofrece una mayor rigidez y una menor ductilidad. Es una mezcla más densa y con un mayor contenido de polvo mineral.

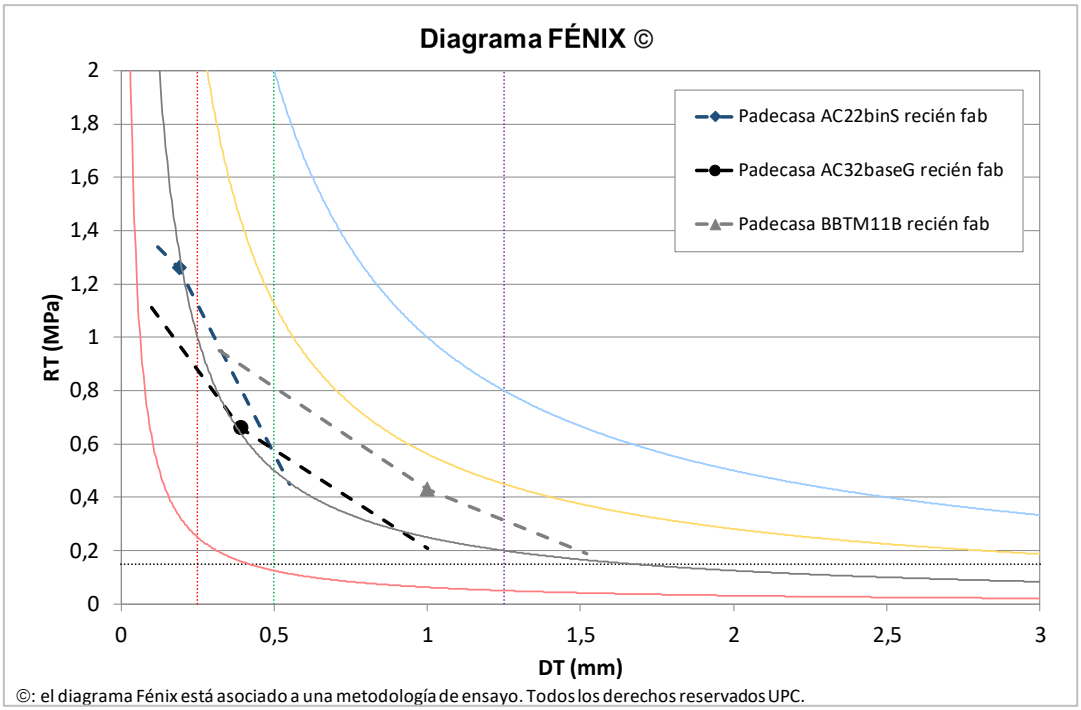


Figura 7. Curvas características mezclas Padecasa, probetas fabricadas sin recalentar la mezcla

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (19 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

