

Estudio del efecto del tipo de fíller en la resistencia a la fisuración de mezclas bituminosas discontinuas

Trabajo realizado por:

Juan Ricardo Casanova López

Dirigido por:

Adriana Martínez

Rodrigo Miró

Grado en:

Ingeniería de obras Públicas

Barcelona, octubre de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y-Ambiental

TRABAJO FINAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL TIPO DE FÍLLER EN LA RESISTENCIA
A LA FISURACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS DISCONTINUAS**

Autor

JUAN RICARDO CASANOVA LÓPEZ

Tutores

ADRIANA MARTINEZ REGUERO

RODRIGO MIRÓ RECASENS

Universidad Politécnica de Cataluña

Ingeniería Civil y Ambiental

Barcelona, octubre 2018

Agradecimiento y dedicatoria

En primer lugar, agradecer a mis tutores, Adriana Martínez y Rodrigo Miró, por los conocimientos que han compartido conmigo, por sus ayudas y consultas que me brindaron en el desarrollo del trabajo de la tesis, seguimiento de la parte experimental en el laboratorio, parte teórica y análisis de datos.

Agradecer a todo el personal del laboratorio de Caminos, Josep Amorós y Jordi Martín por su ayuda y profesionalidad en el desarrollo y acompañamiento en la fabricación y ensayos de las mezclas bituminosas.

Estoy muy agradecido a la UPC, a todos los profesores que han formado parte de mi formación académica, por sus enseñanzas y comprensión, a mis amigos y compañeros de clase por haber compartido esta etapa de mi vida que siempre lo recordaré con alegría y orgullo.

También, quiero agradecer a mi familia, mi esposa Delia Nike y mi hijo Félix, a pesar de la distancia que se encuentran, he percibido siempre el cariño y ánimo para seguir adelante esforzándome y llegar a ser un Profesional.

Resumen

Título: Efecto del tipo de filler en la resistencia a la fisuración de mezclas bituminosas discontinuas.

Toda infraestructura, obra civil, obra lineal se deterioran con el paso del tiempo por diferentes causas, por lo que necesita una conservación y reparación periódica para evitar un sobre coste durante su vida útil.

En nuestro caso de mezclas bituminosas para capas de rodadura están soportando continuamente el peso del tráfico y están expuestas además a las condiciones climatológicas del lugar (lluvias, bajas temperaturas, altas temperaturas), todos estos factores influyen disminuyendo las propiedades mecánicas del firme.

Uno de los daños más comunes en los firmes de mezcla bituminosa es la fisuración del firme que empieza comenzando con la parte inferior con microfisuras que con el tiempo se transforman en macrofisuras contribuyendo a la debilitación estructural lo cual permite además la infiltración del agua.

Actualmente, el diseño de las mezclas discontinuas según la normativa española específica conseguir un determinado porcentaje de huecos, establecer un mínimo cociente de resistencia a tracción indirecta vía húmeda en relación a la vía seca y analizar la resistencia a las deformaciones permanentes mediante el uso del ensayo de pista.

En este trabajo final de grado se desarrolla y continúa la investigación de un nuevo ensayo a Tracción Directa, que es el Ensayo Fénix, desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, que nos permite determinar la resistencia a la fisuración que experimentan las mezclas bituminosas a partir de parámetros; como la energía de fractura o el índice de rigidez, y a su vez valorar su respuesta dúctil o frágil mediante un índice de tenacidad, estas principales propiedades mecánicas que caracterizan la conducta de las mezclas bituminosas desde el inicio de las fisuras hasta su fractura total.

Específicamente, se ha estudiado la resistencia a la fisuración de una mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM11B, elaborada con filleres de diferente naturaleza (calizo, cal y cemento), dosificados en diferentes proporciones. Se han elaborado probetas que se han ensayado a dos temperaturas: una intermedia (20°C) y otra baja (5°C). Se han calculado los parámetros de resistencia a tracción, índice de rigidez a tracción, energía disipada, índice de tenacidad y desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona post-pico.

Conclusión:

El presente trabajo final de grado, se ha realizado esta investigación con el fin de evaluar; El efecto del tipo de filler (calizo, cemento, cal) sobre la resistencia a la fisuración de una mezcla bituminosa discontinua (tipo BBTM 11B), mediante la utilización del ensayo Fénix a tracción directa.

Para lo cual se ha analizado 72 medias probetas Marshall, con un contenido fijo de betún del 5% sobre mezcla de áridos, solo hemos ido variando las proporciones del tipo de filler de aportación, como se aprecia en la tabla 4. Proporciones de filleres para la fabricación de cada serie, en la página 23, el ensayo se realiza a dos temperaturas, 36 medias probetas a 5°C y 36 medias probetas a 20°C.

- Al disminuir la temperatura de ensayo, aumenta la resistencia a la tracción, y se rigidiza la mezcla.

A 20°C la aportación de cal 100% o en combinación con los filleres cemento y calizo, siempre y cuando la cal se aporta en mayor %, da las mayores Resistencia a la tracción que oscilan entre (0,15 y 0,20 MPa).

A sí mismo la cal por tener más volumen en comparación con los demás filleres calizo y cemento, reduce el % de huecos en la mezcla bituminosa, al reducir el % de huecos la mezcla se rigidiza.

A 5°C no se aprecia diferencia del RT (0,8-0,9 MPa).

- La temperatura de ensayo es 5°C, la probeta bituminosa es más rígida, y presenta valores más altos de IRT, esto significa que una probeta soporta menos deformación, influyendo a una temprana fisuración que conlleva a la rotura (frágiles).

.A 5°C, el IRT varía entre 4 y 5 MPa/mm, no apreciándose ninguna tendencia.

- El ensayo a 20°C, la probeta bituminosa se vuelve más flexible, con valores más elevados de deformación.

En las probetas que empleamos los filleres cemento y calizo, al 100% o en sus respectivas combinaciones han influido positivamente en la flexibilidad de la mezcla bituminosa.

El filler cal resta ductilidad a la mezcla la variación es grande, cercano a 2 mm para los filleres calizo, cemento y la combinación entre ambos. En cambio, al utilizar la cal el desplazamiento se reduce a valores de 1,30 mm (65% del caso 25% calizo y 75% cemento)

A 5°C, los valores de $d_{0,5}$ PM, oscila entre 0,41 y 0,72 mm, siendo igual en el caso de 20°C, los menores valores correspondientes al filler cal.

Abstract

Title: Effect of the type of filler in the resistance to cracking of discontinuous bituminous mixtures.

All infrastructure, civil works, linear works deteriorate with the passage of time for different reasons, so it needs a conservation and periodic repair to avoid an over cost during its useful life.

In our case, bituminous mixtures for rolling layers are continuously supporting the weight of traffic and are also exposed to the weather conditions of the place (rain, low temperatures, high temperatures), all these factors have an impact on the mechanical properties of the road surface.

The most common damages in the asphalt mixes is the cracking of the firm that starts from the bottom with microcracks. Over time microcracks contribute to structural weakening, which also allows the infiltration of water.

In Spain, the design of discontinuous mixtures for road surfaces has been based on the Cantabrian tests for the design of bituminous mixtures; Since 2008, the Cantabrian test has been discontinued, only used for the design of draining or porous mixtures.

Now for the design of the discontinuous mixtures, the Spanish regulations have added the indirect tensile test, to evaluate the effect of the water action and the track test to analyze the resistance to deformations.

In this Final Degree Project is developed and continues the research of a new test to Direct Traction, which is the Phoenix Test.

It was developed by the Road Laboratory of the Polytechnic University of Catalonia, and allows us to determine the resistance to the cracking that bituminous mixtures undergo from parameters; as the fracture energy or the rigidity index, and at the same time assess its ductile or fragile response through a tenacity index, these main mechanical properties that characterize the behavior of the bituminous mixtures from the beginning of the fissures to their total fracture.

Specifically, the cracking resistance of a discontinuous bituminous mixture type BBTM11B, elaborated with fillers of different nature (limestone, lime and cement), dosed in different proportions has been studied. Specimens have been prepared that have been tested at two temperatures: one intermediate (20°C) and another low (5°C). The parameters of tensile strength, tensile stiffness index, dissipated energy, tenacity index and displacement at 50% of the maximum load in the post-peak zone have been calculated.

Conclusion

The present final Degree Project, this research has been carried out in order to evaluate; The effect of the type of filler (limestone, cement, lime) on the cracking resistance of a discontinuous bituminous mixture (type BBTM 11B), by means of the use of the Fenix direct tensile test.

For which we analyzed 72 average Marshall test tubes, with a fixed bitumen content of 5% on aggregate mix, we have only been varying the proportions of the type of filler, as shown in table 4. Proportions of fillers for the manufacture of each series, on page 23, the test is carried out at two temperatures, 36 half test tubes at 5°C and 36 half test tubes at 20°C.

- When the test temperature decreases, the tensile strength increases, and the mixture stiffens.

At 20°C the addition of lime 100% or in combination with the cement and limestone fillers, provided that the lime is provided in greater%, gives the highest tensile strength ranging between (0.15 and 0.20 MPa). To the same the lime to have more volume in comparison with the other fillers limestone and cement, reduces the% of holes in the bituminous mixture, to reduce the% of holes the mixture stiffens.

At 5 ° C there is no difference in RT (0.8-0.9 MPa).

- The test temperature is 5°C, the bituminous specimen is more rigid, and has higher values of IRT, this means that a test tube bears less deformation, influencing an early crack that leads to breakage (fragile).

At 5°C, the IRT varies between 4 and 5 MPa / mm, no tendency being observed.

- The test at 20°C, the bituminous specimen becomes more flexible, with higher values of deformation.

In the specimens that we use the cement and limestone fillers, 100% or in their respective combinations have positively influenced the flexibility of the bituminous mixture.

The filler lime ductility to the mix, the variation is large, close to 2 mm for the limestone fillers, cement and the combination between both. On the other hand, when using lime the displacement is reduced to values of 1.30 mm (65% of the case 25% limestone and 75% cement)

At 5°C, the values of $d_{0.5PM}$, oscillates between 0.41 and 0.72 mm, being equal in the case of 20°C, the lowest values corresponding to the filler lime.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
1.1 Introducción	11
1.2 Objetivo	12
1.3 Contenido del trabajo final de grado	12
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1 Mezclas asfálticas o bituminosas en caliente.....	14
2.1.1 Definición	14
2.1.2 Clasificación de las mezclas bituminosas para capas de rodadura	15
2.2 Mezcla bituminosa BBTM 11B	16
2.2.1 Propiedades y especificaciones de las mezclas BBTM 11B	17
2.2.2 Efecto del filler.....	19
2.2.3 Relación entre el filler y la resistencia de la mezcla bituminosa	20
CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL	24
3.1 Introducción	24
3.2 Plan de trabajo	24
3.3 Materiales utilizados	25
3.4 Preparación de los materiales.....	29
3.4.1 Determinación del peso para cada granulometría.....	29
3.4.3 Tara de áridos y filleres.	31
3.5 Fabricación de las probetas.....	33
3.5.1 Cálculo peso del betún (Pb).....	35
3.6 Cálculo de la densidad máxima y contenido de huecos	40
3.6.1 Densidad máxima	40
3.6.2 Contenido de huecos.....	42
3.7 Ensayo utilizado en el presente TFG	42
3.7.1 Ensayo Fénix.....	42
CAPÍTULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS	49
4.1 Introducción	49
4.2 Resultados, análisis de densidades y porcentaje de huecos en mezcla.....	49
4.3 Resultados de los parámetros obtenidos del ensayo Fénix.....	51
4.3.1 Estudio de los parámetros obtenidos mediante el ensayo Fénix.	51
4.3.2 Resistencia a tracción (RT)	51
4.3.3 Índice de rigidez a tracción (IRT)	54

4.3.4 Desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona post-pico (d 0.5Pm)	56
4.3.5 Análisis RT (MPa) vs D0,5PM (mm)	59
Capítulo 5. CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS.....	63
ANEXOS: RESULTADOS GRÁFICOS DE LAS CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO.	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de un firme flexible o semirrígido.....	13
Figura 2: Betún asfáltico.....	15
Figura 3: Corte transversal de una probeta de mezcla bituminosa (esquema y foto).....	15
Figura 4: Filler calizo de recuperación	19
Figura 5: Filler de aportación: Calizo, cal y cemento	19
Figura 6: Resistencia a la tracción indirecta con reemplazo de muestras de cal [14].....	21
Figura 7: Resistencia a la tracción indirecta con reemplazo de muestras de ceniza volante [14]	21
Figura 8: Resistencia a la tracción indirecta con reemplazo de muestras de cemento [14]	22
Figura 9: Geometría de la probeta de mástico para ensayar a tracción directa [15]	22
Figura 10: Resistencia a tracción de las mezclas bituminosas elaboradas con N2 y NV (betunes convencionales), y MR y ML (betunes modificados con SBS), [15].	23
Figura 11: Resistencia a tracción de los másticos bituminosas elaborados con N2 y NV (betunes convencionales), y MR y ML (betunes modificados con SBS), [15].	23
Figura 12: Mitades de probetas identificadas	25
Figura 13: Probeta desmenuzada manualmente.....	25
Figura 14: Capazo 1, árido 11.2 mm	26
Figura 15: Capazo 2, árido 8 mm	27
Figura 16: Capazo 3, árido 4 mm	27
Figura 17: Capazo 4, árido 2mm.....	27
Figura 18: Capazo 5, árido 0,5 mm	28
Figura 19: Capazo 6, árido 0,063 mm filler calizo de recuperación sin limpieza	28
Figura 20: Árido 0.063 mm, filler calizo de recuperación después de ser limpiado y secado.....	28
Figura 21: Muestras de tamices.....	30
Figura 22: Máquina tamizadora por vibración.....	31
Figura 23: Limpieza del filler calizo de recuperación, fracción 0.063 lavado con agua	31
Figura 24: Pesado primer árido 11.2 mm. 45 gr	32
Figura 25: Pesado árido grueso y finos, a falta del filler de aportación (42,3 gr).....	32
Figura 26: Mezclas homogenizada.....	33
Figura 27: Filler pesado para fabricación de 3 series	33
Figura 28: Inicio de la fabricación	34
Figura 29: Mezclado en seco de los áridos	34
Figura 30: Vertido betún sobre áridos.....	35
Figura 31: Adición filler en el proceso de mezclado.....	36
Figura 32: Medida temperatura de la mezcla.....	36
Figura 33: Vertido de la mezcla en el molde	37
Figura 34: Programación para cantidad de golpes	37
Figura 35: Compactadora Marshall	38
Figura 36: Probetas compactadas sin desmontar	38
Figura 37: Mecanismo desmolde probetas	39
Figura 38: Señalización e identificación de las probetas.....	39
Figura 39: Medición de probetas con pie de rey.....	40
Figura 40: Determinación de la densidad máxima procedimiento volumétrico	41
Figura 41: Probeta cortada para el ensayo Fénix	43
Figura 42: Probeta fijada a las placas con resina epoxi	43
Figura 43: Máquina usada para el ensayo Fénix.....	44
Figura 44: Probeta antes de poner en la prensa	44

Figura 45: El antes y después de la prensa del ensayo Fénix, se aprecia la fisuración y ductilidad.....	45
Figura 46: Máquina y registros de datos del ensayo Fénix.....	45
Figura 47: Plancha calefaccionada.....	46
Figura 48: Curva carga-desplazamiento.....	46
Figura 49: Evolución de densidades en mezcla para las diferentes probetas fabricadas.....	50
Figura 50: Evolución de huecos en mezcla para las diferentes probetas fabricadas.....	50
Figura 51: Fénix a 5°C (RT), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento.....	52
Figura 52: Fénix a 20°C (RT), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento.....	53
Figura 53: Fénix a 5°C (IRT), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento.....	55
Figura 54: Fénix a 20°C (IRT), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento.....	56
Figura 55: Fénix a 5°C (d 0.5 Pm), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento.....	57
Figura 56: Fénix a 20°C (d 0.5 Pm), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento.....	58
Figura 57: Análisis gráfica RT vs D0,5PM.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Contenido de huecos en mezclas discontinuas y drenantes, [2].....	17
Tabla 2: Pendiente media de deformación en pista en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos (mm para 10 ³ ciclos).....	17
Tabla 3: Tipo, composición y dotación de la mezcla y del betún.....	18
Tabla 4: Proporciones de filler para cada serie.....	24
Tabla 5: Porcentajes de áridos para cada tamiz según el tipo de mezcla.....	29
Tabla 6: Porcentajes de áridos para cada tamiz en este TFG.....	29
Tabla 7: Granulometría para una mezcla de 900 grs.....	30
Tabla 8: Densidades máximas, aparentes y porcentaje de huecos.....	49

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Las carreteras son infraestructuras que impulsan el crecimiento económico de la sociedad, forman un sistema que permite a los viajeros la comunicación con lugares y ciudades unidas a través de redes de carreteras que la componen, así como el transporte de mercancías y bienes con seguridad y eficiencia.

En las últimas dos décadas el transporte por carreteras ha crecido en España; el crecimiento del número de vehículos y la necesidad de movilizarse del ser humano han influido en la construcción de más vías. En la actualidad España tiene aproximadamente 648,000 km de carretera, lo que le ha convertido en el segundo país europeo en producción de mezcla bituminosa.

El firme de una carretera es una estructura resistente construida por capas de pequeño espesor y diferentes clases de materiales, siendo las mezclas bituminosas las que conforman las capas superiores en el caso de los firmes flexibles y semirrígidos.

Esta estructura está sujeta a un envejecimiento y deterioro progresivo debido a la acción del tráfico, las condiciones meteorológicas y del propio material. Para que la vida útil de la capa de rodadura sea la más prolongada y ahorrar dinero en reparaciones y mantenimiento constantes, debemos diseñar con materiales de buena calidad y asegurar una correcta ejecución de la obra, siguiendo las especificaciones que están recogidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carretera y Puentes (PG-3) y desde luego, respetando los aspectos relacionados con el medio ambiente. Esta capa de rodadura está compuesta por una mezcla bituminosa que se consigue con la mezcla de áridos y betún.

Cada carga del tráfico transmite una sollicitación horizontal y vertical que se manifiestan en el pavimento en forma de fallos producidos por fisuración, fatiga, deformaciones o hundimientos. Constantemente se está desarrollando e investigando a nivel nacional, para mejorar las prestaciones de estas mezclas bituminosas.

A lo largo de estas investigaciones se han analizado los factores causantes del deterioro de las mezclas bituminosas y se han observado diferentes causas. Se ha determinado que una de las más importantes es la fisuración, 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 que, con el paso de tráfico de vehículos o por la generación de tensiones térmicas, puede hacerse mayor. Además, en el caso de las zonas lluviosas, el agua puede acceder por la fisura e infiltrarse llegando a capas inferiores, debilitando así el pavimento, fenómeno 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.

Se han desarrollado diferentes líneas de investigación entorno a diversas propiedades de las mezclas asfálticas, como, a título meramente enunciativo, el efecto de la naturaleza de los áridos en las propiedades superficiales, la 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, etc. 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.

1.2 Objetivo

En el presente trabajo de final de grado, el objetivo es evaluar el efecto del tipo de filler en la resistencia a la fisuración de mezclas bituminosas discontinuas.

Se estudiará la resistencia a la fisuración de una mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM 11B, mediante la utilización de un ensayo a tracción directa, denominado ensayo Fénix. Este nuevo ensayo Fénix se desarrolla y experimenta aquí en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar el efecto de diferentes tipos de fílleres en las propiedades volumétricas
- Analizar el efecto de diferentes tipos de fílleres en las propiedades obtenidas a partir de la utilización del ensayo Fénix.
- Estudiar el comportamiento de mezclas fabricadas con una combinación de dos fílleres en diferentes proporciones.

1.3 Contenido del trabajo final de grado

En el capítulo 1 se presenta la justificación de este trabajo final de grado y los objetivos, el general y los específicos.

En el capítulo 2 se describe un estado del arte de las mezclas bituminosas discontinuas para capas de rodadura tipo BBTM11B, haciendo énfasis en la función que desempeña el filler y su relación con las propiedades mecánicas de las mezclas.

En el capítulo 3 se detalla la metodología llevada a cabo en este estudio, con una descripción de los materiales empleados y los ensayos realizados para obtener las propiedades a evaluar.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos, junto con una discusión y análisis de los mismos.

Finalmente,

En el capítulo 5 se desarrollan las conclusiones, así como una serie de líneas futuras de investigación que podrían formar parte de una continuación de este TFG.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

El diseño de una vía se divide en varias partes y cada una tiene una función específica para conseguir que la carretera tenga un buen funcionamiento, resista las cargas del tráfico y permita que la circulación se desarrolle con seguridad y comodidad. Esta estructura es el firme y se compone de varias capas, que se suelen llamar subbase, base y capa de rodadura. Son un conjunto de capas superpuestas (relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor, de diferentes materiales, adecuadamente compactados) que se apoyan sobre la explanada.

Los firmes se clasifican del siguiente modo:

Firmes flexibles:

Están formados por una serie de capas con resistencia a la deformación decreciente en profundidad, igual que las presiones transmitidas desde la superficie también decrecen con ésta. Los firmes flexibles tienen al menos una capa de rodadura bituminosa.

Firmes semirrígidos:

Se desarrollan a causa del aumento de las intensidades y cargas de tráfico. Son firmes con capas tratadas o estabilizadas con cemento y con un espesor importante (15 cm o más) de mezclas bituminosas.

Firmes inversos:

Los firmes inversos aparecen como solución para un inconveniente de los firmes semirrígidos con capas de base tratadas con cemento, ya que se produce la reflexión en superficie de las grietas producidas por retracción en dichas capas tratadas. En los firmes inversos se interpone entre el pavimento bituminoso y la capa tratada con cemento una capa granular (formada exclusivamente con áridos) con el fin de disipar las tensiones que provocan dicha reflexión de grietas.

Firmes rígidos:

Estos firmes tienen un pavimento de hormigón. Por su mayor rigidez distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con presiones muy reducidas.

Firmes compuestos o mixtos:

Están formados por una capa de hormigón cubierta por un pavimento bituminoso.



