



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESIS D'ESPECIALITAT

### Títol

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE  
MEZCLAS DISCONTINUAS RECICLADAS PARA  
CAPAS DE RODADURA**

722-TES-CA-4858

### Autor/a

MÍRIAM PÉREZ COCA

### Tutor/a

JOSÉ RODRIGO MIRÓ RECASENS

### Departament

INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORT I DEL TERRITORI

### Intensificació

### Data

FEBRER 2011



## **RESUMEN**

**Título:** Diseño y caracterización mecánica de mezclas discontinuas recicladas para capas de rodadura

**Autor:** Míriam Pérez Coca

**Tutor:** José Rodrigo Miró Recasens

Actualmente, existen muchos firmes que presentan deficiencias que afectan a la seguridad de la circulación, a la comodidad del usuario y a la durabilidad del firme. Estos aspectos conducen a la necesidad de llevar a cabo una rehabilitación superficial para devolver al firme sus características funcionales y estructurales. Sólo el 10% de estas rehabilitaciones se han realizado con técnicas de reciclado debido a que habitualmente se refuerza el firme empleando capas nuevas.

Esta práctica conlleva: un incremento de material fresado destinado a los vertederos, explotación de nuevas canteras, así como el consumo de grandes cantidades de betún nuevo. Estos hechos implican un gran impacto ambiental y económico y más, cuando se sabe que este material fresado presenta un elevado potencial debido al árido y ligante que lo constituye y que puede ser reutilizado.

La actual normativa Española de firmes no contempla métodos específicos para caracterizar y diseñar mezclas discontinuas recicladas en caliente en planta; es más, los criterios de aplicación de las técnicas de reciclado de firmes no permiten el uso de ningún tipo de mezcla reciclada en capa de rodadura ni para las categorías de tráfico más ligeras.

Con la presente tesina se pretende evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas discontinuas recicladas empleadas en capas de rodadura y comparar su comportamiento con el de mezclas convencionales equivalentes, a fin de asegurar que su calidad y características son adecuadas para su utilización en la construcción y rehabilitación de firmes de carretera. A su vez, los ensayos deben permitir definir una fórmula de trabajo óptima para cada tipo de mezcla bituminosa evaluada.

En la campaña experimental, se fabrican 4 mezclas BBTM11B con distintos porcentajes de "RAP"( Reclaimed Asphalt Pavement), 0, 10, 20 y 40%. Y para cada mezcla se fabrican 3 series cada una de ellas presenta un contenido de betún distinto 4,75, 5,25 y 5,75%. Se estudiará el efecto de la cantidad de RAP y de betún sobre el comportamiento de la mezcla.

Para caracterizar las mezclas discontinuas se han empleado los ensayos de contenido de huecos, tracción Indirecta y rodadura comprobando si las mezclas cumplen las especificaciones establecidas en el artículo 543 del PG-3 para mezclas discontinuas. Además, se ha empleado el ensayo Cántabro y el Fénix, para caracterizar el comportamiento de la mezcla frente la resistencia a la abrasión y a la fisuración respectivamente.

Mediante el contenido de huecos y la Tracción Indirecta se ha fijado un contenido óptimo de betún para cada fórmula de trabajo y mediante el ensayo de rodadura se ha comprobado su validez.

Los resultados obtenidos muestran que las mezclas bituminosas con alto porcentaje de RAP presentan más rigidez debido al envejecimiento del betún y, por lo tanto, menor susceptibilidad a las deformaciones. Además, se puede afirmar que existen unas fórmulas de trabajo para mezclas discontinuas recicladas que cumplen con las exigencias del PG-3 y pueden ser fabricadas en una planta convencional.

**Palabras clave:** mezcla discontinua reciclada, BBTM11B, RAP, caracterización mecánica, deformaciones plásticas, resistencia a la fisuración, tracción indirecta.

## **ABSTRACT**

**Title:** Design and mechanical characterization of recycled Gap-graded asphalt mixtures for wearing courses

**Autor:** Míriam Pérez Coca

**Tutor:** José Rodrigo Miró Recasens

Nowadays, several roads surface with deficiencies affect traffic safety, comfort and pavement's durability. All these aspects lead to the need of a surface rehabilitation to return the structural and functional characteristics of the surface. Only 10% of these renovations are made with recycling techniques because usually the road surface is reinforced using new layers.