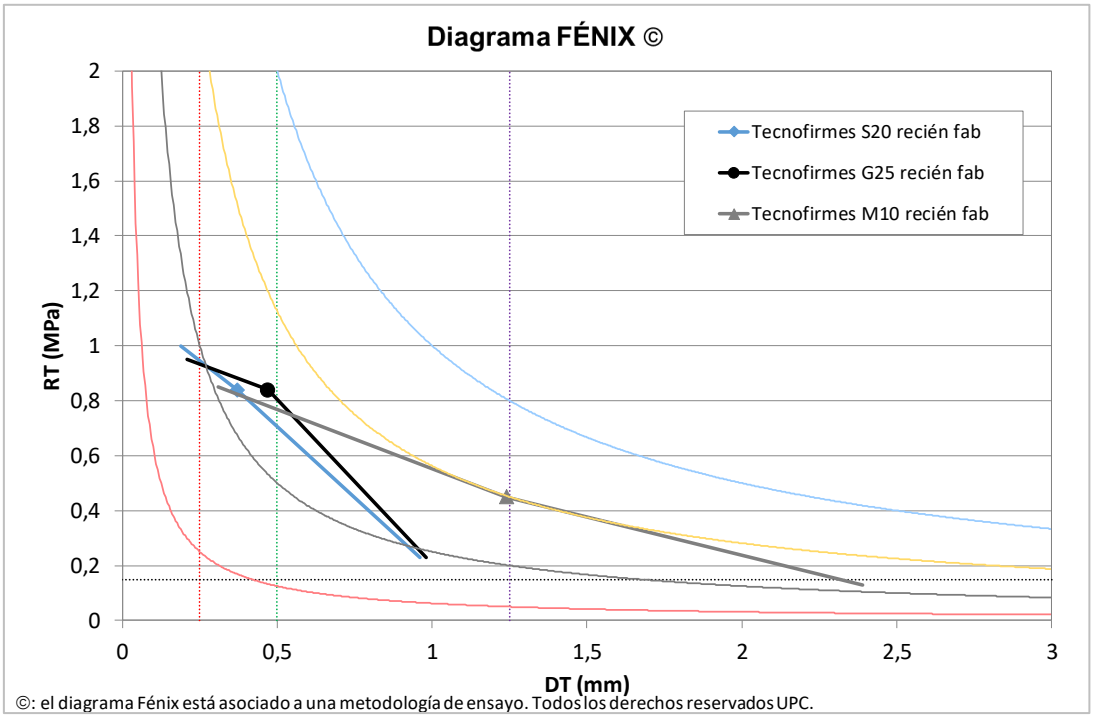


Figura 8. Curvas características mezclas Tecnofirmes, probetas fabricadas sin recalentar la mezcla

Por el contrario, las mezclas AC de Tecnofirmes, tipos S y G, presentan menos diferencias entre ellas, aunque al igual que en el caso anterior, la mezcla G resulta ligeramente más dúctil.

Se observa también que a medida que baja la temperatura la mezcla va llegando a un estado frágil, que apenas varía entre 5 y -5 ºC. El betún va pasando a su estado gel, más estable, y también más rígido y frágil. Los betunes son dispersiones coloidales cuyo estado pasa de sol (dúctil y viscoso) a un estado gel (rígido y frágil) al bajar la temperatura.

Este proceso de gelificación lo causa también el envejecimiento del ligante. Las mezclas envejecidas tienen respecto a las no envejecidas una respuesta más frágil, que se aprecia en el ensayo Fénix, por ser menos dúctiles y tenaces a la misma temperatura de ensayo. Este efecto puede ser observado en las Figuras 9 y 10, donde se representan los resultados del ensayo Fénix para los tres tipos de mezcla evaluados a partir de probetas fabricadas con mezcla recalentada. Todas las mezclas han perdido ductilidad y tenacidad, pero el efecto por envejecimiento se aprecia más cuanto mayor es la ductilidad y tenacidad inicial de la mezcla.

FIRMADO
FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (20 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA

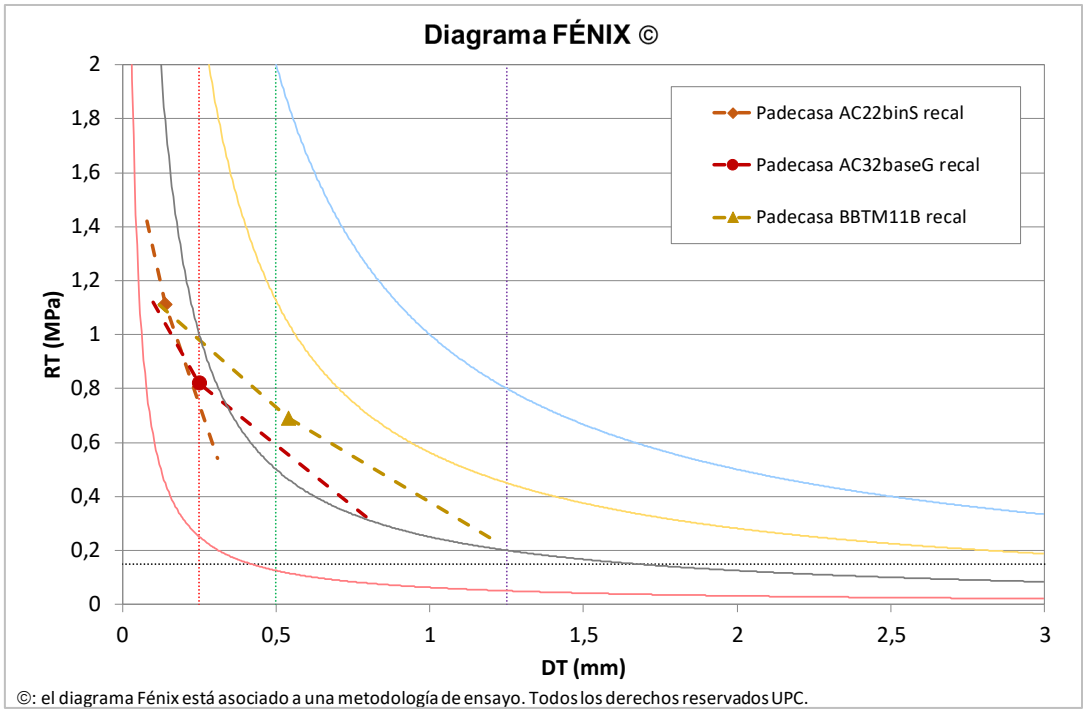


Figura 9. Curvas características mezclas Padecasa, probetas fabricadas recalentando la mezcla