Figura 1: Estructura de un firme flexible o semirrígido.

Los firmes flexibles y semirrígidos están compuestos por las siguientes capas:

Capa de rodadura (mezclas bituminosas): Es la parte superior del firme, soporta directamente las sollicitaciones del tráfico, aporta las características funcionales (prestaciones de seguridad y comodidad para la circulación de los vehículos). El firme ha de proporcionar al usuario una superficie de rodadura segura, para que en todo momento se consiga una buena adherencia neumático-pavimento.

El diseño de la capa de rodadura depende de los requisitos funcionales de la superficie por la que vaya a ser construida la carretera. Esto podría ser una durabilidad alta, reducción de ruido, una alta resistencia al deslizamiento, impermeabilidad, etc. Esta elección será la que marcará la vida útil que tendrá la carretera. Se busca una optimización resistente-funcional con un coste global mínimo que incluya los aspectos constructivos, de conservación y rehabilitación.

Capa de base: Es la capa del firme situada debajo de la capa de rodadura, absorbe los esfuerzos verticales. Para tráfico mediano y ligero se suelen utilizar bases granulares como las zahorras artificiales y para tráfico pesado materiales granulares tratados con un ligante o conglomerante.

Capa de subbase: es la capa situada debajo de la base y sobre la explanada, proporciona un apoyo uniforme a la base. Puede no ser necesaria cuando se emplean explanadas granulares de elevada capacidad de soporte. Tiene como función proporcionar a la base un cimiento uniforme y constituir una plataforma de trabajo adecuada. Es necesario que también cumplan una función drenante (materiales sin finos). Normalmente las subbases son capas granulares constituidas por gravas y arenas naturales o de machaqueo o suelos estabilizados con cemento o tratadas con escorias de alto horno, etc.

2.1 Mezclas asfálticas o bituminosas en caliente

2.1.1 Definición

Se definen como mezclas bituminosas para capa de rodadura aquellas resultantes de la combinación de un betún asfáltico (ligante hidrocarbonado), áridos — en granulometría continua con bajas proporciones de árido fino o con discontinuidad granulométrica en algunos tamices —, polvo mineral (filler) y, eventualmente, aditivos (caucho, escorias de acería, etc.), de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación y puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente. [PG-3-543], [2].

La función de esta capa es absorber todos los esfuerzos transmitidos por el tráfico de vehículos pesados, a la vez que proporcionar la textura necesaria para dotar de adecuada resistencia al deslizamiento a la superficie, [Yepes, V. UPV 2014], [3].



Figura 2: Betún asfáltico

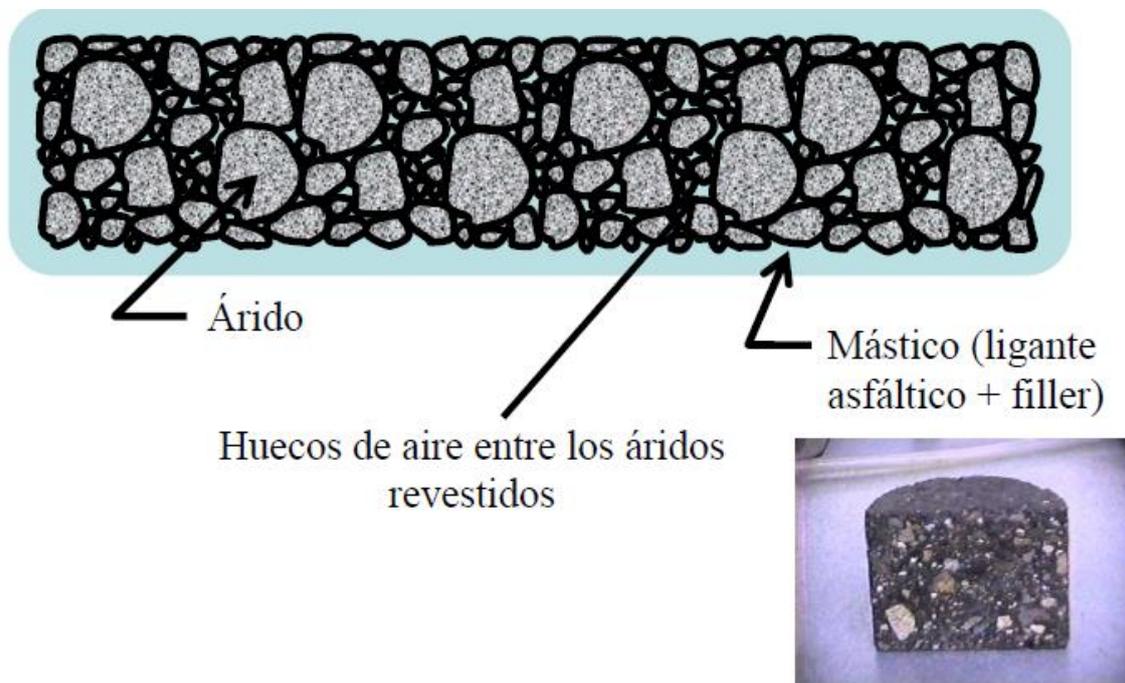


Figura 3: Corte transversal de una probeta de mezcla bituminosa (esquema y foto).

2.1.2 Clasificación de las mezclas bituminosas para capas de rodadura

Hay diferentes tipos de mezclas bituminosas, que se escogen en función de las propiedades que se desea potenciar en cada firme. Usualmente se colocan capas de rodadura fabricadas en caliente. Estos betunes necesitan calentarse para reducir su viscosidad y conseguir la envuelta con los áridos calientes y una adecuada puesta en obra. Son de uso más generalizado, utilizadas en todo tipo de carreteras donde la calidad exigida sea alta.

En función del porcentaje de huecos que tiene la mezcla, se pueden colocar:

Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso: Estas mezclas se identifican con las letras AC (de Asphalt Concrete), tienen un porcentaje de huecos entre

3 y 6% y se colocan en espesores de 4 a 5 cm. Para conseguir ese bajo porcentaje de huecos los áridos se distribuyen en una granulometría densa o semi-densa, son prácticamente impermeables, protegiendo así a las capas inferiores del firme y a la explanada.

Mezclas bituminosas drenantes o porosas: se simbolizan con las letras PA (de Porous Asphalt), tienen un porcentaje de huecos superior al 20% y son especialmente diseñadas para zonas lluviosas.

Mezclas bituminosas discontinuas: Se denominan mezclas BBTM (mezclas bituminosas muy delgadas en francés) y se caracterizan por ser mezclas abiertas, con un porcentaje de huecos superior al de las densas pero inferior al de las porosas. Se colocan en espesores de 2 a 3 cm y tienen una macrotextura muy elevada, ideales para vías de circulación de alta velocidad.

Dado que este trabajo final de grado se centra en el estudio de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas discontinuas (tipo BBTM 11B), a continuación, se describirá:

- ✓ **¿Qué es una mezcla BBTM 11B?**
- ✓ Propiedades y especificaciones de las mezclas BBTM 11B
- ✓ Efecto del filler en las mezclas bituminosas
- ✓ Relación entre el filler y las propiedades mecánicas de las mezclas

2.2 Mezcla bituminosa BBTM 11B

Es una mezcla bituminosa discontinua en caliente para capas de rodadura en firmes de nueva construcción o como rehabilitación de pavimentos.

Se caracteriza por:

- Un contenido en huecos entre el 12% y el 18%.
- Una elevada macrotextura superficial mayor a 1,5 mm
- Una granulometría discontinua 0/11
- El uso de betún modificado con polímeros o caucho para vías de alto tráfico, con un contenido mínimo de 4,75% en peso sobre la mezcla.
- Un espesor adecuado de 2-3 cm.
- Un contenido total en filler está comprendido entre el 4 y 6%.

En cuanto a su puesta en obra [4] es importante hacer destacar algunas recomendaciones:

- La temperatura de la mezcla a la salida del mezclador de la planta debe ser menor a 165°C.
- El extendido de la mezcla se debe hacer a una temperatura mínima de 135°C.
- No se utilizarán compactadores de neumáticos ni vibración en el compactador liso.
- Riego de adherencia, se debe efectuar con una emulsión que deje un mínimo de 250 g/m² de betún residual.
- Estas mezclas se destacan por presentar una excelente macrotextura, por lo que son adecuadas para mejorar la seguridad de rodadura en vías de alta velocidad cuando el pavimento está mojado. Además, esta macrotextura le ofrece la posibilidad de reducir el ruido de rodadura y permitir que el agua escurra con facilidad de la

calzada hacia la cuneta a través de los arcenes, evitando de esta manera la retención de agua en la calzada.

2.2.1 Propiedades y especificaciones de las mezclas BBTM 11B

➤ Contenido de huecos

El contenido de huecos de huecos en mezcla, determinado según el método de ensayo de la norma UNE-EN 12697-8, [5], que se obtiene a partir de la densidad máxima y la densidad aparente de la mezcla compactada deberá variar entre 12 y 18%. Tabla 1.

Para la fabricación de probetas se utiliza el método de compactación por impacto, según la norma UNE-EN 12697-30, [6], aplicando 50 golpes por cara.

TIPO DE MEZCLA	% DE HUECOS (Norma UNE-EN 12697-8)
BBTM A	≥4
BBTM B	≥ 12 y ≤ 18
DRENANTE (PA)	≥ 20

Tabla 1: Contenido de huecos en mezclas discontinuas y drenantes, [2]

➤ Resistencia a la deformación permanente

El Pliego de Prescripciones Técnicas particulares podrá exigir que la resistencia a deformaciones plásticas, determinada mediante el ensayo de pista de laboratorio, cumpla lo establecido en la tabla 2. Este ensayo se hará según la norma UNE-EN 12697-22, [7], a una temperatura de 60°C y con una duración de 10000 ciclos. Se prepararán probetas, con mezcla obtenida en la central de fabricación, mediante compactador de placa, con el dispositivo de rodillo de acero (norma UNE-EN 12697-33, [8]), con una densidad superior al noventa y ocho por ciento (> 98%) de la obtenida en probetas cilíndricas preparadas conforme a la norma UNE-EN 12697-30 aplicando cincuenta (50) golpes por cara.

ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
	T00 a T2	T3, T4 Y ARGENES
CÁLIDA Y MEDIA	≤ 0.07	≤0.10
TEMPLADA		

Tabla 2: Pendiente media de deformación en pista en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos (mm para 10³ ciclos).

➤ **Sensibilidad al agua**

Se comprobará la adhesividad árido-ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Para ello, se determinará la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, realizado a 15°C según la norma UNE-EN 12697-12, [9].

La resistencia conservada deberá alcanzar un valor mínimo del 90%. Las probetas se compactarán según la norma UNE-EN 12697-30, aplicando cincuenta (50) golpes por cara.

Se podrá mejorar la adhesividad entre el árido y el ligante hidrocarbonado mediante activantes directamente incorporados al ligante. En todo caso, la dotación mínima no será inferior a la indicada en la tabla 3.

CARACTERÍSTICA		TIPO DE MEZCLA					
		PA 11	PA 16	BBTM8B	BBTM11B	BBTM8A	BBTM11A
DOTACIÓN MEDIA DE MEZCLA (kg/m ²)		75-90	95-110	35-50	55-70	40-55	65-80
DOTACIÓN MÍNIMA(*) DE LIGANTE (% en masa sobre el total de la mezcla)		4,30	4,75		5,20		
LIGANTE RESIDUAL EN RIEGO DE ADHERENCIA (kg/m ²)	FIRME NUEVO	> 0,30				> 0,25	
	FIRME ANTIGUO	> 0,40				> 0,35	

Tabla 3: Tipo, composición y dotación de la mezcla y del betún.

➤ **Especificaciones sobre el filler**

En cuanto al tipo de filler a emplear, el pliego indica que podrá ser un producto comercial o especialmente preparado, en cuyo caso se denomina de aportación. La proporción del polvo mineral de aportación a emplear en la mezcla deberá ser del 100% para carreteras con tráfico intermedios y altos (T00 a T2) y como mínimo del 50% en los casos restantes.

Se debe garantizar que no quedará adherido a los áridos después de pasar por el secador (se admite un máximo del 2% del peso de la mezcla). Su densidad aparente debe oscilar entre 0,5 y 0,8 g/cm³.

Con respecto a la dotación de filler a aportar a la mezcla, se especifica que la relación ponderal entre filler y ligante (expresados ambos respecto de la masa total de árido seco, incluido el polvo mineral) determinada en la fórmula de trabajo, debe estar comprendida entre 1 y 1,2. Es decir, las mezclas bituminosas BBTM11B suelen tener un contenido de filler en peso aproximadamente igual a o ligeramente superior que el contenido de betún empleado.

2.2.2 Efecto del filler

Se define el filler o polvo mineral, a la fracción de árido que pasa por el tamiz 0,063 mm (63 μ m); puede ser de recuperación (Fig.4) ó filler de aportación (Fig.5). El filler de recuperación es aquél procedente de la propia trituración de los áridos y el filler de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (calizo, cal, cemento, volantes de central térmica, escorias de acería) especialmente preparado para utilizarlo en la composición del mástico de las mezclas bituminosas.

El filler sirve de material inerte para rellenar los huecos presentes en la mezcla, pero dada su finura y características superficiales sirve también como material activo, debido a la interacción entre el filler y el ligante bituminoso, [10].

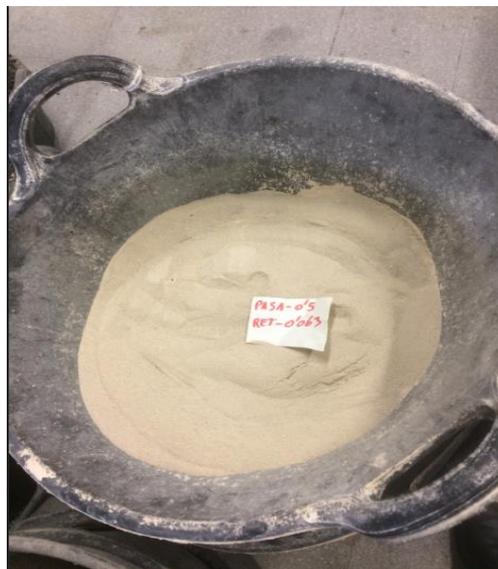


Figura 4: Filler calizo de recuperación



Figura 5: Filler de aportación: Calizo, cal y cemento

En cuanto a su función rellenadora, al ocupar de modo parcial los huecos dejados por la estructura granular compactada, el filler reduce los espacios libres, con lo que también

se reduce la cantidad de betún necesario. Este filler se dispersa en el betún formando el mástico, aumentando la viscosidad del betún y afectando sus propiedades, [11].

Este cambio de las propiedades del betún tiene efectos favorables sobre las propiedades de la mezcla bituminosa, mejorando su estabilidad, su resistencia a la tracción, su resistencia al desgaste y pudiendo tener también un efecto beneficioso sobre la adhesividad árido - ligante. Una cierta proporción del filler, principalmente las partículas más pequeñas que el espesor de la película de ligante, quedan embebidas en la masa de ligante, no pudiendo contribuir al relleno del esqueleto mineral más que de una forma aislada; esta proporción forma un mortero de características diferentes a las del ligante solo, en forma de película sobre la superficie mineral, que modifica las características reológicas de la mezcla, [11].

Diversos estudios han demostrado el hecho de que aumentando la proporción de filler en una mezcla bituminosa se aumenta su estabilidad y resistencia mecánica, pero hasta un cierto límite, ya que conforme aumenta el contenido de filler, y dependiendo de sus características geométricas y composición mineralógica, la mezcla se va haciendo cada vez más seca y frágil, tendiendo a disgregarse durante su servicio.

Las características geométricas de las partículas del filler (forma, angulosidad y textura) actúan intensificando la superficie activa del filler en la interface filler- betún. Cuantas más irregularidades geométricas posea el filler, con idéntica composición mineralógica y relación filler-betún, mayor consistencia tienen los másticos, [12],

Debido a la mayor capacidad de absorción, lo que implica un descenso en el contenido de betún libre del mástico. Es decir, partículas de diferentes tipos de filler con una misma distribución de tamaños pueden tener distintas superficies específicas. Estas variaciones de la superficie específica son debidas a los cambios en la irregularidad geométrica de las partículas de filler. A medida que la irregularidad geométrica aumenta, la superficie específica también aumenta. A medida que la superficie específica del filler aumenta, el mástico tenderá a tener, a una determinada temperatura, una viscosidad mayor, una penetración menor y menor ductilidad, [12].

En cuanto a la acción estabilizante del filler frente al agua, se sabe que algunos tipos de filleres, como el cemento y la cal provocan reacciones químicas que incrementan la unión entre el árido y el ligante bituminoso [13], aumentando la durabilidad de las mezclas frente a la acción del agua. El mecanismo por el cual se mejora la adhesividad entre el betún y los áridos, gracias al filler, es en estos casos, de tipo mecánico y físico-químico.

2.2.3 Relación entre el filler y la resistencia de la mezcla bituminosa

Si bien existen pocos estudios específicos sobre este tema, algunos investigadores han analizado la relación entre la naturaleza del filler empleado y algunas propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas.

Se destaca el estudio llevado a cabo por Reyes y Rincón [14], quienes evaluaron el efecto del cemento, la cal y la ceniza volante como sustitutos del filler mineral en la resistencia a tracción indirecta de las mezclas asfálticas. Encontraron que los tres materiales incrementaban la resistencia de las mezclas, siendo la cal el componente que mayor resistencia proporciona y el cemento el que menos efecto muestra en la resistencia. Las figuras 6, 7 y 8 ilustran estos resultados.

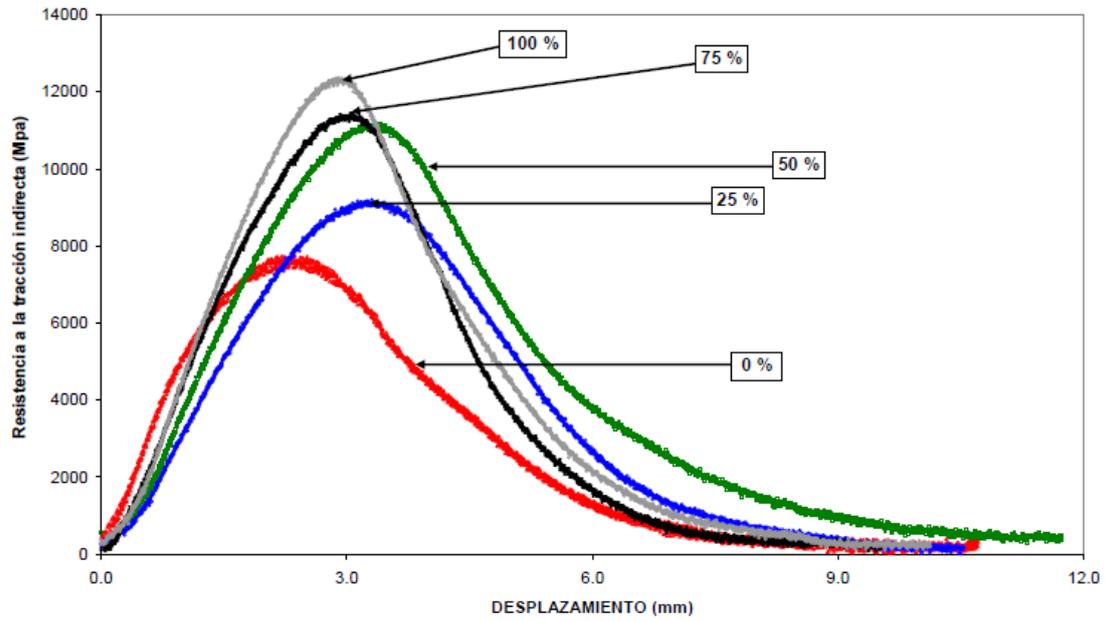


Figura 6: Resistencia a la tracción indirecta con reemplazo de muestras de cal [14]

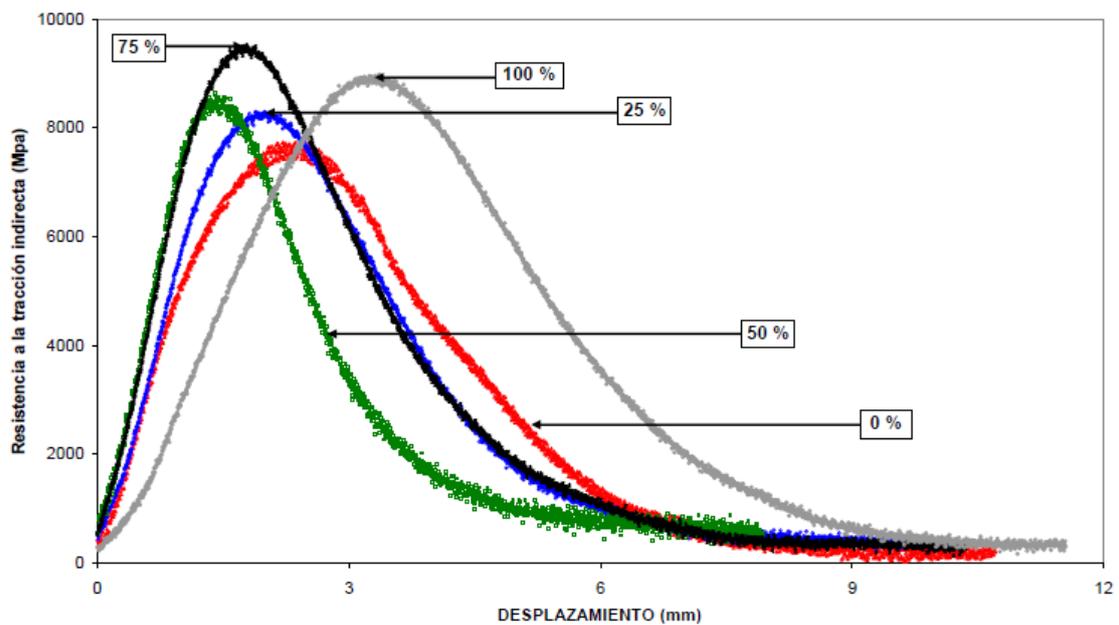


Figura 7: Resistencia a la tracción indirecta con reemplazo de muestras de ceniza volante [14]

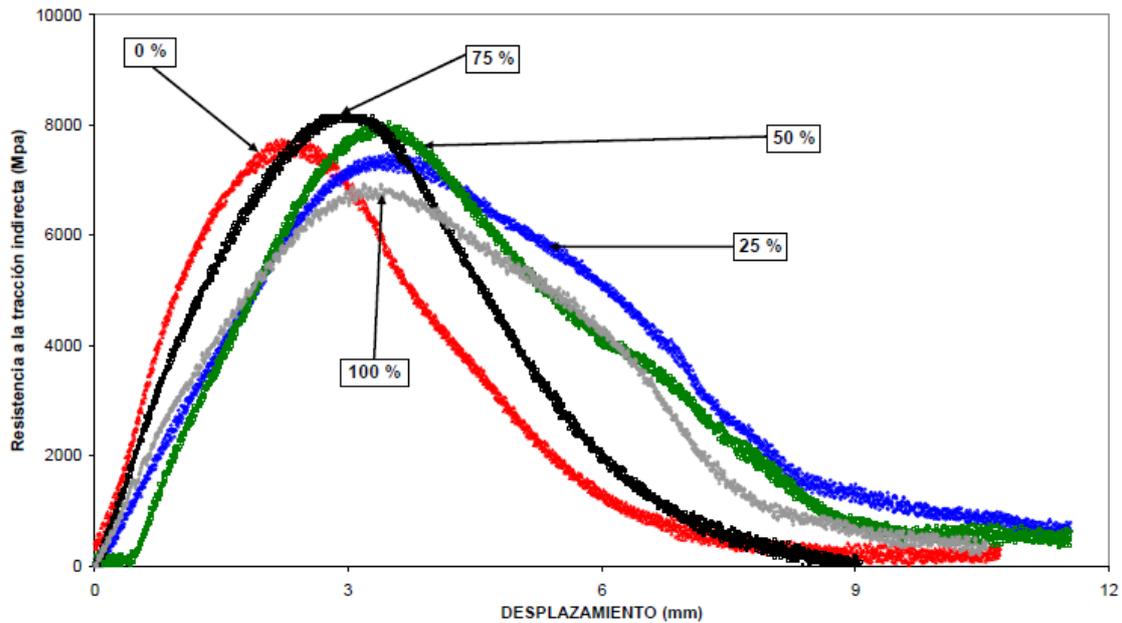


Figura 8: Resistencia a la tracción indirecta con reemplazo de muestras de cemento [14]

Otros investigadores, como Montepara [15], estudiaron el efecto de diferentes filleres en la resistencia a la fisuración de másticos bituminosos mediante el ensayo de tracción directa desarrollado por Superpave para betunes (AASHTO TP3-97), cuyas características se describen en la figura 9. Paralelamente, también analizaron otras propiedades en mezclas bituminosas elaboradas con los mismos filleres, empleando betunes convencionales y modificados con polímeros.