The use of a surface rehabilitation involves: an increase in the milling material addressed to the dumps, the exploitation of new quarries and the consumption of a large quantities of new bitumen. All these facts imply a major environmental and economic impact, even more knowing that the milling material has higher potential due the arid and the bitumen that constitute it and that the milling material can be reused.

The current Spanish legislation about roads surfaces does not provide any specific methods for characterizing and designing the hot gap-graded asphalt recycled mixtures in plant. Furthermore the criteria to apply to the pavement recycled techniques do not allow the use of any recycled mix wearing course neither for lighter traffic categories.

The aim of this thesis is to evaluate the mechanical properties of gap-graded asphalt recycled mixtures used in surface layers and compare their behavior with the behavior of the equivalent conventional mixtures in order to ensure that their quality and characteristics are suitable for their use in the construction and rehabilitation of road surfaces. At the same time the tests should allow to define an optimal working formula for each type of asphalt mixture evaluated.

During the experimental campaign, 4 BBTM11B mixtures are made with different percentages of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement): 0, 10, 20 and 40%. For each mixture 3 series are produced, each one has a different bitumen content of 4.75, 5.25 and 5.75%. The effect of the amount of RAP and bitumen on the behavior of the mixture is studied during the experimental campaign.

For the mechanical characterization the most significant mechanical tests have been carried out: air void level, Indirect Tensile and wheel test checking whether the mixtures meets with the specifications on the 543 Article from PG-3 for gap-graded asphalt mixtures. Furthermore to characterize the mixtures against abrasion strength and cracking the Cántabro and Fénix test have been done.

Through the air void content and Indirect Tensile and optimum bitumen content for each working formula and through the wheel test their validity it has been checked.

The results show that asphalt mixtures with high percentages of RAP have more stiffness due to bitumen's aging and therefore less susceptibility to deformation. In addition, there are some working formulas for gap-graded asphalt recycled mixtures that meet with the requirements of PG-3 instruction and that can be manufactured in a conventional plant.

**Keywords:** gap-graded asphalt recycled mixtures, BBTM11B, RAP, mechanical characterization, plastic deformation, crack resistance, indirect tensile

## **Agradecimientos**

Agradece a mi tutor de tesina, D Rodrigo Miró Recasens, por ofrecerme la posibilidad de desarrollar este tema, por transmitirme sus conocimientos y por su constante interés en el avance de la investigación.

Al doctorante Gonzalo Valdés por dedicarme todo su tiempo para resolver pequeñas dudas.

Agradecer a José Amorós, Jordi Martín e Iván, personal del Laboratorio de Caminos de la E.T.S.C.C.P.B, sin cuya ayuda no hubiese podido desarrollar la etapa experimental de la presente tesina.

Y gracias a mis padres, maestros y pilares de este proyecto. Por su empeño en educarme y remarcarme que en esta vida la buena suerte no existe sin un esfuerzo previo. Gracias, por sus consejos, por su paciencia, por creer siempre en mí y ofrecerme la mejor llave para el futuro.

**ÍNDICE**

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Contenido de la tesina .....	3
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Nuevas mezclas para capa de rodadura.....	5
2.3. Mezclas discontinuas en caliente para capa de rodadura.....	7
2.3.1. Introducción.....	7
2.3.2. Historia, evolución y características de los microaglomerados .....	8
2.4. Normativa Española para mezclas discontinuas en caliente.....	13
2.4.1. Materiales.....	13
2.4.1.1. Ligante hidrocarbonado .....	13
2.4.1.2. Áridos .....	14
2.4.2. Tipo y composición de la mezcla .....	15
2.4.3. Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.....	16
2.4.3.1. Contenido de huecos.....	16
2.4.3.2. Resistencia a la deformación permanente .....	17
2.4.3.3. Sensibilidad al agua .....	17
2.4.3.4. Ensayos complementarios.....	17
2.5. Estudios realizados en mezclas discontinuas .....	17
2.6. Mezclas con materiales Reciclados .....	20
2.6.1. Mezclas discontinuas con NFU's .....	21
2.6.2. Mezclas bituminosas con RAP "Reclaimed Asphalt Pavement" .....	24
2.6.2.1. Introducción.....	24
2.6.2.2. Panorama español dentro de Europa .....	25
2.6.2.3. Normativa reguladora de las mezclas recicladas .....	26