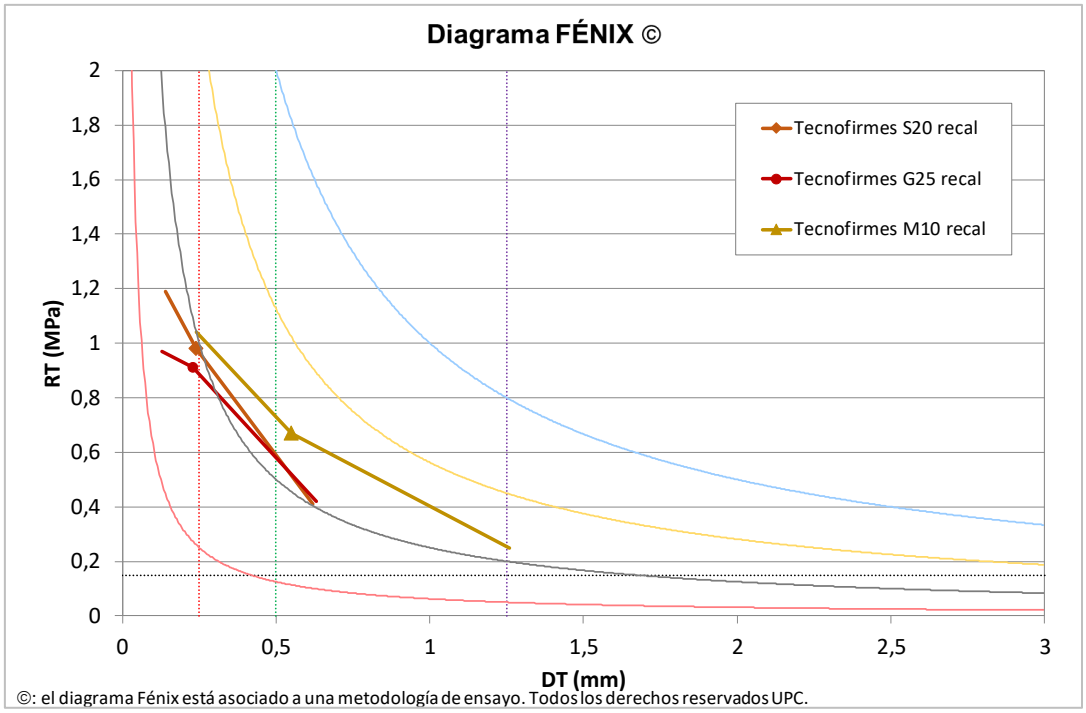


Figura 10. Curvas características mezclas Tecnofirmes, probetas fabricadas recalentando la mezcla

Las curvas características de las mezclas envejecidas siguen mostrando similares diferencias por tipología de mezcla o fabricante.

FIRMADO

3.2 Control del proceso de ejecución

Como procedimiento para la valoración del proceso de ejecución de las mezclas bituminosas, se parte de las curvas características de probetas y testigos del diagrama Fénix. En las Figuras 11 y 12 se han recogido los diagramas Fénix de cada una de las mezclas fabricadas y extendidas.

Al comparar los ensayos de probetas y testigos de una misma mezcla, se observa que los testigos presentan una menor resistencia y una mayor ductilidad. Este efecto es más acusado en ensayos a 20 °C. Aun así, las curvas características de las probetas y de testigos se asemejan y se sitúan en una zona de similar tenacidad. Esto permite establecer un procedimiento de control basado en la comparación de la resistencia, ductilidad y tenacidad de probetas y testigos a las tres temperaturas de ensayo, Tabla 1.