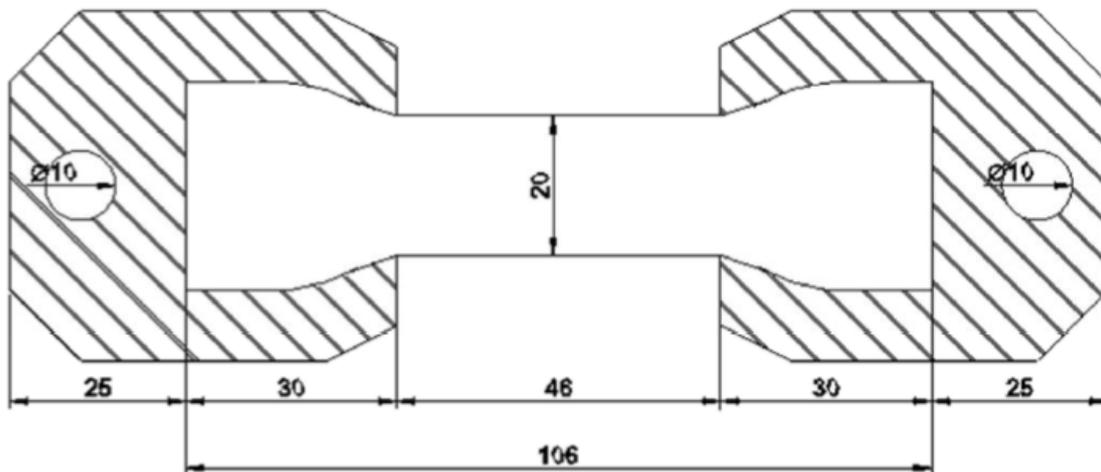


Figura 9: Geometría de la probeta de mástico para ensayar a tracción directa [15]

Los filleres estudiados fueron uno calizo, uno arcilloso y dos combinaciones: calizo y cal hidratada (20%) y arcilla y cal hidratada (20%). El ensayo se llevó a cabo a una temperatura de 10°C y fue complementado con un análisis de imágenes digitales. Los resultados mostraron que la resistencia de algunas mezclas estaba afectada por la naturaleza del filler (como el módulo resiliente y la energía de fractura), mientras que otras (como la resistencia a tracción y la fluencia) dependían mayoritariamente del betún empleado. Contrariamente, la resistencia de los másticos sí resultó ser dependiente del tipo de filler empleado.

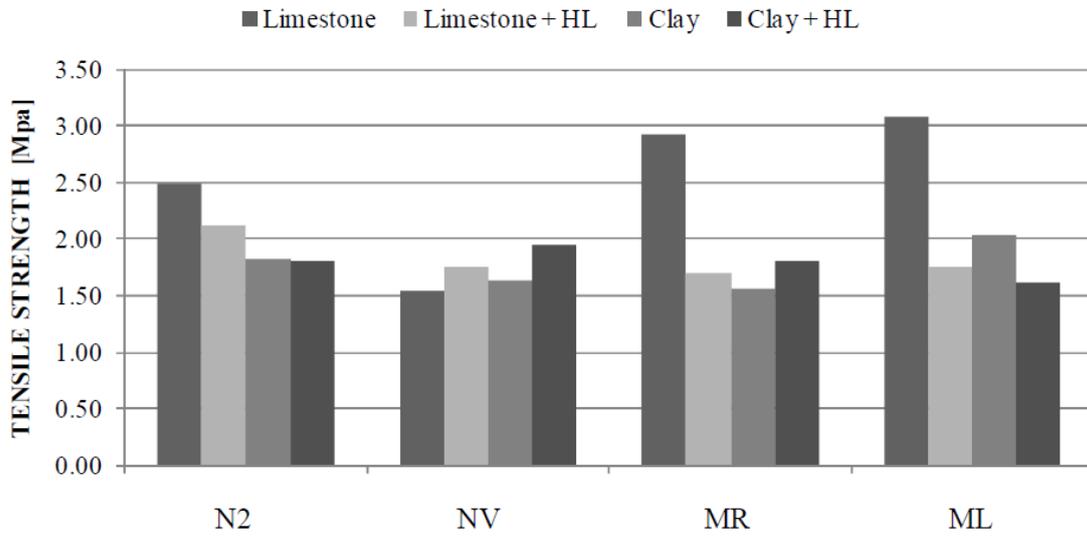


Figura 10: Resistència a tracció de les mesclages bituminoses elaborades amb N2 i NV (betunes convencionals), i MR i ML (betunes modificats amb SBS), [15].

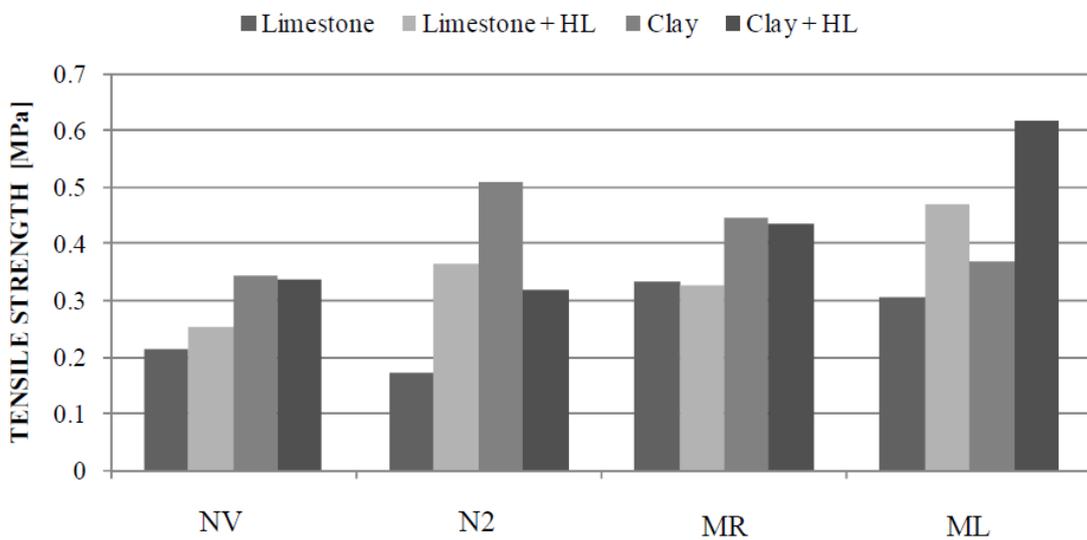


Figura 11: Resistència a tracció de les mastics bituminoses elaborades amb N2 i NV (betunes convencionals), i MR i ML (betunes modificats amb SBS), [15].

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el procedimiento realizado en la fabricación de las probetas, su posterior ensayo de densidad (aparente y máxima) y el ensayo Fénix. Todo este procedimiento se ha realizado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Con la realización del estudio experimental se analiza el comportamiento de cada una de las mezclas bituminosas elaboradas con diferentes tipos de filler y ensayadas a 5°C y 20°C de temperatura constante con la finalidad de determinar su resistencia a la fisuración.

Las mezclas bituminosas se han fabricado añadiendo 3 tipos diferentes de filler de origen calizo, cemento y cal, con la finalidad de ensayar y analizar posteriormente sus propiedades y comportamiento en cuanto a carga máxima, resistencia a tracción, desplazamiento a carga máxima y a rotura, índices de tenacidad de rigidez a tracción, y energía de fractura.

3.2 Plan de trabajo

Para determinar el efecto del tipo de filler (calizo, cemento, cal) sobre la resistencia a la fisuración de una mezcla bituminosa discontinua (tipo BBTM 11B), se han fabricado 9 series con diferentes proporciones de filler, de 5 probetas Marshall cada serie, haciendo un total de 45 probetas, de las cuales se emplearon 4 probetas de cada serie, es decir, un total de 36 probetas para el ensayo Fénix.

La probeta restante de cada serie (en total, 9 probetas) se ha desmenuzado para hacer el cálculo del porcentaje de huecos y la densidad máxima.

En resumen, se obtuvieron para el ensayo Fénix 36 probetas enteras, que han resultado en un total de 72 probetas semicilíndricas para ser ensayadas:

- ✓ 36 medias probetas a 5°C
- ✓ 36 medias probetas a 0°C

Estas probetas se diferencian en su tipo y contenido de filler, Tabla 4.

Cantidad de probetas por serie	Tipo de filler por serie
5	100 % cemento
5	100 % calizo
5	100 % cal
5	25% cemento / 75% cal
5	75% cemento / 25% cal
5	25% cemento / 75% calizo
5	75% cemento / 25% calizo
5	25% cal / 75% calizo
5	75% cal / 25% calizo
Total = 45	

Tabla 4: Proporciones de filler para cada serie.



Figura 12: Mitades de probetas identificadas



Figura 13: Probeta desmenuzada manualmente

3.3 Materiales utilizados

Para la fabricación de la mezcla bituminosa discontinua BBTM 11B, los materiales están estipulados en el artículo 543 del PG-3. Se caracterizan por estar compuestos por betún, áridos y filler; estos materiales son:

- a) Árido grueso: pórfido
- b) Árido fino: calizo
- c) Filler: calizo (carbonato cálcico), cal (hidróxido de calcio), cemento.

d) Betún: 35/50.

a.) Árido grueso

Origen pórfido:	capazo 1: 45 grs.	pasa 16 / retiene 11,2	(45 grs.)
	capazo 2: 243 grs.	pasa 11,2 / retiene 8	(288 grs.)
	capazo 3: 405 grs.	pasa 8 / retiene 4	(693 grs.)
	capazo 4: 35,1 grs.	pasa 4 / retiene 2	(728,1 grs.)

b.) Árido fino

Origen calizo:	capazo 5: 76,5 grs.	pasa 2 / retiene 0,5	(804,6 grs.)
	capazo 6: 53,1 grs.	pasa 0,5 / retiene 0.063	(857,7 grs.)

c.) Filler (4.7% sobre árido) → (42,3 grs.)
 (calizo, cal y cemento)

Peso Total Probeta: **900 grs**

d.) Betún: 35/50 , 5% sobre mezcla.

Estas proporciones dan resultado a una probeta compactada de 947.4 grs. de peso, altura promedio de 5 a 5,5 cm con un diámetro de 10,16 cm.

Áridos grueso tamizados en el laboratorio:

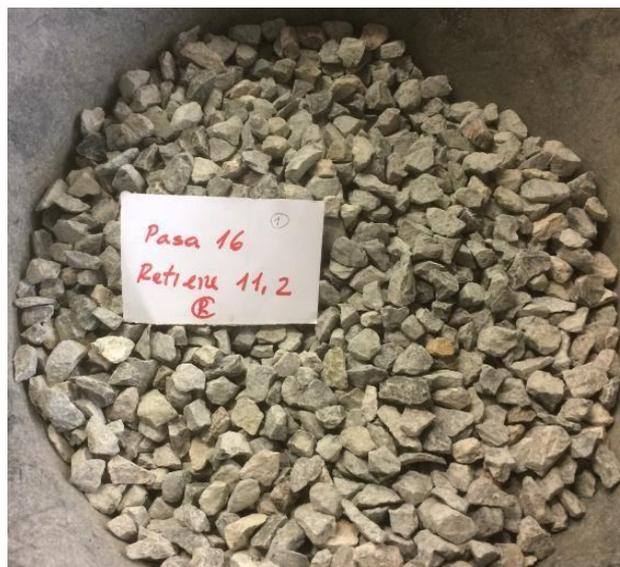


Figura 14: Capazo 1, árido 11.2 mm



Figura 15: Capazo 2, árido 8 mm



Figura 16: Capazo 3, árido 4 mm



Figura 17: Capazo 4, árido 2mm

Áridos fino tamizados en el laboratorio:



Figura 18: Capazo 5, árido 0,5 mm



Figura 19: Capazo 6, árido 0,063 mm filler calizo de recuperación sin limpieza

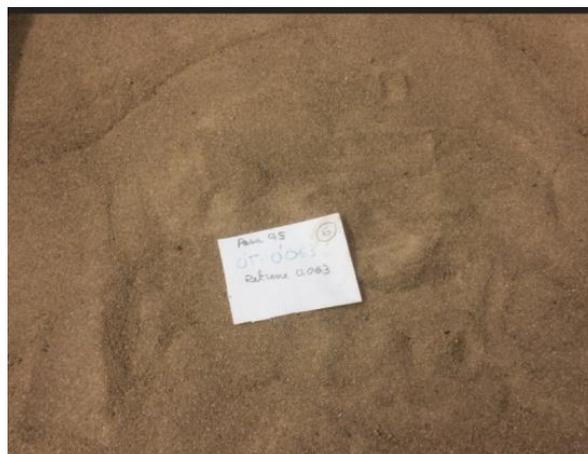


Figura 20: Árido 0.063 mm, filler calizo de recuperación después de ser limpiado y secado

Los áridos que hemos empleado en la fabricación de las mezclas discontinuas BBTM 11B para nuestro ensayo son áridos pórfidos y calizos, provenientes de la cantera La Ponderosa (Tarragona).

Los pórfidos son rocas ígneas formados por enfriamiento de temperaturas muy elevadas y solidificación del magma, el resultado es la formación de cristales cuarzo, feldespato entre otros minerales que se van incrustando a la base, son ricos en silicio.

Los áridos calizos provenientes de la roca sedimentaria caliza, son los que mejoran a la adhesividad en la fabricación de mezclas bituminosas.

Los porcentajes de áridos están especificados en la tabla 543.8 Husos granulométricos de la normativa UNE-EN 933-2.

TIPO DE MEZCLA (**)	ABERTURA DE LOS TAMICES. NORMA UNE-EN 933-2 (mm)								
	22	16	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
BBTM 8B (*)			100	90-100	42-62	17-27	15-25	8-16	4-6
BBTM 11B (*)		100	90-100	60-80		17-27	15-25	8-16	4-6
BBTM 8A (*)			100	90-100	50-70	28-38	25-35	12-22	7-9
BBTM 11A (*)		100	90-100	62-82		28-38	25-35	12-22	7-9
PA 16	100	90-100		40-60		13-27	10-17	5-12	3-6
PA 11		100	90-100	50-70		13-27	10-17	5-12	3-6

(*) La fracción del árido que pasa por el tamiz 4 mm y es retenida por el tamiz 2 mm (norma UNE-EN 933-2), será inferior al ocho por ciento (8%).

(**) Se ha omitido en la denominación de la mezcla la indicación del tipo de ligante por no ser relevante a efectos de esta tabla.

Tabla 5: Porcentajes de áridos para cada tamiz según el tipo de mezcla.

Para el ensayo del presente TFG, se ha definido la siguiente granulometría:

Tamiz(mm)	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
Pasa(%)	100	95	68	23	19,1	10,6	4,7

Tabla 6: Porcentajes de áridos para cada tamiz en este TFG

3.4 Preparación de los materiales

3.4.1 Determinación del peso para cada granulometría

Se calculan los pesos para cada tamiz con los % establecidos en la granulometría.

Tamiz(mm)	Pasa (%)	Retenido (%)	Peso (g) retenido	Peso (g) acumulado	Peso (g) Total áridos
16	100				900
11,2	95	5	45	45	
8	68	27	243	288	
4	23	45	405	693	
2	19,1	3,9	35,1	728,1	
0,5	10,6	8,5	76,5	804,6	
0,063	4,7	5,9	53,1	857,7	
Filler		4,7	42,3	900	

Tabla 7: Granulometría para una mezcla de 900 grs.

3.4.2 Tamizado y limpieza de los áridos

En la sección especial dotada de máquinas y accesorios para tamizar por vibración, en el laboratorio de Caminos, para los áridos gruesos se han utilizado los tamices: 16, 11,2; 8; 4; 2 mm y para los áridos finos los tamices 0,5 y 0,063 mm.

El tiempo aproximado para tamizar cada árido fue de 10 minutos para cada tamaño diferente.



Figura 21: Muestras de tamices



Figura 22: Maquina tamizadora por vibración



Figura 23: Limpieza del filler calizo de recuperación, fracción 0.063 lavado con agua

La bandeja con el árido de fracción 0.063, filler de recuperación lavado se pone en una cámara a 25°C durante 24 hrs., Para su secado adecuado y eliminar toda humedad.

3.4.3 Tara de áridos y filleres.

Se realiza por separado el pesado de los áridos según su granulometría en unas bandejas metálicas y los filleres de aportación se pesan por separado en unos vasos de plástico, todo este procedimiento de pesar los áridos y filleres se hace siguiendo lo indicado en la Tabla 7.

En total se han pesado 45 bandejas metálicas con áridos (5 bandejas para cada serie) y 45 vasos con filleres de aportación (5 vasos para cada serie). Es entonces cuando se da comienzo a la fabricación de las probetas.



Figura 24: Pesado primer árido 11.2 mm. 45 gr



Figura 25: Pesado árido grueso y finos, a falta del filler de aportación (42,3 gr)



Figura 26: Mezclas homogenizada



Figura 27: Filler pesado para fabricación de 3 series

3.5 Fabricación de las probetas

Para empezar a fabricar las probetas, los áridos deben estar secos, para que no tengan humedad que pueda influir en el peso de la mezcla.

Se ponen las bandejas con los áridos a la cámara a una temperatura de 160°C, por un período mínimo de unas 4 horas antes de empezar a fabricar.

En otra cámara a 160°C, el betún durante 1hr. A 1,30 h. antes de empezar a fabricar. El betún no puede estar por más de 2,30 h, de lo contrario sufre un deterioro de sus características y propiedades. También ponemos en esta cámara los moldes metálicos, por unas 12 horas para poder conservar una temperatura constante de la mezcla.

También se recortan 90 papeles de igual diámetro interior que los moldes (10,16 cm), para colocar dentro de los mismos y evitar que la muestra se estropee en el momento de compactar la mezcla bituminosa.

Se coge una de las bandejas metálicas con el contenido de áridos homogenizado, como se muestra en la figura 28, se vierte en un recipiente parecida a una olla con un asa alargada que facilita las tareas de sujeción y manipulación durante la operación de mezclado en seco para homogenizar la mezcla entre los áridos, figura 29. Esta olla

estará previamente en la estufa, para que se caliente y mantenga la temperatura constante de los áridos (150 a 160°C).



Figura 28: Inicio de la fabricación



Figura 29: Mezclado en seco de los áridos

Al alcanzar los áridos una temperatura de 150 a 160°C, se añade con precisión y rapidez la cantidad de ligante, previamente calculado de la siguiente manera.

3.5.1 Cálculo peso del betún (Pb)

Cálculo peso del betún (Pb):

Pb: peso del betún **Pm:** peso de la mezcla.

$$\mathbf{Pb = 5\% Pm} \qquad \mathbf{Pm = (900 \text{ gr} + Pb)}$$

$$\mathbf{Pb = 5/100 \times Pm = 0.05 \times (900 + Pb) = 0.05 \times 900 + 0.05 \times Pb}$$

$$\mathbf{Pb - 0.05 \times Pb = 45} \quad \rightarrow \quad \mathbf{Pb (1 - 0.05) = 45} \quad \rightarrow \quad \mathbf{Pb = 45 / (1 - 0.05)}$$

$$\mathbf{Pb = 47.4 \text{ gramos}}$$

Después de agregar el ligante, se pone nuevamente en la estufa la olla y mezclamos los áridos con el betún hasta ver una mezcla homogénea del color del betún y enseguida agregamos el filler de aportación, y nuevamente mezclamos hasta obtener una mezcla homogénea con color característico del betún, como podemos apreciar en las figuras 30 y figura 31.



Figura 30: Vertido betún sobre áridos



Figura 31: Adición filler en el proceso de mezclado

Después de haber añadido el filler y hemos conseguido nuevamente homogenizar la mezcla, procedemos a verter en el molde, pero antes se mide la temperatura de los áridos con un termómetro digital acercando el sensor lo más próximo a la mezcla para obtener una temperatura de 155 y 160°C, Figura 32.

Se saca el molde sacamos de la cámara donde ha estado a una temperatura constante de 155 a 160°C, este molde tiene una placa circular de base en la cual se pone el papel circular preparado anticipadamente, y sobre esta base se coloca el molde que tiene una forma de collarín y se vierte rápidamente la mezcla y se distribuye uniformemente en el interior del molde con una espátula, se coloca nuevamente otro disco de papel, Figura 33.



Figura 32: Medida temperatura de la mezcla



Figura 33: Vertido de la mezcla en el molde

La compactación de la mezcla se hace en la compactadora Marshall. Figura 34, las características técnicas están especificadas en la norma UNE-EN 12697-30.

El molde relleno con la mezcla bituminosa caliente y la placa como base del collarín, se colocan en la base de la compactadora Marshall, se fija rápidamente mediante un soporte de fijación, se cierra la compactadora Marshall herméticamente y se pone en marcha, previamente programada para dar 50 golpes; figura 34. Cuando la compactadora se detiene automáticamente, se abre la compactadora y se extrae el molde para cambiar la parte inferior y proceder a compactar la otra cara de la mezcla.



Figura 34: Programación para cantidad de golpes



Figura 35: Compactadora Marshall

Después de completar los 50 golpes por cara, la mezcla ya está compactada. Entonces, con una espátula se retiran los discos de papel de ambos lados de las caras bases, figura 36, y después de un día se procede a desmoldar, con la ayuda de un gato hidráulico; figura 37.



Figura 36: Probetas compactadas sin desmontar



Figura 37: Mecanismo desmolde probetas

Una vez desmoldadas las probetas se señalizan para identificar cada una de ellas para saber el orden de fabricación y su composición.



Figura 38: Señalización e identificación de las probetas



Figura 39: Medición de probetas con pie de rey

3.6 Cálculo de la densidad máxima y contenido de huecos

3.6.1 Densidad máxima

Se define la densidad máxima de un material bituminoso a temperatura conocida, como la masa por unidad de volumen, sin los huecos de aire.

Se sigue el procedimiento según la normativa UNE-EN 12697-5. Se pesan los dos picnómetros vacíos con la pieza de la cabeza (m_1), cada picnómetro vacío con la pieza de la cabeza, además de introducir aproximadamente la mitad de la probeta desmenuzada en cada picnómetro (m_2).

A continuación, se llena el picnómetro con agua destilada y se saca el aire que queda atrapado aplicando un succionador a presión durante 15 minutos por cada picnómetro. Los dos picnómetros durante 30 minutos estarán en baño a temperatura 25°C, mientras se saca el aire al vacío.

Después se retira del baño y se rellena con agua destilada hasta la marca de medida que indica en el picnómetro y se pesa (m_3 = masa del picnómetro incluido la cabeza + muestra del ensayo + agua).

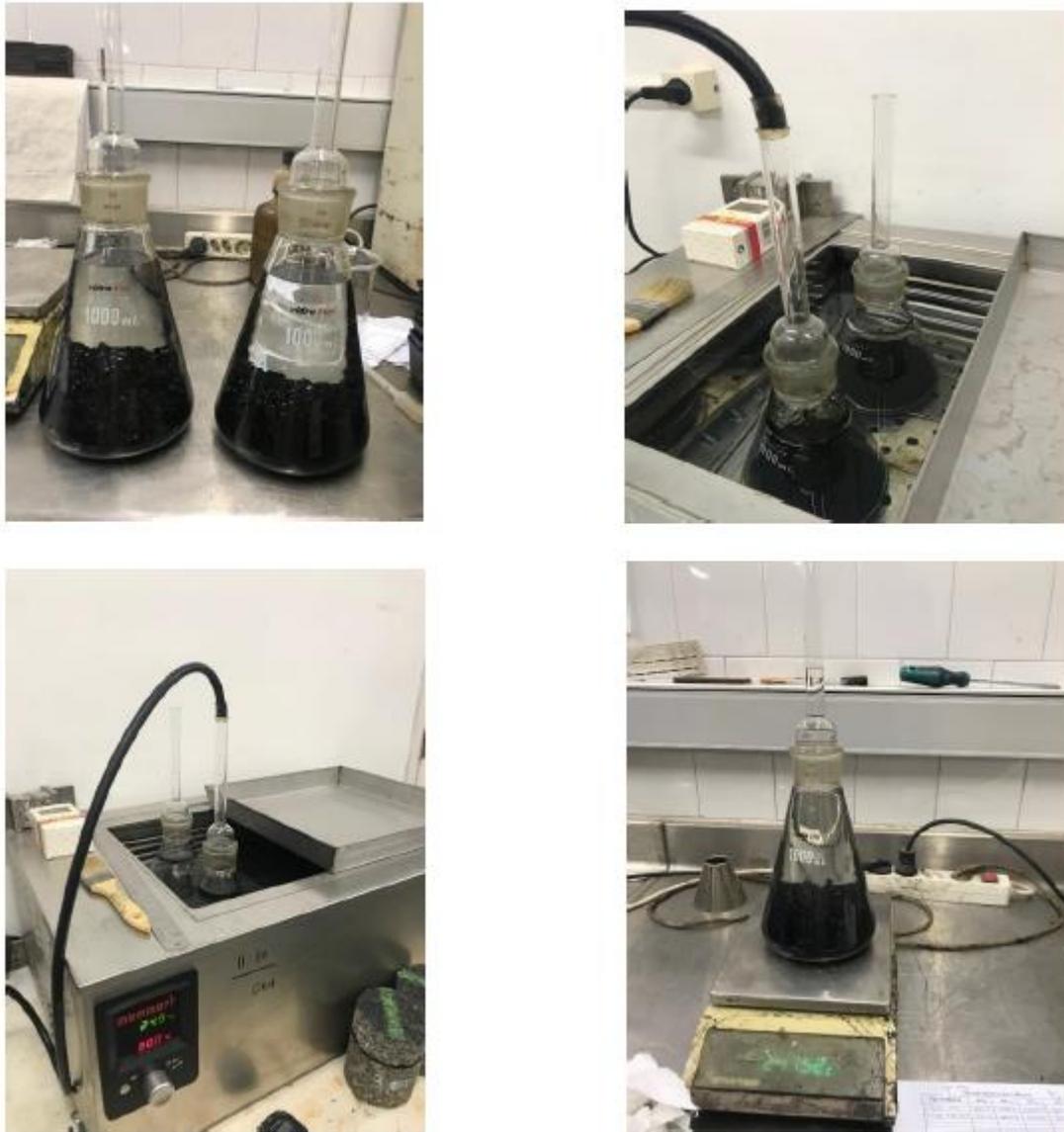


Figura 40: Determinación de la densidad máxima procedimiento volumétrico

La densidad máxima se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}}$$

Donde:

ρ_m : Densidad máxima de la mezcla bituminosa determinada por el procedimiento volumétrico.

m_1 : Masa del picnómetro más la pieza de cabeza (g)

m_2 : Masa del picnómetro más la pieza de cabeza, la mezcla desmenuzada y agua (g)

m_3 : Masa del picnómetro más la pieza de cabeza, muestra desmenuzada y agua (g)

V_p : Volumen del picnómetro, lleno hasta la marca indicada (cm³).

ρ_w : Densidad del agua a temperatura de ensayo (g/cm³).

3.6.2 Contenido de huecos

El contenido de huecos de aire de una mezcla se define como el volumen ocupado por los huecos de aire en una probeta bituminosa, expresado en porcentaje del volumen total de la probeta.

El porcentaje de huecos de una mezcla se puede calcular mediante la norma UNE-EN 12697-8, utilizando la siguiente expresión:

$$Huecos = \frac{\rho_m - \rho_{ap}}{\rho_m} * 100$$

Donde:

Huecos: Contenido de huecos de aire en la mezcla (%)

ρ_m : Densidad teórica máxima de la mezcla (g/cm³)

ρ_{ap} : Densidad aparente de la probeta (g/cm³), determinada con el método geométrico según la norma UNE-EN 12697-6:

$$\rho_{ap} = \frac{m_p}{\pi * R^2 * h}$$

Donde:

M_p : Masa de la probeta en seco

R: Radio de la probeta

h: altura de la probeta

3.7 Ensayo utilizado en el presente TFG

3.7.1 Ensayo Fénix

3.7.1.1 Introducción

El ensayo Fénix es un nuevo ensayo desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, para la caracterización de las mezclas bituminosas frente a la fisuración.

Este nuevo ensayo a tracción permite evaluar los mecanismos de fisuración en las mezclas asfálticas, representando este fenómeno de deterioro mediante un ensayo sencillo, económico y fácil de ejecutar, [16].

Presenta varias ventajas, ya que el ensayo Fénix permite aplicar fácilmente tanto a probetas fabricadas en laboratorio (Marshall o compactador giratorio) como a testigos, además es aplicable a mezclas densas, semidensas, gruesas y microaglomerados.

Cabe mencionar que es un procedimiento efectivo para caracterizar el comportamiento a la fisuración en mezclas asfálticas a variables como: envejecimiento, tipo de ligante, contenido de ligante, granulometría, temperatura de ensayo y temperatura de compactación.

3.7.1.2 Procedimiento experimental

Las probetas empleadas en el ensayo se fabrican mediante el ensayo Marshall, en el caso de las mezclas discontinuas, se han compactado por impacto mediante 50 golpes por cara.

Seguidamente se divide la probeta en dos y se realiza una hendidura de 6 mm de longitud a lo largo de toda la probeta. Posteriormente, una vez preparada la probeta con la fisura inducida, mediante el uso de una resina epoxi, se fijan a las dos secciones de la cara plana, separadas por la entalladura, unas placas de acero; figura 41.



Figura 41: Probeta cortada para el ensayo Fénix

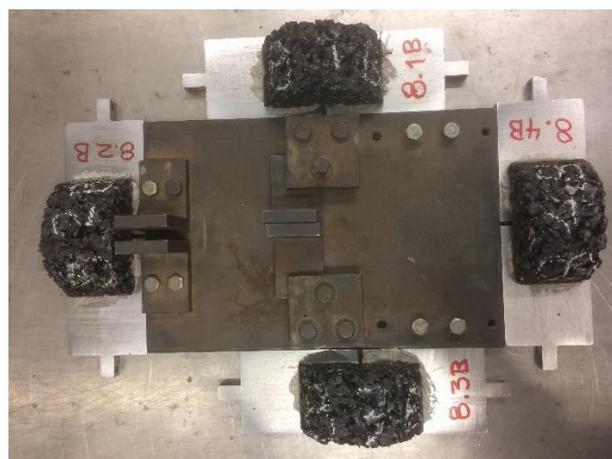


Figura 42: Probeta fijada a las placas con resina epoxi

Las placas de acero se fijan a los soportes de la prensa en posición vertical permitiendo un movimiento de rotación respecto a las fijaciones; figura 44. Una vez colocada la probeta a la prensa, mediante control de desplazamiento del pistón, se le somete a un esfuerzo de tracción a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min y a diferentes temperaturas de ensayo (20°C y 5°C). Para ello las probetas deberán estar previamente estabilizadas a la temperatura de ensayo. Para el ensayo Fénix se utiliza una prensa MTS que dispone de una cámara ambiental capaz de controlar la temperatura constante; figura 42.



Figura 43: Maquina usada para el ensayo Fénix



Figura 44: Probeta antes de poner en la prensa



Figura 45: El antes y después de la prensa del ensayo Fénix, se aprecia la fisuración y ductilidad

Durante la ejecución del ensayo, mediante un equipo de adquisición de datos, con un programa que permite guardar los datos hasta los 10 mm de desplazamiento, se van registrando las cargas generadas en función del desplazamiento de las placas de acero; figura 45. Con estos valores, juntamente con las medidas de la probeta, se puede calcular la energía disipada en el proceso de fisuración y los parámetros mecánicos comentados anteriormente que sirven para caracterizar la mezcla.

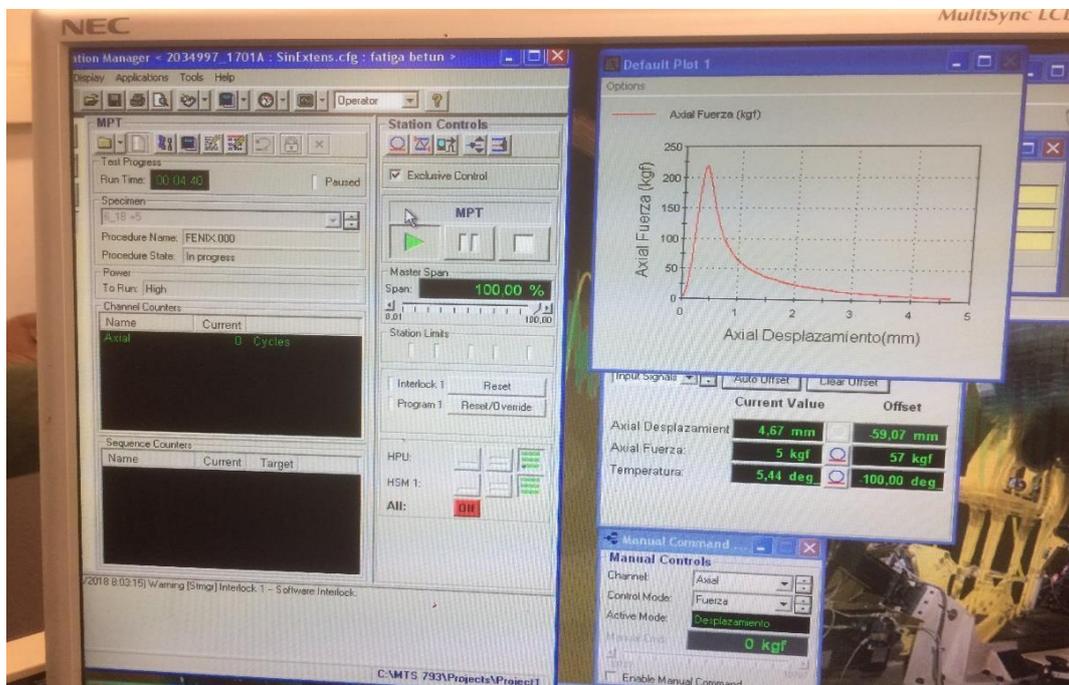


Figura 46: Máquina y registros de datos del ensayo Fénix

Después de haber terminado el ensayo, las placas metálicas se colocan sobre la plancha calefaccionada; figura 46. Para quitar las probetas pegadas anteriormente con resina, porque a altas temperaturas se reblandece el ligante y se limpian las placas con facilidad para continuar con el ensayo de otra serie.



Figura 47: Plancha calefaccionada

El ensayo Fénix permite obtener una curva carga-desplazamiento como la que se muestra en la figura 48.

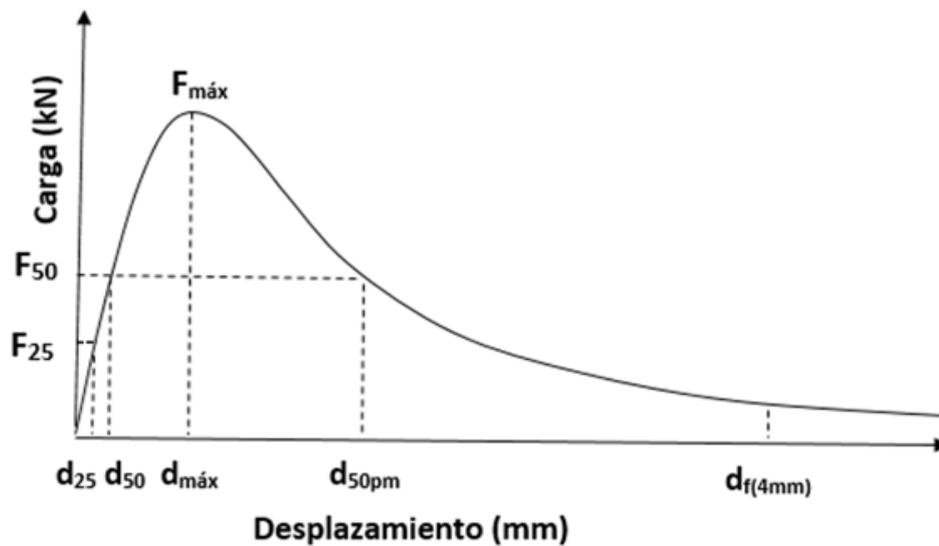


Figura 48: Curva carga-desplazamiento

El equipo de adquisición de datos va registrando el desplazamiento y las cargas que se van produciendo durante el ensayo. Se considera el fin del ensayo cuando el desplazamiento es superior a 4 mm y la fuerza que se está dando es de 5 kN o menos. A continuación, se determinan los parámetros que se describen a continuación:

Carga máxima a tracción ($F_{m\acute{a}x}$): registrada en el ensayo (kN).

Desplazamiento a carga máxima ($\Delta F_{m\acute{a}x}$): Desplazamiento que sufre el pistón al someterse al ensayo (mm).

Resistencia a tracción (RT): Relación entre la carga máxima y el área de fractura.

$$RT = \frac{1000 \times F_{m\acute{a}x}}{h \times l}$$

Donde:

R_T : Resistencia a tracción (MPa)

$F_{m\acute{a}x}$: Carga máxima a tracción (kN)

h: Espesor de la probeta (m)

l: Longitud inicial del ligamento (m)

Energía de fractura (GF): Trabajo disipado en el proceso de fisuración dividido entre el área de fractura perpendicular a la fuerza aplicada.

$$GF = \frac{WD}{h \times l}$$

Donde:

GF: Energía de fractura por unidad de superficie en el proceso de fisuración (J/m²)

W_D : Trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga-Desplazamiento) (kN·mm)

h: Espesor de la probeta (m)

l: longitud inicial de ligamento (m)

Desplazamiento al 50% $F_{m\acute{a}x}$ postpico ($d_{0,5 PM}$) (mm): es el registrado por la mezcla una vez que el valor de la carga ha disminuido a la mitad de la carga máxima. Es el principal parámetro para determinar la deformación que padece.

Índice de tenacidad (IT): Es la energía disipada en el período de relajación multiplicada por un factor de fragilidad. Este factor representa el desplazamiento realizado desde la carga máxima hasta que la carga caiga a la mitad de su valor máximo. Como mayor sea el índice de tenacidad, más tenaz o más dúctil es la muestra.

$$IT = \frac{WD - WF_{m\acute{a}x}}{h \times l} \times (d_{0,5PM} - d_{m\acute{a}x})$$

Donde:

IT: Índice de tenacidad (J/mm)

W_D : trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga-Desplazamiento) (kN·mm)

$W_{F_{m\acute{a}x}}$: Trabajo disipado hasta carga máxima (kN·mm)

H: Espesor de la probeta (m)

L: Longitud inicial de ligamento (m)

$D_{0,5PM}$: Desplazamiento a $1/2F_{m\acute{a}x}$ (mm)

$d_{m\acute{a}x}$: Desplazamiento a $F_{m\acute{a}x}$ (mm)

Índice de rigidez a tracción (IRT): Relación entre el valor medio de la carga máxima y el desplazamiento a ese valor de carga antes de la carga máxima. Como menor sea I_{RT} mayor flexibilidad tiene la mezcla.

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{d_{50} - d_{25}} \times \frac{1000}{h \times l}$$

Donde:

I_{RT} : Índice de rigidez a tracción (MPa)

$F_{m\acute{a}x}$: Carga máxima a tracción (KN)

CAPÍTULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

Después de haber realizado el ensayo, se analizan los resultados obtenidos.

En mi TFG, se estudia: El efecto del tipo de filler (calizo, cemento, cal) sobre la resistencia a la fisuración de una mezcla bituminosa discontinua (tipo BBTM 11B); mediante la utilización del ensayo Fénix a tracción directa.

En este trabajo final de grado se han variado la proporción de % de filler, y las temperaturas de ensayo.

Por tal motivo, al hacer el análisis de resultados nos centramos en estos parámetros y los efectos que causan sus variaciones a la rigidez y ductilidad antes de llegar a la fisuración de las probetas.

4.2 Resultados, análisis de densidades y porcentaje de huecos en mezcla

Antes de estudiar el comportamiento de la resistencia a la fisuración mediante el ensayo Fénix, hemos calculado para cada una de las probetas a ensayar la densidad máxima de las mezclas y el contenido de huecos.

La determinación de las densidades aparentes y huecos en mezcla para cada una de las probetas se ha llevado a cabo mediante los procedimientos expuestos en el capítulo 3. Los resultados para estas determinaciones se muestran en la tabla 8, página 43.