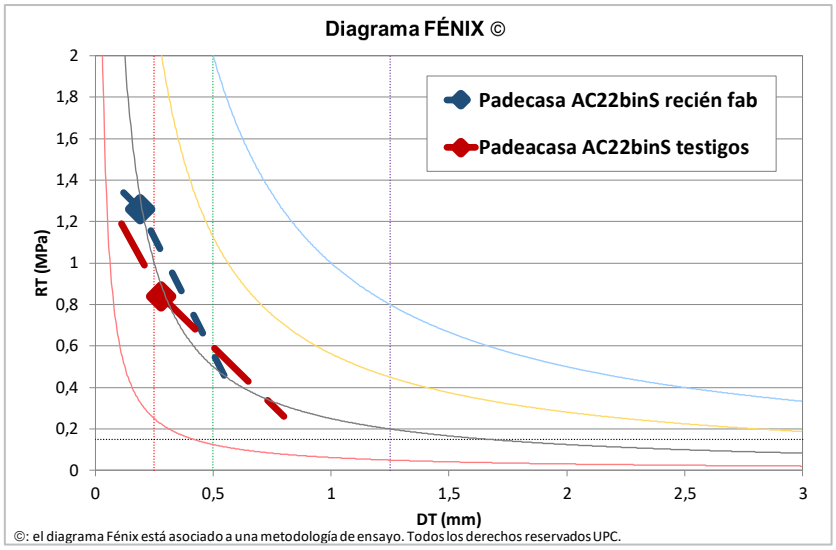
FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (21 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

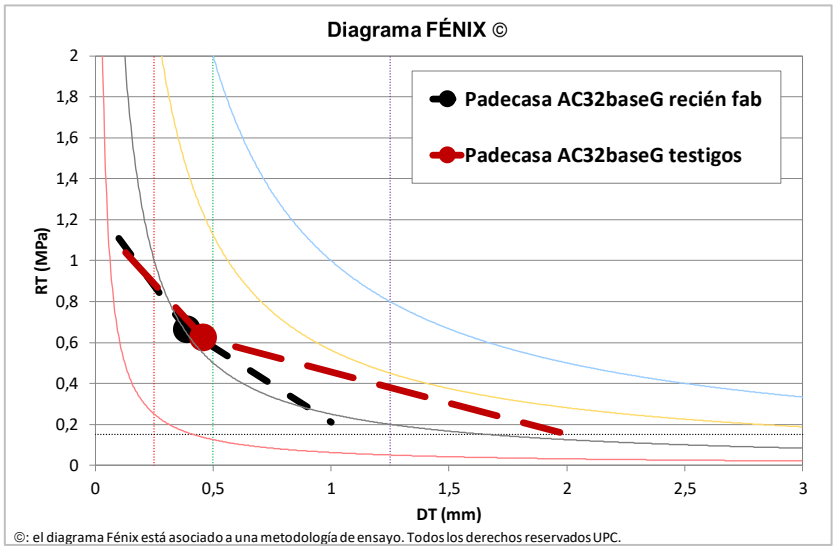
MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (22 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA





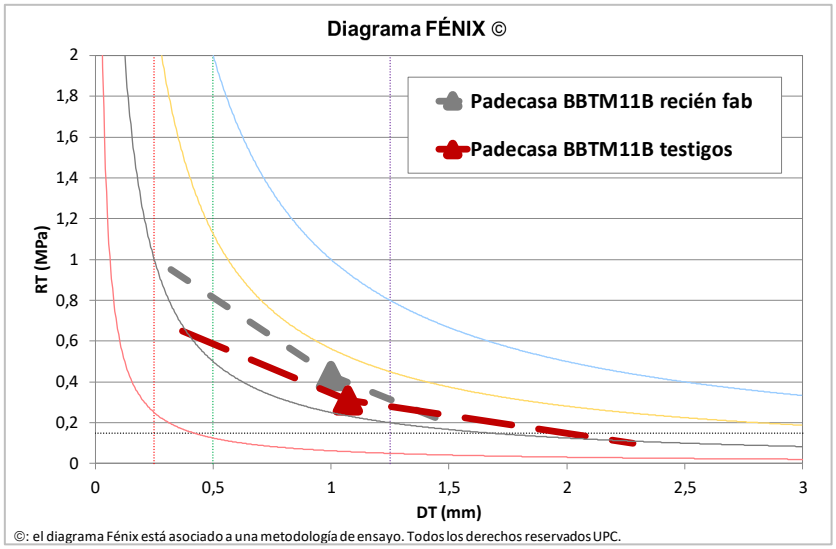
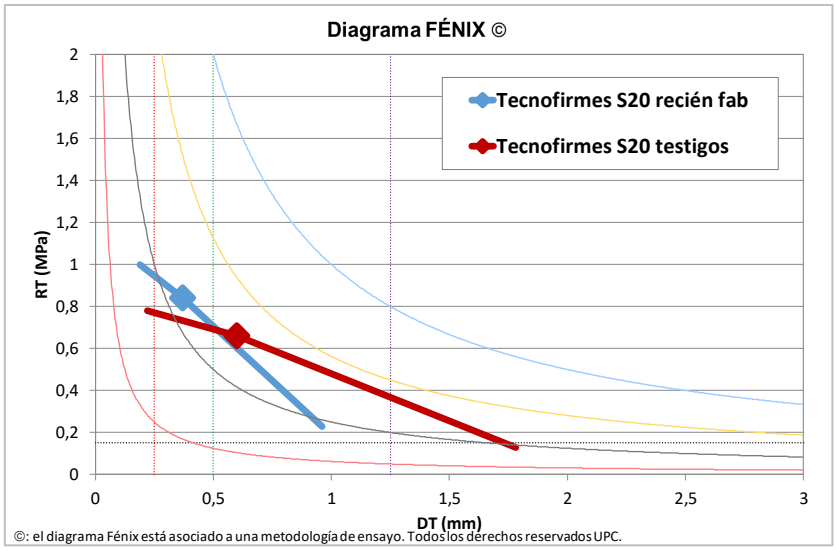
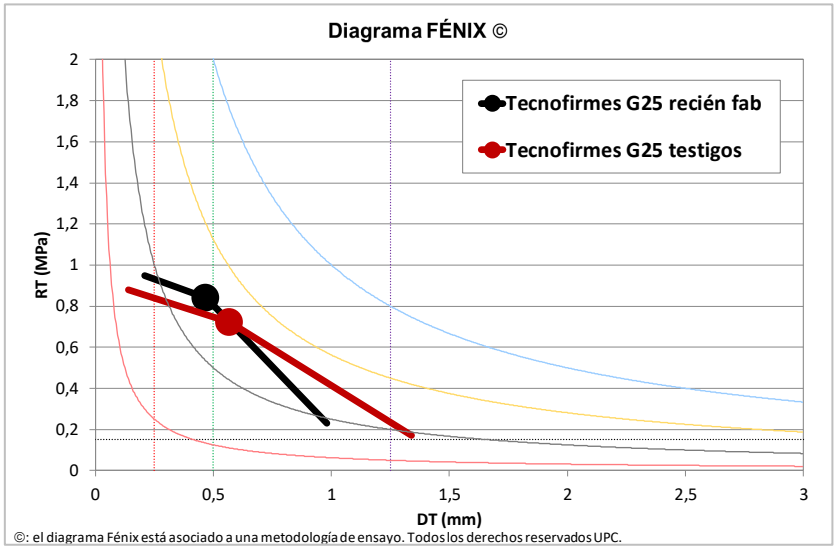


Figura 11. Curvas características mezclas Padecasa. Probetas y testigos





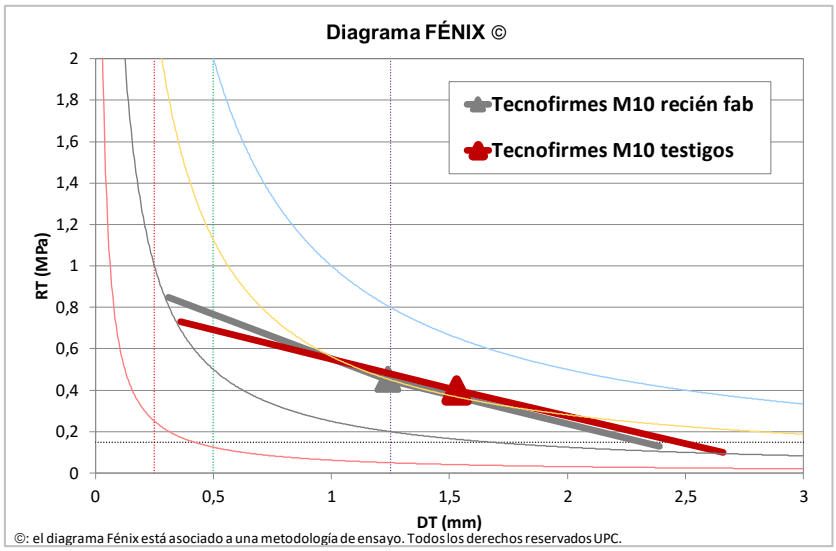


Figura 12. Curvas características mezclas Tecnofirmes. Probetas y testigos

FIRMADO
FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (23 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA

FIRMADO

FIRMADO por : CORNEJO ARRIBAS, Mª ROSARIO. A fecha: 19/05/2022 12:30 PM
Total folios: 24 (24 de 24) - Código Seguro de Verificación: MFOM02S0E2D10934A013B43483C6
Verificable en https://sede.mitma.gob.es

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

Tabla 1. Resultados de los ensayos Fénix sobre probetas y testigos

	Probetas			Testigos					
Mezcla/Temperatura	**RT (MPa)**	**DT (mm)**	**RT*DT**	**RT (MPa)**	**DT (mm)**	**RT*DT**	**% RT prob**	**%DT prob**	**%(RT*DT)**
Padecasa AC22bin S									
20	0.45	0.55	0.25	0.26	0.80	0.21	57.78	145.45	84.04
5	1.26	0.19	0.24	0.84	0.28	0.24	66.67	147.37	98.25
-5	1.34	0.12	0.16	1.19	0.11	0.13	88.81	91.67	81.41
Padecasa AC32baseG									
20	0.21	1.00	0.21	0.16	1.97	0.32	76.19	197.00	150.10
5	0.66	0.39	0.26	0.62	0.46	0.29	93.94	117.95	110.80
-5	1.11	0.10	0.11	1.04	0.13	0.14	93.69	130.00	121.80
Padecasa BBTM11B									
20	0.19	1.52	0.29	0.10	2.28	0.23	52.63	150.00	78.95
5	0.43	1.00	0.43	0.31	1.07	0.33	72.09	107.00	77.14
-5	0.95	0.32	0.30	0.65	0.37	0.24	68.42	115.63	79.11
Tecnofirmes S-20									
20	0.23	0.96	0.22	0.13	1.78	0.23	56.52	185.42	104.80
5	0.84	0.37	0.31	0.66	0.60	0.40	78.57	162.16	127.41
-5	1.00	0.19	0.19	0.78	0.22	0.17	78.00	115.79	90.32
Tecnofirmes G-25									
20	0.23	0.98	0.23	0.17	1.34	0.23	73.91	136.73	101.06
5	0.84	0.47	0.39	0.72	0.57	0.41	85.71	121.28	103.95
-5	0.95	0.21	0.20	0.88	0.14	0.12	92.63	66.67	61.75
Tecnofirmes M-10									
20	0.13	2.39	0.31	0.10	2.66	0.27	76.92	111.30	85.61
5	0.45	1.24	0.56	0.40	1.53	0.61	88.89	123.39	109.68
-5	0.85	0.31	0.26	0.73	0.36	0.26	85.88	116.13	99.73

Tomando como referencia las probetas recién fabricadas el porcentaje de resistencia de los testigos varía con la temperatura. A 20 °C los porcentajes de resistencia conseguidos son menores, entre 52,6 y 76,9%. A 5 °C varía entre 66,6 y 93,9% y a -5 °C entre 68,4 y 93,6%.

La ductilidad de los testigos suele ser mayor que la de la mezcla de referencia, alcanzando los mayores porcentajes a 20 °C. Únicamente en dos mezclas y a -5 °C se observan valores menores que 100.

El porcentaje de tenacidad (% RTxDT) de los testigos respecto al de las probetas, también es alto, superando en la mayoría de los casos el 80%. Sólo una mezcla presenta un valor significativamente más bajo, 61,7% a -5 °C. Este valor se corresponde con una mezcla que también dio un porcentaje de ductilidad menor que 100% a -5 °C.

El control de ejecución se puede establecer sobre la resistencia y tenacidad de los testigos, exigiendo a 5 °C valores superiores al 75-80% para la tenacidad, % RTxDT, y valores superiores al 65-70% para la resistencia, % RT.

El obtener las curvas características de probetas y testigos permite contrastar las hipótesis de diseño de la mezcla frente a lo conseguido en obra. Por otra parte, también se pueden extraer testigos de la obra tras varios años de servicio, y así poder conocer mejor cómo se comportan las mezclas y los firmes con el trascurso del tiempo y del tráfico. Conocimiento que será de gran utilidad a la hora de plantear el diseño de las mezclas y el dimensionamiento y conservación de los firmes.