Tipo de filler	Dens. Máx. (g/cm ³)	Dens. Ap. (g/cm ³)	Huecos (%)
Cemento 100%	2,565	2,116	17,5
Cemento 75% y cal 25%	2,561	2,130	16,9
Cemento 25% y cal 75%	2,527	2,102	16,8
Cal 100%	2,526	2,095	17,2
Cal 75% y calizo 25%	2,521	2,119	16,0
Cal 25% y calizo 75%	2,546	2,113	17,0
Calizo 100%	2,523	2,113	16,2
Calizo 75% y cemento 25%	2,552	2,096	17,9
Calizo 25% y cemento 75%	2,581	2,122	17,8
Cemento 100%	2,565	2,116	17,5

Tabla 8: Densidades máximas, aparentes y porcentaje de huecos

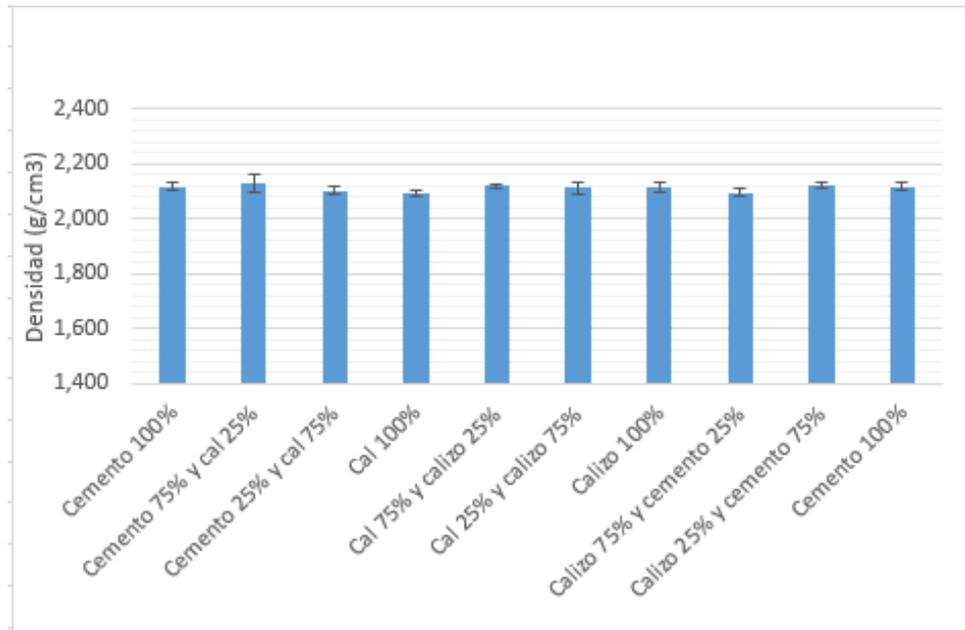


Figura 49: Evolución de densidades en mezcla para las diferentes probetas fabricadas

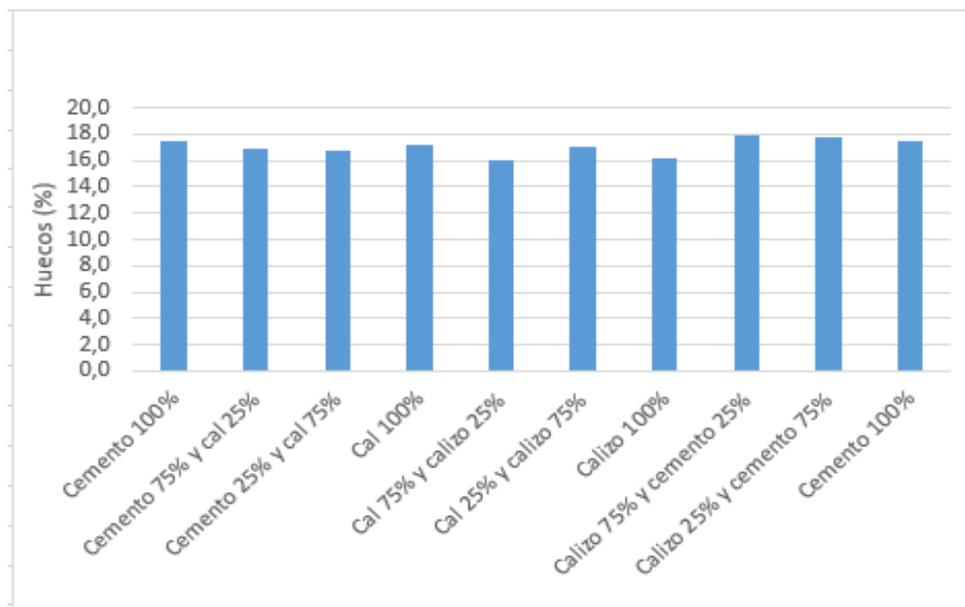


Figura 50: Evolución de huecos en mezcla para las diferentes probetas fabricadas

Observando los resultados:

Variación del criterio de huecos es pequeño, se nota un aumento en las mezclas que contienen 100% filler cemento, y combinación calizo-cemento.

Los resultados del ensayo cumplen con la normativa, UNE-EN 12697-30, [6].

La densidad está mucho más acotada, por lo que el comportamiento de la mezcla es comparable.

4.3 Resultados de los parámetros obtenidos del ensayo Fénix

Curvas carga-desplazamiento

Durante la ejecución del Ensayo Fénix, el equipo de adquisición registra las cargas generadas, las cuales son exportadas a un archivo. A partir de estos datos, se podrán dibujar las curvas Carga-Desplazamiento, con las cuales se obtendrán los parámetros del Ensayo Fénix, los cuales evalúan la resistencia a fisuración de las mezclas bituminosas.

Las probetas fueron ensayadas a dos temperaturas 20°C y 5°C, lo cual permite analizar el efecto de la temperatura en el comportamiento de la mezcla bituminosa. Además, el % de Filler y composición de áridos es igual para el ensayo a 20°C y 5°C.

A partir de la curva Carga-Desplazamiento se pueden obtener los valores de Carga Máxima a Tracción (Fmax), Resistencia a Tracción (RT), Índice de rigidez a tracción (IRT), Energía Disipada (GF), índice de Tenacidad (IT) y Desplazamiento al 50% carga post pico (d0,5 Pm).

Con estos parámetros se evalúa el comportamiento de las mezclas bituminosas relacionado con su resistencia a la fisuración.

4.3.1 Estudio de los parámetros obtenidos mediante el ensayo Fénix.

Para poder analizar los resultados con mayor detalle se compararán los parámetros Fénix para dos filleres y la combinación de ambos. Se han escogido tres parámetros: resistencia a tracción, índice de rigidez y desplazamiento al 50 % de la carga máxima, descartando la energía y la tenacidad.

En el caso de la energía, resulta difícil de evaluar, puesto que pueden presentarse casos de energía similar, pero con cargas máximas y desplazamientos muy diferentes, puesto que el parámetro de energía se obtiene integrando la curva carga-desplazamiento.

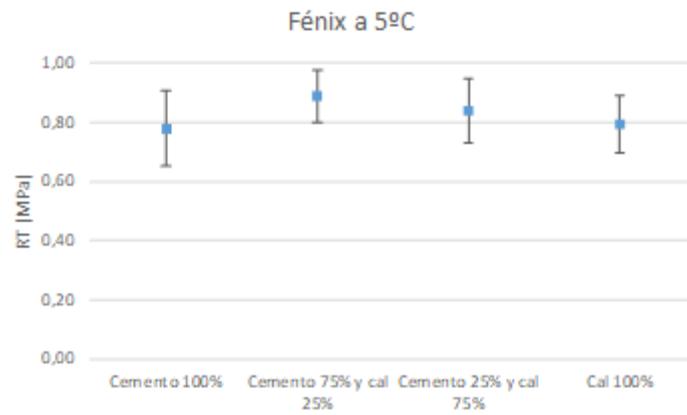
En el caso de la tenacidad, es un parámetro que está correlacionado con el desplazamiento al 50% de la carga máxima, pero este último tiene menor dispersión.

4.3.2 Resistencia a tracción (RT)

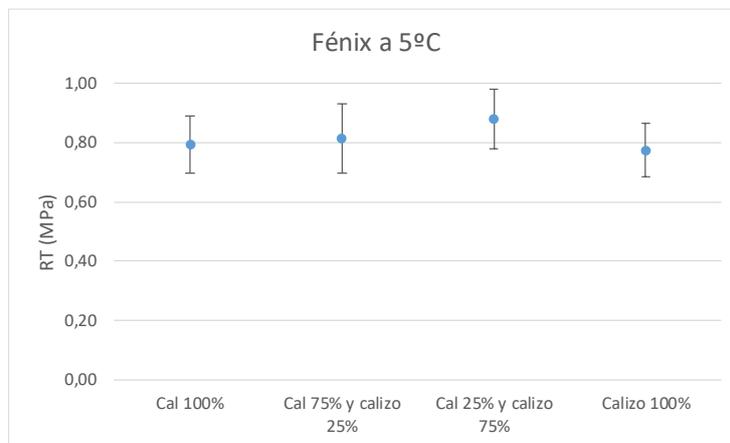
Es uno de los parámetros que define la rigidez del material; es la fuerza que se hace para generar un desplazamiento a tracción hasta la fisuración.

Se adjunta los resultados gráficos ensayados a 5°C y 20°C.

A



B



C

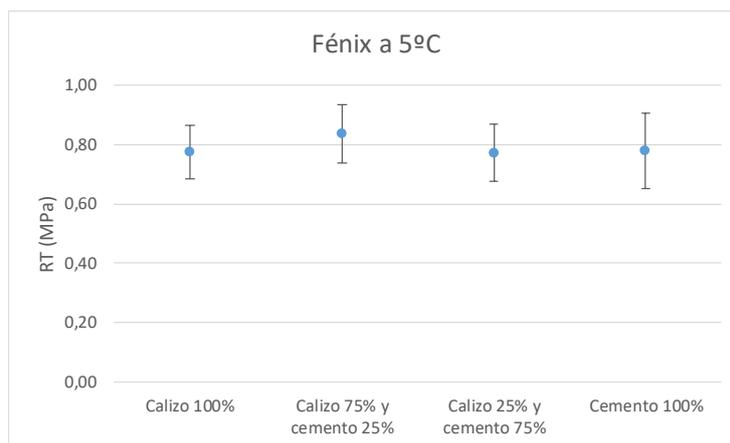
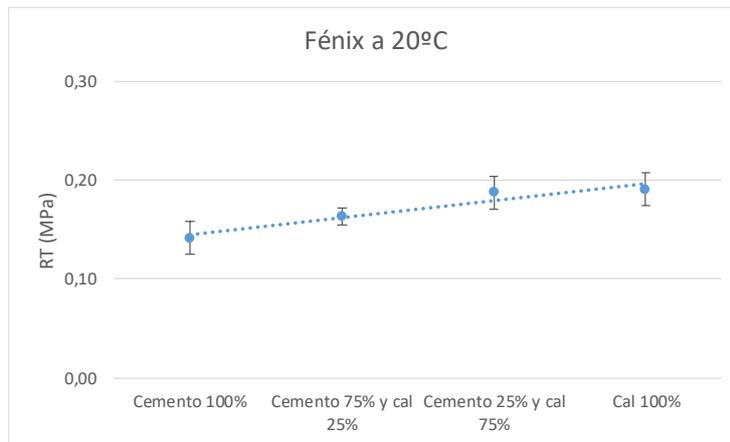


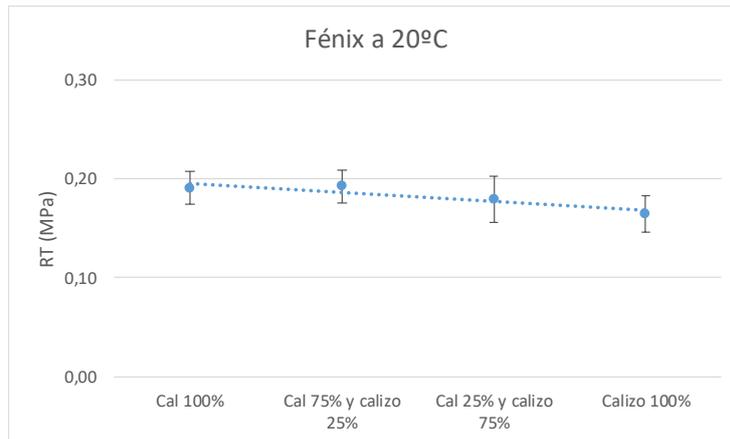
Figura 51: Fénix a 5°C (RT), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento

Ensayo a 20°C.

A



B



C

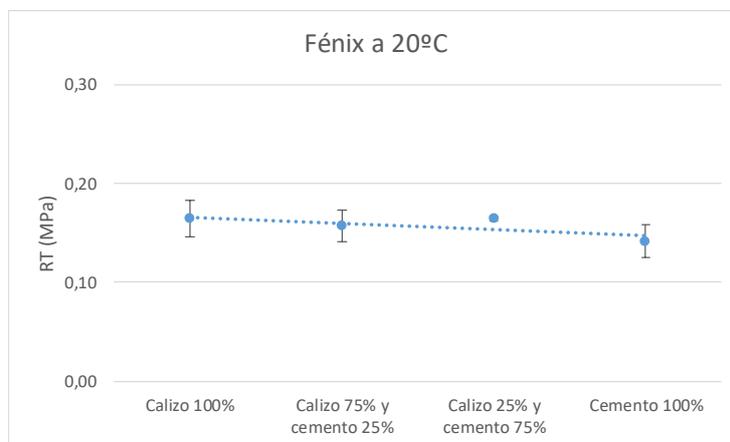


Figura 52: Fénix a 20°C (RT), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento

Se observa:

Que a medida que disminuye la temperatura de ensayo, aumenta la resistencia a la tracción, porque se rigidiza la mezcla.

A 20°C la aportación de cal 100% o en combinación con los filleres cemento y calizo, siempre y cuanto la cal se aporta en mayor %, da las mayores RT(0,15 y 0,20 MPa).

A 5°C no se aprecia diferencia del RT (0,8-0,9 MPa).

4.3.3 Índice de rigidez a tracción (IRT)

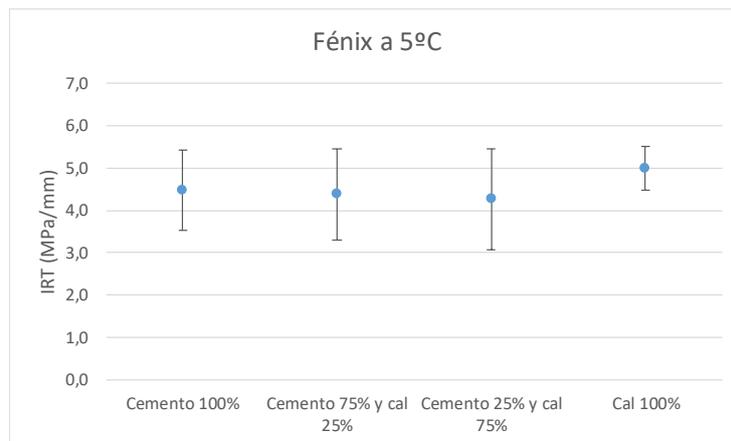
Es la pendiente de la curva carga-desplazamiento desde el 25 y 50% de la carga máxima.

Al ser mayor la pendiente entre el 25 y 50 %, la rigidez es mayor y menos rígido si la pendiente es menor.

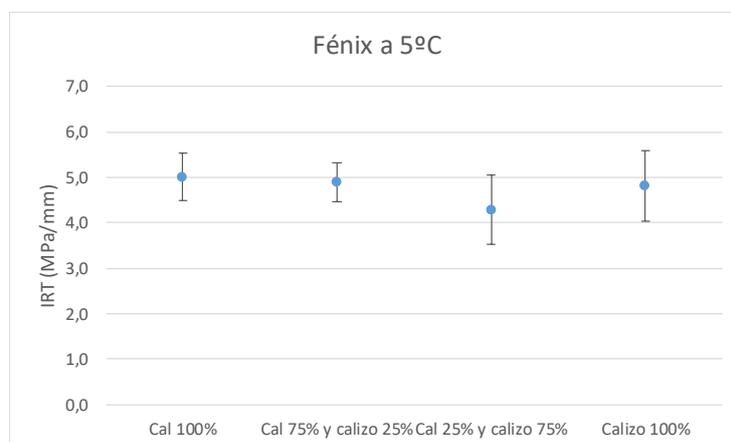
Sabemos también que a menor temperatura de ensayo (5°C), mayor es la rigidez.

Se adjunta los resultados gráficos ensayados a 5°C y 20°C.

A



B



C

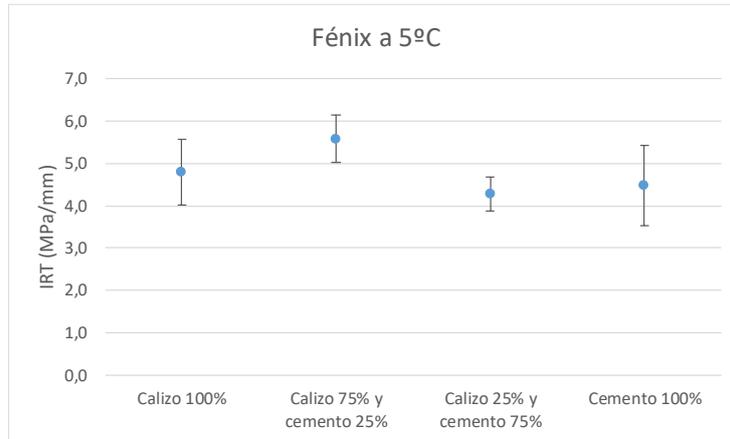
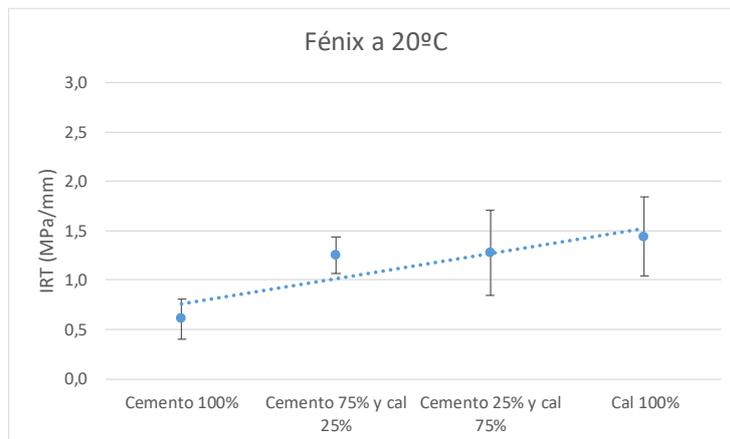


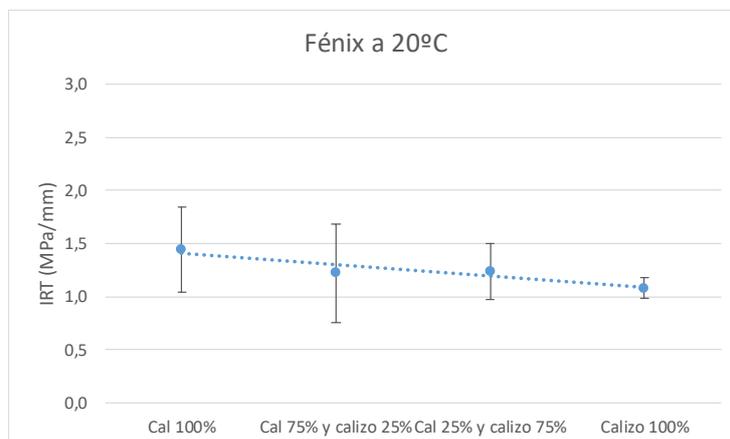
Figura 53: Fénix a 5°C (IRT), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento

Ensayo a 20°C.

A



B



C

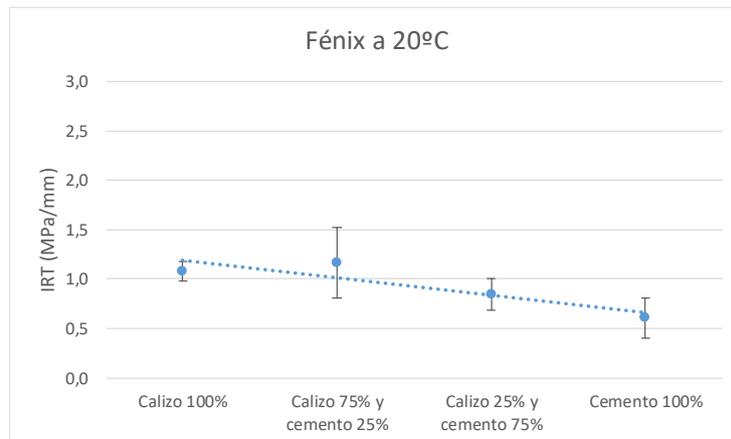


Figura 54: Fénix a 20°C (IRT), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento

Se observa:

Que cuando la temperatura de ensayo es 5°C, la probeta bituminosa es más rígida, y presenta valores más altos de IRT, esto significa que una probeta soporta menos deformación, influyendo a una temprana fisuración que conlleva a la rotura (frágiles).

A 20°C, la aportación de los filleres cal 100% y calizo 100%, y la combinación de los filleres cal y calizo aumentan la IRT, aunque los resultados tienen mayor dispersión, por lo que no se puede asegurar con la misma precisión que los demás casos.

A 20°C de ensayo la rigidez de la probeta es menor, pero más flexible, la aportación del filler cemento 100% disminuye la rigidez y la combinación con los filleres cal y calizo también influye en la disminución de la rigidez.

A 5°C, el IRT varía entre 4 y 5 MPa/mm, no apreciándose ninguna tendencia.

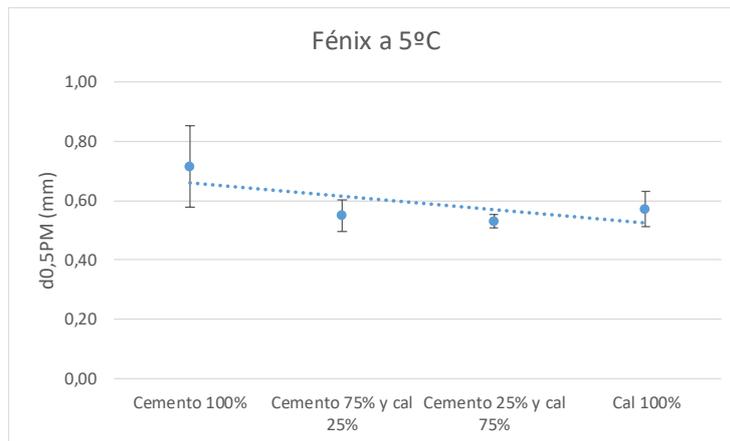
4.3.4 Desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona post-pico (d 0.5Pm)

El desplazamiento es el parámetro que nos indica la capacidad que tiene una mezcla bituminosa a admitir una cierta deformación sin llegar a romperse, por lo tanto, con mezclas frágiles se obtendrán valores menores, y al revés, con mezclas dúctiles obtendremos valores mayores.

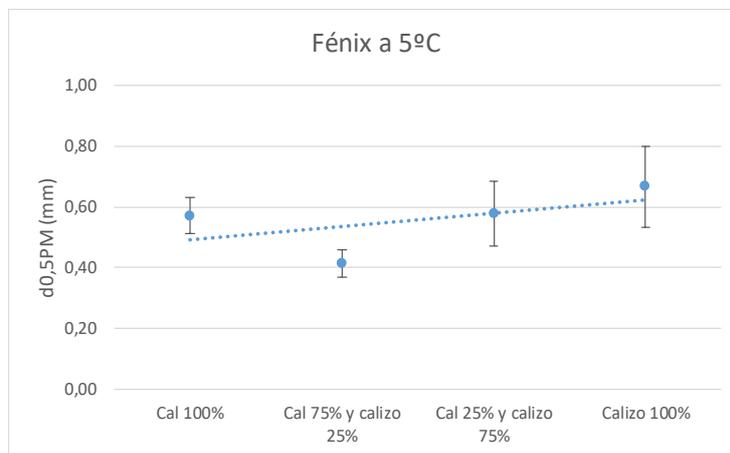
Las figuras 54 y 55, muestran los valores promedio del desplazamiento al 50% carga post pico de todas las probetas fabricadas. Con cada uno de los filleres y a los que se ha sometido la mezcla a diferentes temperaturas de ensayo.

Se adjunta los resultados gráficos ensayados a 5°C y 20°C.

A



B



C

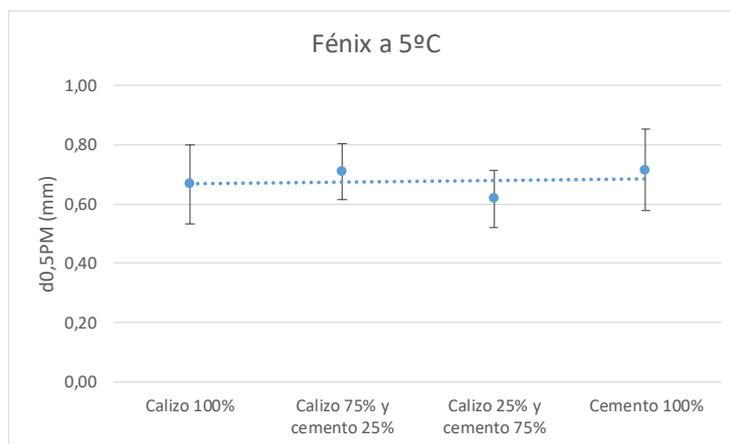
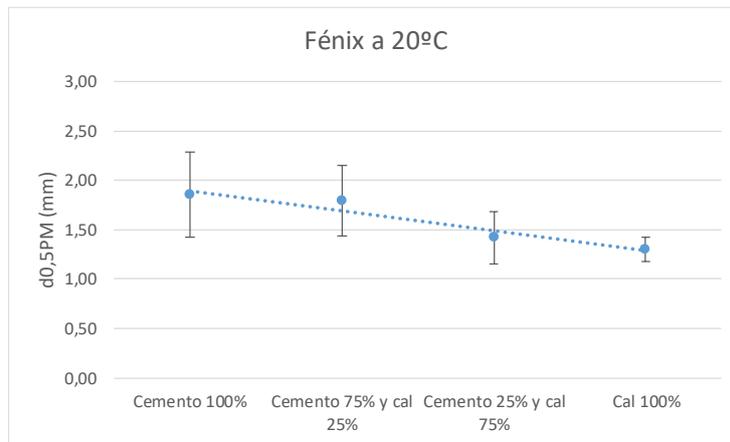


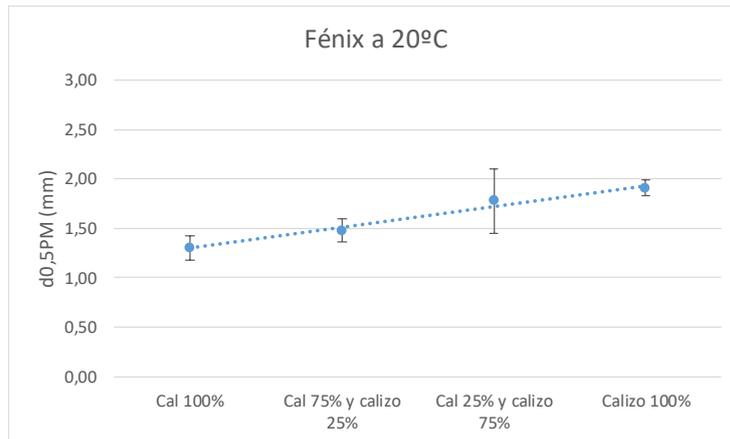
Figura 55: Fénix a 5°C (d 0.5 Pm), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento

Ensayo a 20°C

A



B



C

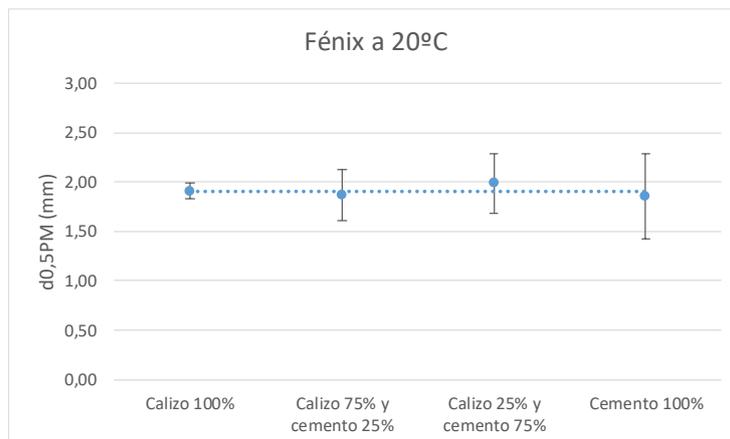


Figura 56: Fénix a 20°C (d 0.5 Pm), combinación filleres A: cemento-cal, B: cal-calizo y C: calizo-cemento

Se observa:

Que el ensayo a 20°C, la probeta bituminosa se vuelve más flexible, con valores más elevados de deformación.

Que en las probetas que empleamos los filleres cemento y calizo, al 100% o en sus respectivas combinaciones han influido positivamente en la flexibilidad de la mezcla bituminosa.

Es decir, el filler cal resta ductilidad a la mezcla la variación es grande, cercano a 2 mm para los filleres calizo, cemento y la combinación entre ambos.

En cambio, al utilizar la cal el desplazamiento se reduce a valores de 1,30 mm (65% del caso 25% calizo y 75% cemento).

A 5°C, los valores de d0,5 PM, oscila entre 0,41 y 0,72 mm, siendo igual en el caso de 20°C, los menores valores correspondientes al filler cal.

4.3.5 Análisis RT (MPa) vs D0,5PM (mm)

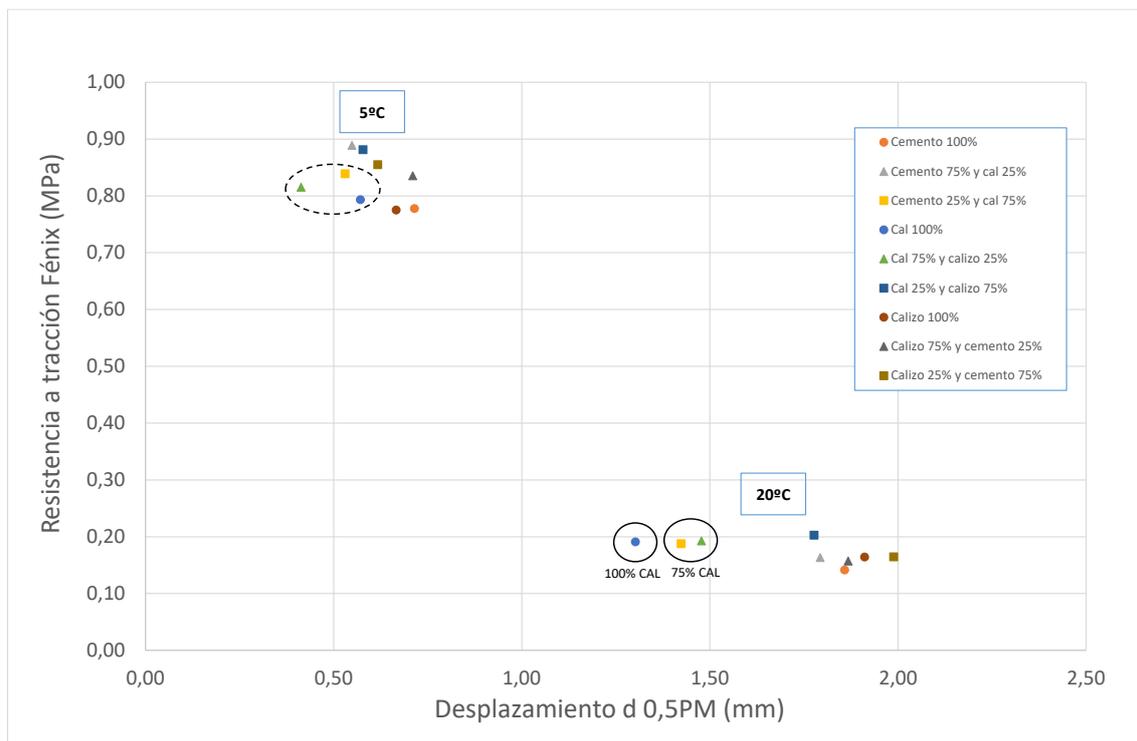


Figura 57: Análisis gráfica RT vs D0,5PM

Se observa:

Que la cal 100% y en combinación con el cemento y calizo, siempre la cal en mayor proporción, 75%.

Proporcionan a la mezcla bituminosa, características y propiedades similares que benefician y mejoran las prestaciones de las mezclas bituminosas.

A 5°C la resistencia a tracción es mayor y el desplazamiento menor (se observa en la mezcla bituminosa más fragilidad)

A 20°C la resistencia a tracción es menor y el desplazamiento mayor (se observa en la mezcla bituminosa más ductilidad)

Capítulo 5. CONCLUSIONES

Unos de los deterioros principales o más frecuentes en las capas de rodadura, son los fallos por fisuración, las causas constantes son; Las condiciones climáticas a las que están sometidas las carreteras, a las cargas del tráfico y a la fatiga.

Los deterioros por fisuración siempre estarán presentes, no se podrá eliminar; Pero si controlar, con periódicas tareas de conservación, así de esta manera podremos que la capa de rodadura cumpla su vida útil estimada entre 20 y 25 años.

El presente trabajo final de grado, se ha realizado esta investigación con el fin de evaluar; El efecto del tipo de filler (calizo, cemento, cal) sobre la resistencia a la fisuración de una mezcla bituminosa discontinua (tipo BBTM 11B), mediante la utilización del ensayo Fénix a tracción directa.

Para lo cual se ha analizado 72 medias probetas Marshall, con un contenido fijo de betún del 5% sobre mezcla de áridos, solo hemos ido variando las proporciones del tipo de filler de aportación, como se aprecia en la tabla 4. Proporciones de filleres para la fabricación de cada serie, en la página 23, el ensayo se realiza a dos temperaturas, 36 medias probetas a 5°C y 36 medias probetas a 20°C.

A continuación, describimos las conclusiones:

- Al disminuir la temperatura de ensayo, aumenta la resistencia a la tracción, y se rigidiza la mezcla.

A 20°C la aportación de cal 100% o en combinación con los filleres cemento y calizo, siempre y cuando la cal se aporta en mayor %, da las mayores Resistencia a la tracción que oscilan entre (0,15 y 0,20 MPa).

A sí mismo la cal por tener más volumen en comparación con los demás filleres calizo y cemento, reduce el % de huecos en la mezcla bituminosa, al reducir el % de huecos la mezcla se rigidiza.

A 5°C no se aprecia diferencia del RT (0,8-0,9 MPa).

- La temperatura de ensayo es 5°C, la probeta bituminosa es más rígida, y presenta valores más altos de IRT, esto significa que una probeta soporta menos deformación, influyendo a una temprana fisuración que conlleva a la rotura (frágiles).

A 20°C, la aportación de los filleres cal 100% y calizo 100%, y la combinación de los filleres cal y calizo aumentan la IRT, aunque los resultados tienen mayor disipación, por lo que no se puede, asegurar con la misma precisión que los demás casos.

A 20°C de ensayo la rigidez de la probeta es menor, pero más flexible, la aportación del filler cemento 100% disminuye la rigidez y la combinación con los filleres cal y calizo también influye en la disminución de la rigidez.

A 5°C, el IRT varía entre 4 y 5 MPa/mm, no apreciándose ninguna tendencia.

- El ensayo a 20°C, la probeta bituminosa se vuelve más flexible, con valores más elevados de deformación.

En las probetas que empleamos los filleres cemento y calizo, al 100% o en sus respectivas combinaciones han influido positivamente en la flexibilidad de la mezcla bituminosa.

El filler cal resta ductilidad a la mezcla la variación es grande, cercano a 2 mm para los filleres calizo, cemento y la combinación entre ambos. En cambio, al utilizar la cal el desplazamiento se reduce a valores de 1,30 mm (65% del caso 25% calizo y 75% cemento)

A 5°C, los valores de $d_{0,5}$ PM, oscila entre 0,41 y 0,72 mm, siendo igual en el caso de 20°C, los menores valores correspondientes al filler cal.

REFERENCIAS

[1] Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., Romana, M. G., Sánchez Blancos, V., & Val, M. A. D. (2003). *Ingeniería de carreteras*. McGraw-Hill.

[2] PG-3-543. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas.

[3] Yepes, V. (2014). **Maquinaria para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas**. Apuntes de la Universitat Politècnica de València. Ref. 749.

[4] <http://www.trabit.com/wp-content/uploads/2016/09/Ficha-de-Producto-BBTM-11B-Rev4-Trabit.pdf>.

[5] 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.

[6] UNE-EN 12697-30. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la muestra mediante compactador de impactos.

[7] UNE-EN 12697-22. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura.

[8] UNE-EN 12697-33. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa.

[9] UNE-EN 12697-12. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.

[10] Ishai, I. y Craus, J. (1978), "Effect of the filler in bituminous paving mixtures". Coll. Int. Matériaux granulaires, 1, 161-174.

[11] Miro, J. (1994), "Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cántabro". Tesis Doctoral ETSECCPB.

[12] Craus, J., Ishai, I. y Sides, A., (1978), "Some physico aspects of the effect and the role of the filler in bituminous paving mixtures". Asphalt Paving Technology, Vol. 47, 558-587.

[13] Ishai, I. y Craus, J. (1977), "Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures". Asphalt Paving Technology. Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 46, 228-259. San Antonio, Texas.

[14] Reyes-Ortiz, O. J., y Rincón, J. F. (2013). Influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica. Revista EIA.

[15] Montepara, A., Romeo, E., Isola, M., y Tebaldi, G. (2011). The role of fillers on cracking behavior of mastics and asphalt mixtures. Asphalt paving technology, (80), 161-192.

[16] Miró R., A. Martínez, F. Pérez-Jiménez, R. Botella. (2014) Analysis of cracking resistance of bituminous mixtures using Fenix test. Construction and Building Materials 59, pp. 32–38.

A continuación, en las siguientes páginas podremos ver:

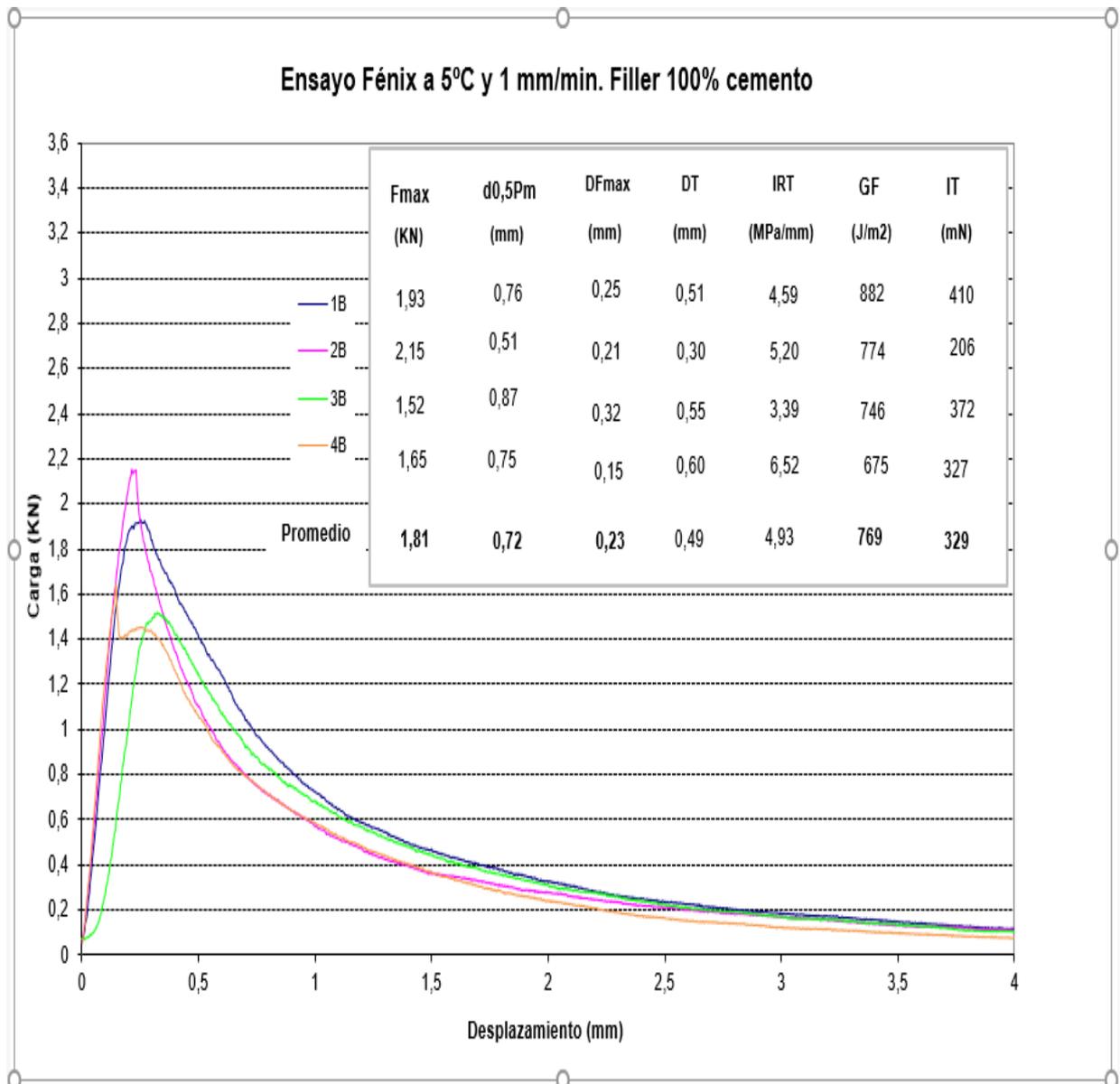
Anexo de los resultados gráficos de la curva carga (KN)-desplazamiento(mm).

ANEXOS

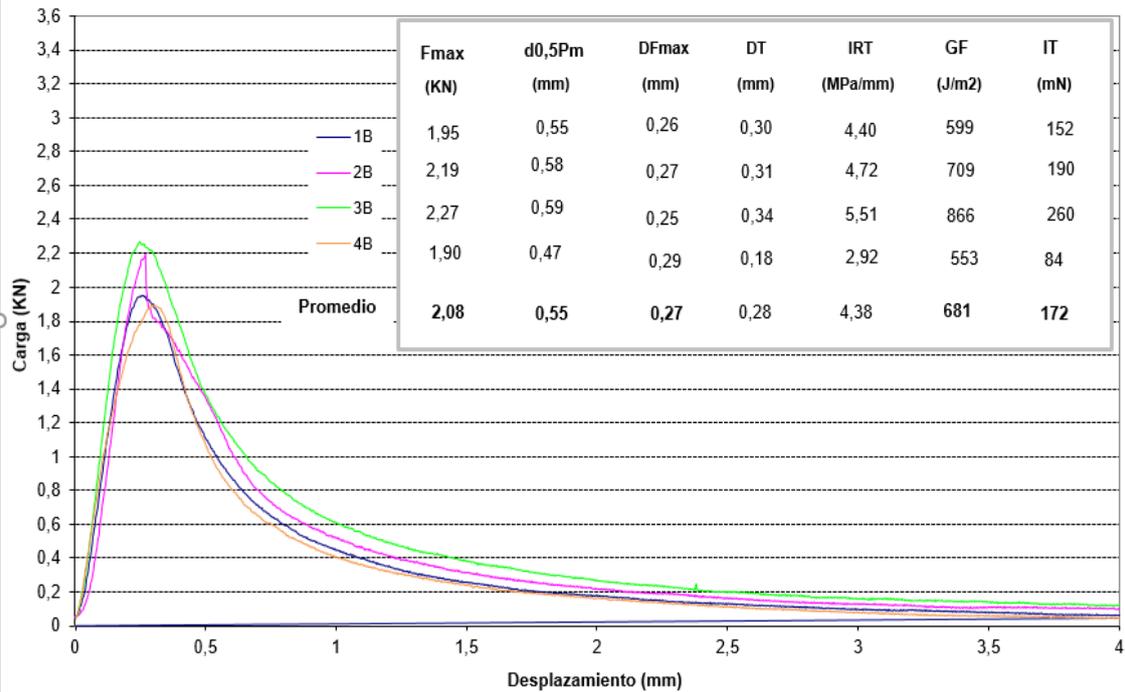
RESULTADOS GRÁFICOS DE LAS CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO

RESULTADOS GRÁFICOS DE LAS CURVAS, CARGA (KN) DESPLAZAMIENTO (mm)

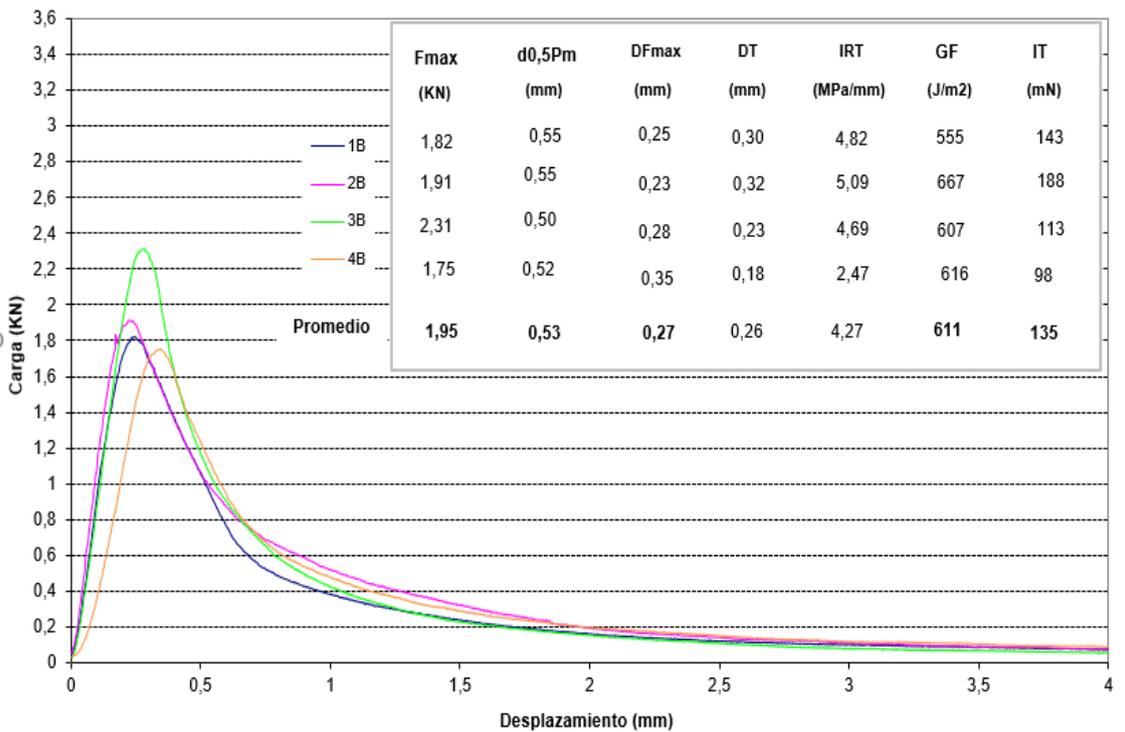
A) Ensayo Fénix a 5°C.



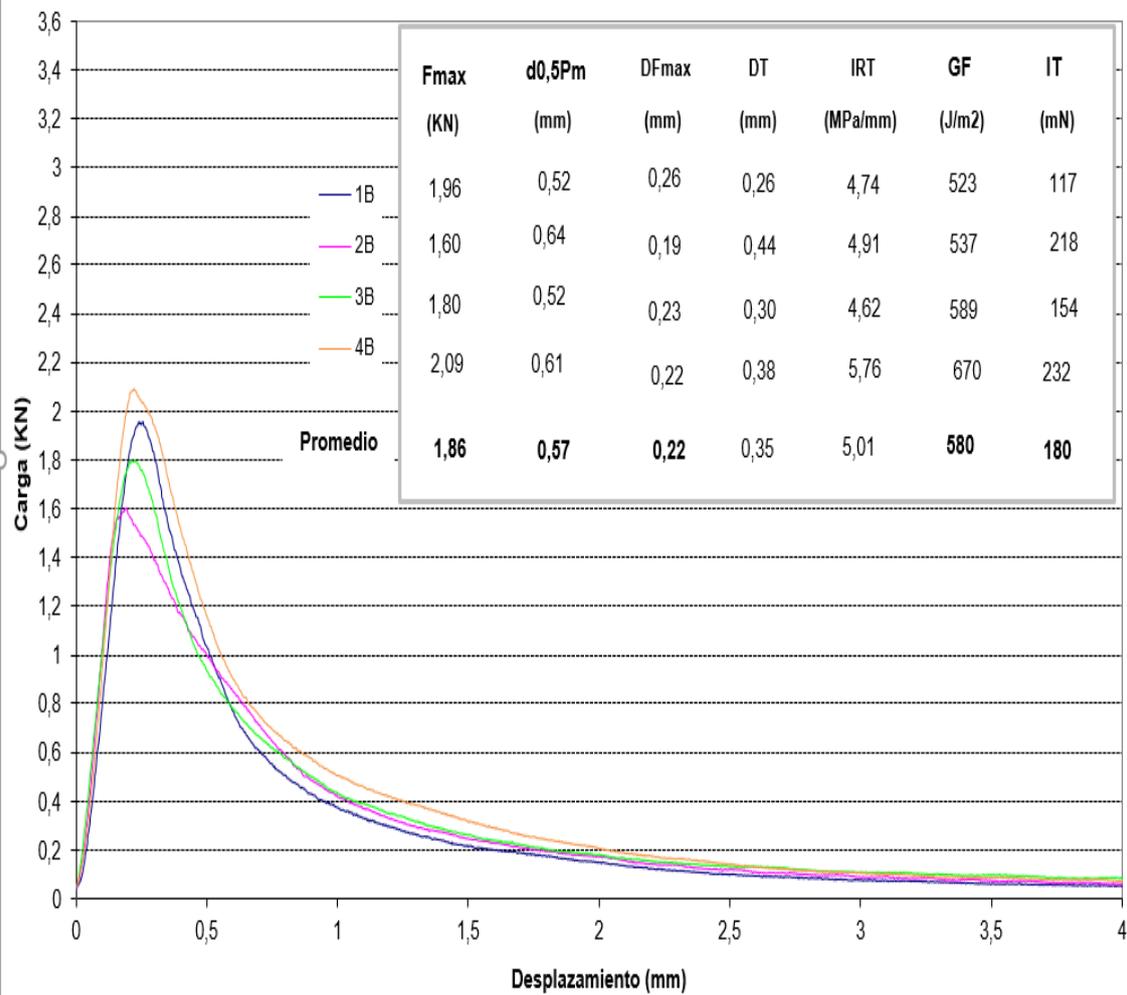
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. Filler 75% Cemento y cal 25%



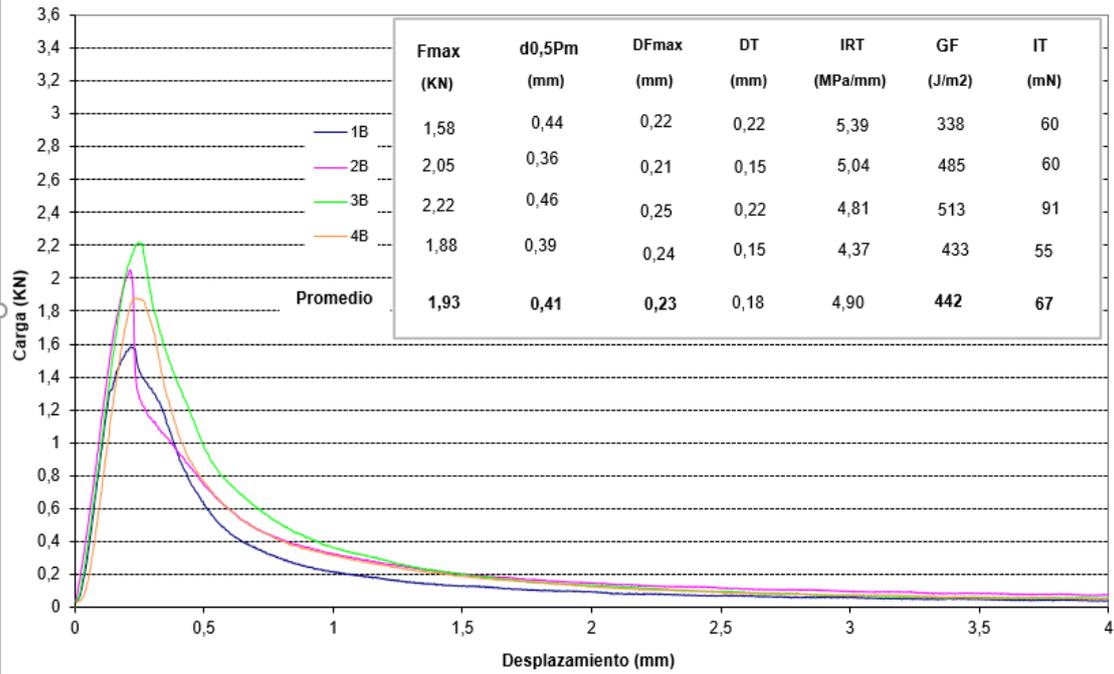
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. Filler 25% cemento y cal 75%



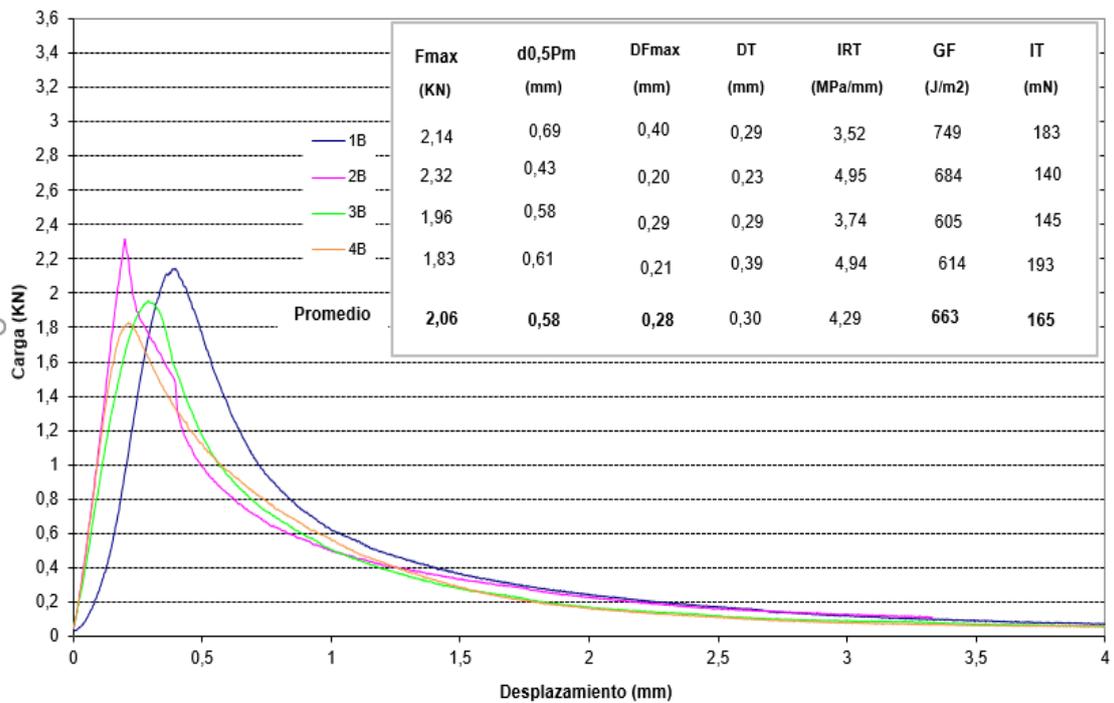
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. Filler 100% Cal

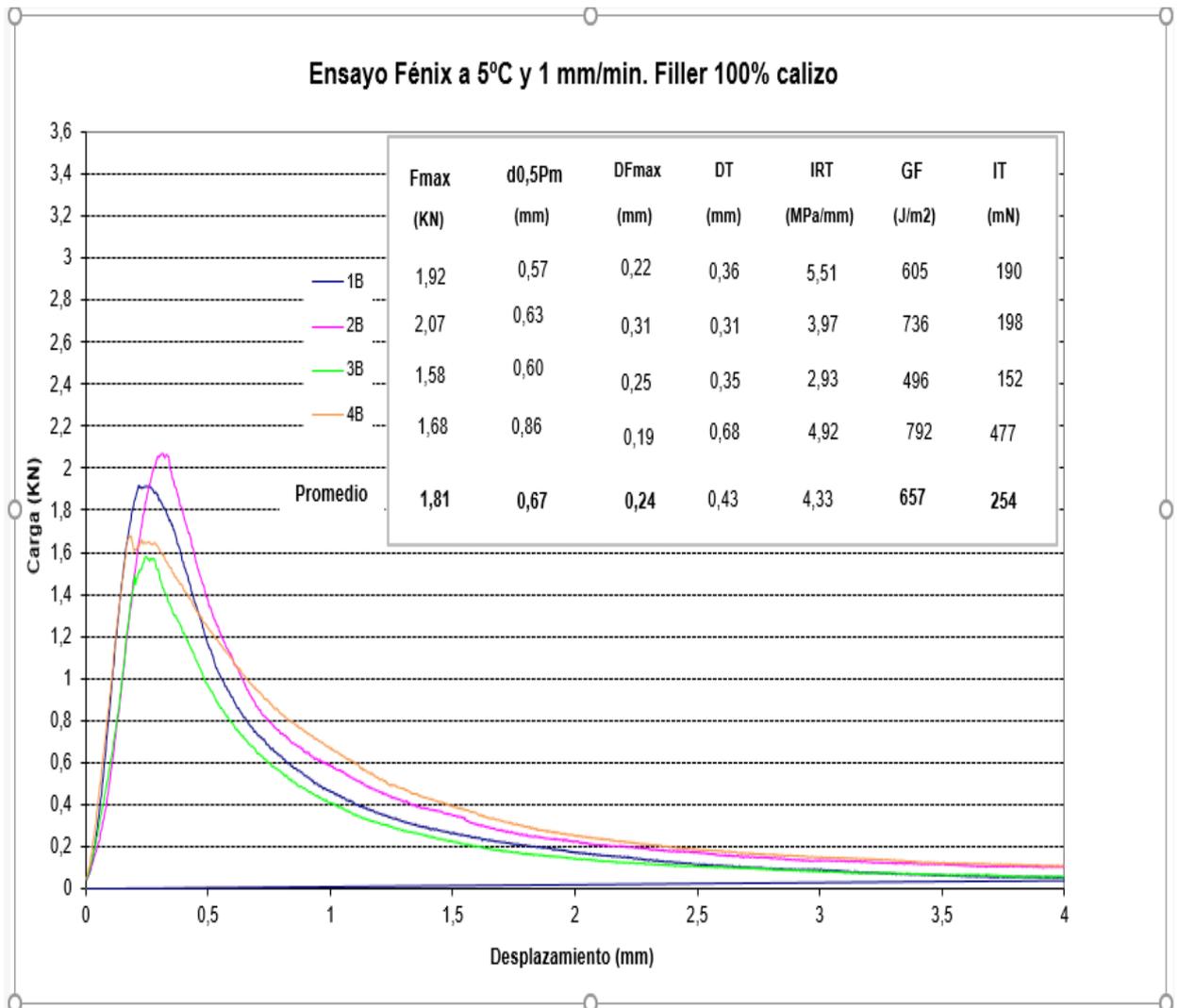


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. Filler 75% Cal y calizo 25%

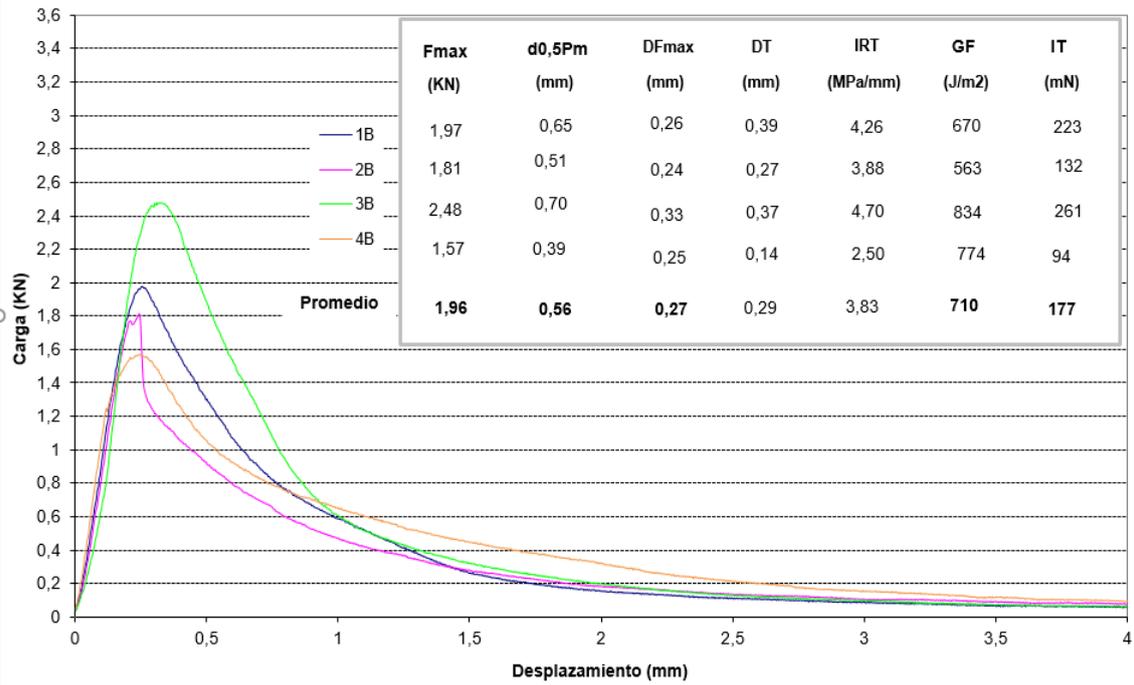


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. Filler 25% cal y calizo 75%

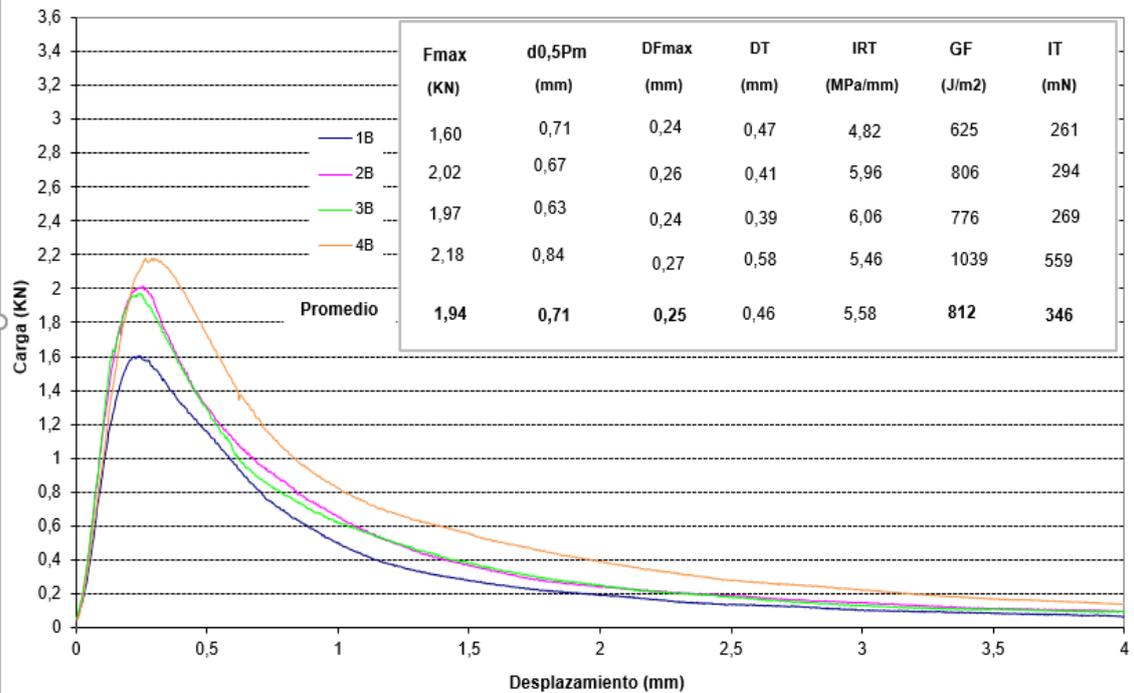




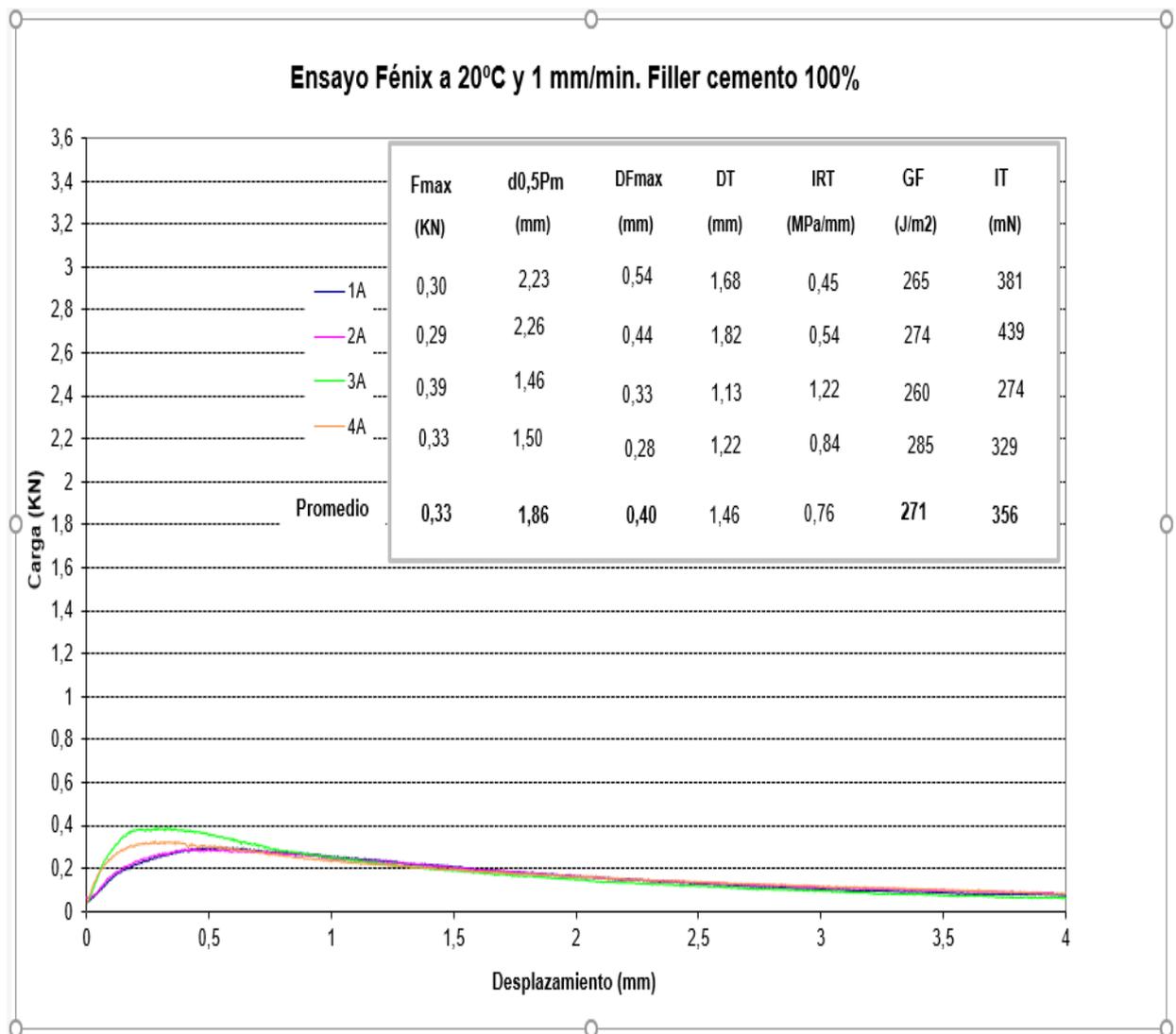
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. Filler 75% Cemento y calizo 25%



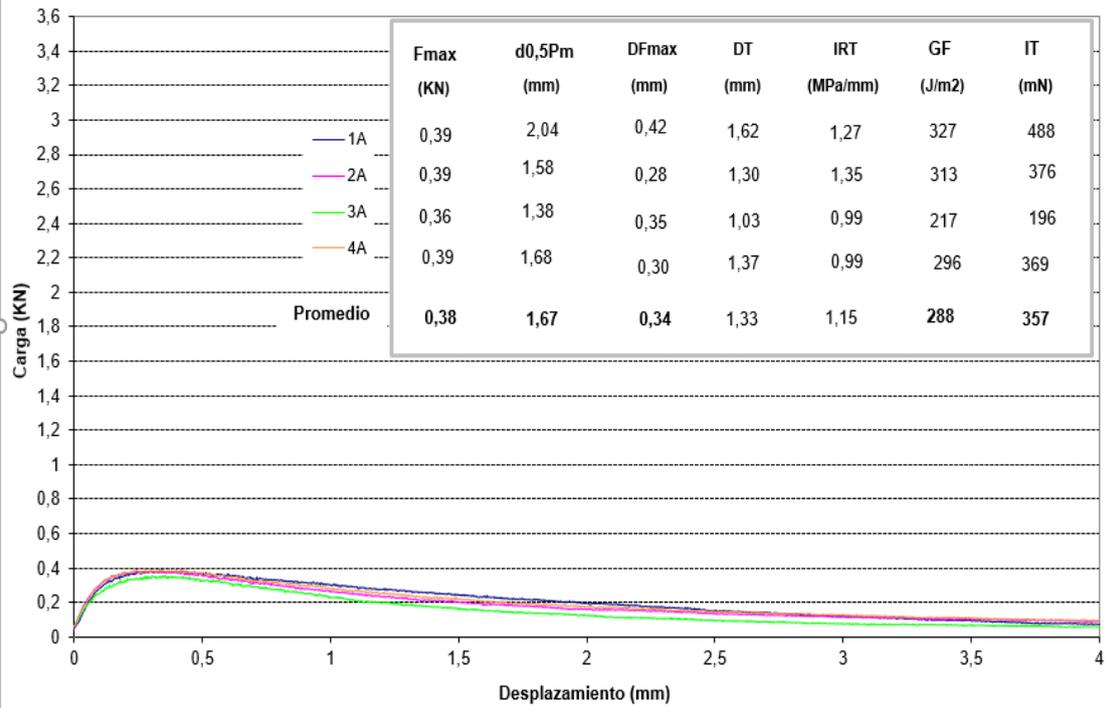
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. Filler 25% Cemento y calizo 75%



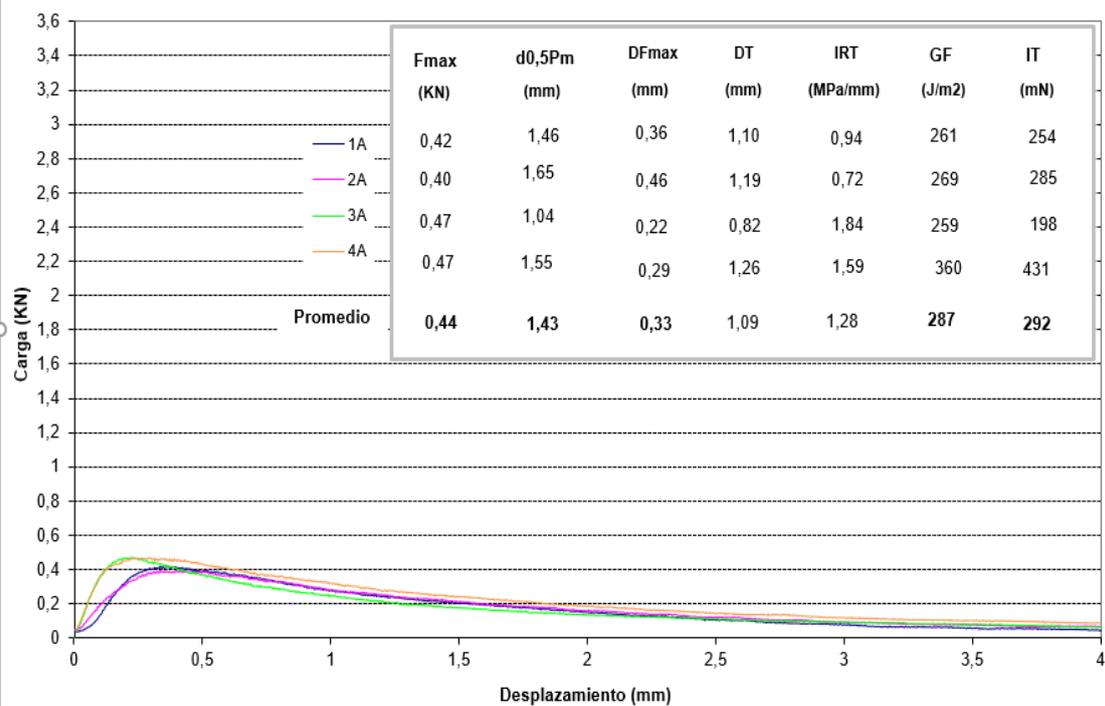
B) Ensayo Fénix a 20°C.



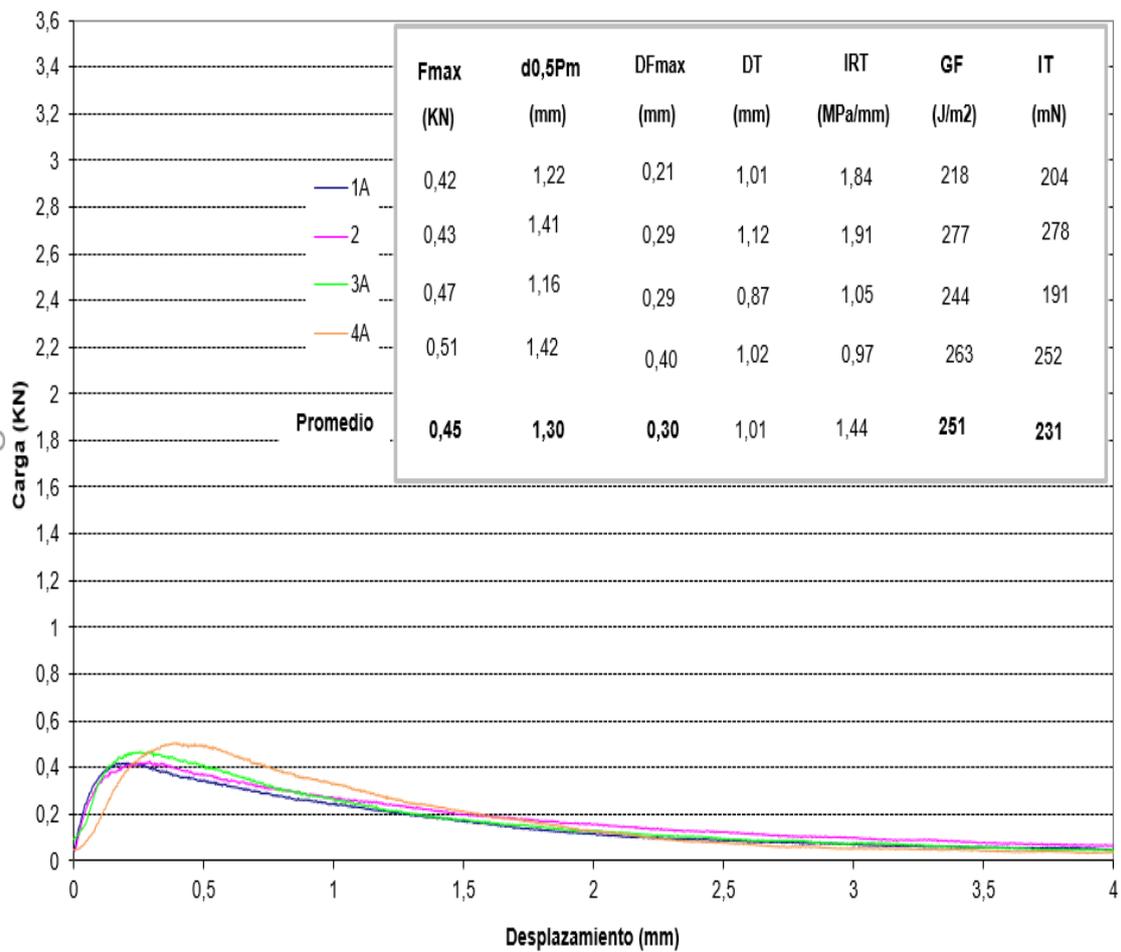
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. Filler 75% cemento y cal 25%



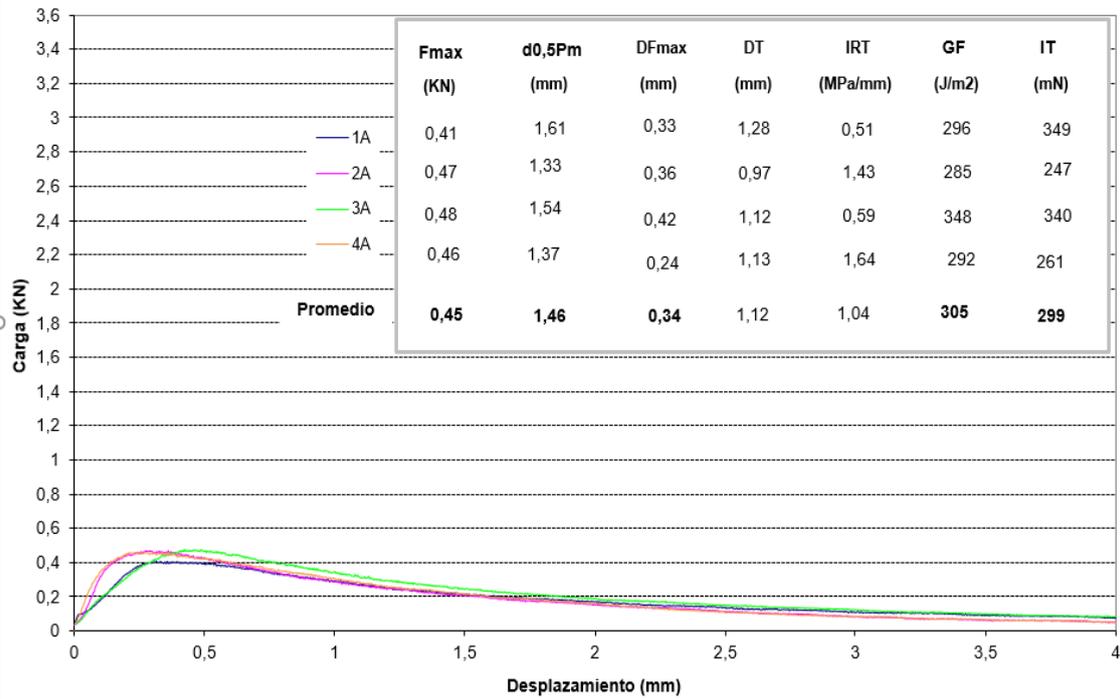
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. Filler 25% cemento y cal 75%



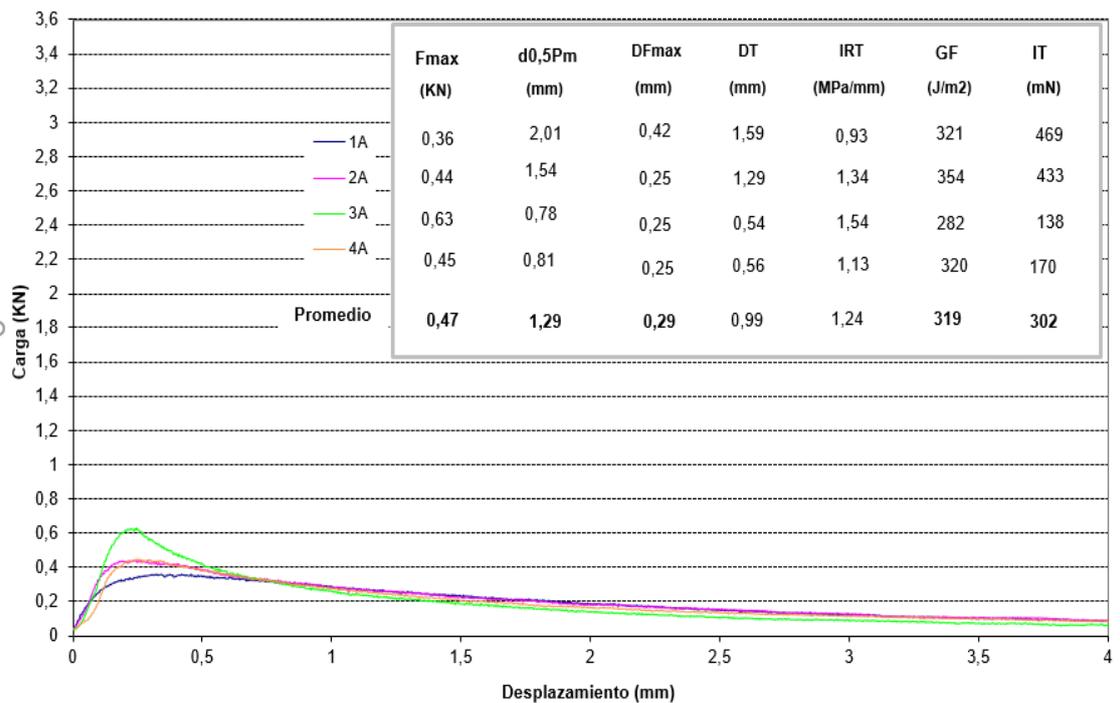
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. Filler 100%cal



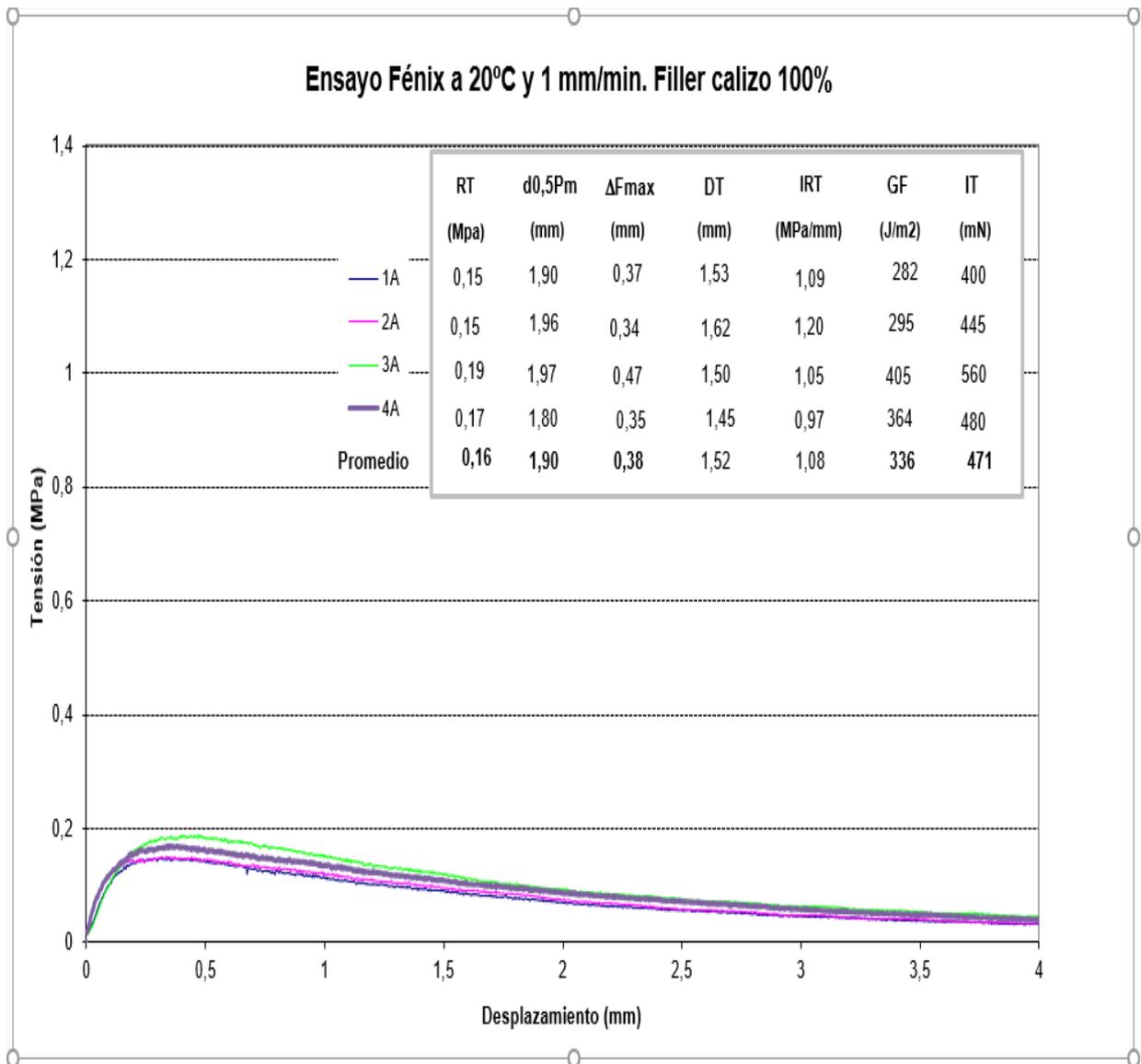
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. Filler 75% cal y calizo 25%



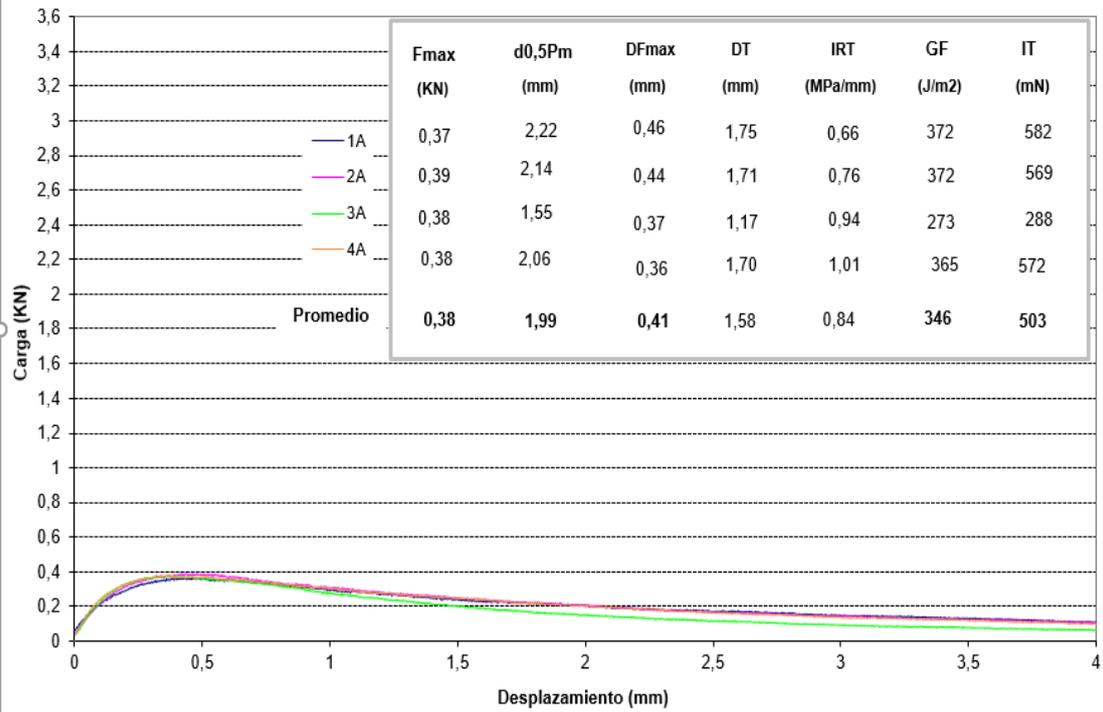
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. Filler 25% cal y calizo 75%



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. Filler calizo 100%



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. Filler 75% cemento y calizo 25%



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. Filler 25% cemento y calizo 75%