2.6.2.4.	Variabilidad del RAP .....	27
2.6.2.5.	Elección del ligante hidrocarbonado en mezclas recicladas.....	28
2.6.2.6.	Uso de mezclas recicladas con RAP en capas de rodadura .....	29
2.7.	Conclusiones.....	33
<b>3.</b>	<b>ESTUDIO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>35</b>
3.1.	Introducción.....	35
3.2.	Plan de Trabajo .....	35
3.3.	Materiales empleados.....	36
3.3.1.	Áridos .....	36
3.3.2.	Betún.....	37
3.3.3.	Material reciclado RAP .....	37
3.4.	Fórmulas de trabajo.....	38
3.4.1.	Granulometrías.....	38
3.4.2.	Porcentajes de betún y áridos empleados .....	41
3.5.	Fabricación de las mezclas.....	41
3.5.1.	Preparación de los áridos .....	41
3.5.2.	Procedimiento de fabricación.....	43
3.5.3.	Normas consultadas .....	45
3.6.	Determinación de densidades y contenido de huecos .....	46
3.6.1.	Densidad Aparente.....	46
3.6.2.	Densidad Máxima.....	47
3.6.3.	Contenido de huecos.....	47
3.6.4.	Normas consultadas .....	48
3.7.	Ensayos Utilizados .....	49
3.7.1.	Cántabro.....	49
3.7.1.1.	Objeto y campo de aplicación.....	49
3.7.1.2.	Descripción del ensayo.....	49
3.7.1.3.	Ejecución del ensayo.....	50
3.7.1.4.	Normas consultadas.....	51

3.7.2.	Ensayo de Tracción Indirecta.....	51
3.7.2.1.	Objeto y campo de aplicación.....	51
3.7.2.2.	Descripción del ensayo.....	52
3.7.2.3.	Ejecución del ensayo.....	53
3.7.2.4.	Normas consultadas.....	56
3.7.3.	Ensayo Fénix.....	56
3.7.3.1.	Campo y objeto de aplicación.....	56
3.7.3.2.	Descripción del ensayo.....	57
3.7.3.3.	Ejecución del ensayo.....	59
3.7.3.4.	Normas consultadas.....	60
3.7.4.	Ensayo de Pista.....	61
3.7.4.1.	Objeto y campo de aplicación.....	61
3.7.4.2.	Fabricación de las placas.....	61
3.7.4.3.	Procedimiento del ensayo.....	65
3.7.4.4.	Normas consultadas.....	66
4.	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	67
4.1.	Introducción.....	67
4.2.	Densidades y Contenido de Huecos.....	67
4.3.	Ensayo Cántabro.....	70
4.4.	Ensayo de Tracción Indirecta.....	74
4.5.	Ensayo Fénix.....	77
4.6.	Determinación del Contenido óptimo de Betún.....	82
4.7.	Ensayo de Pista.....	82
4.8.	Resultados obtenidos de las probetas fabricadas en planta.....	88
4.8.1.	Granulometrías.....	88
4.1.2.	Ensayo Cántabro.....	89
4.1.3.	Ensayo de tracción indirecta.....	89
4.1.4.	Ensayo Fénix.....	90
4.1.5.	Conclusiones.....	91

5. <b>CONCLUSIONES</b> .....	93
6. <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	97

### **ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 2. 1.</b> Relación entre el porcentaje de la fracción (0-3mm) y la textura de la mezcla (Fuente: Del Pozo,1998).....	9
<b>Figura 2. 2.</b> Comparación entre el ruido de rodadura de una mezcla convencional y una mezcla discontinua (Fuente: Il Cinturón. Ayuntamiento de Barcelona).....	9
<b>Figura 2. 3.</b> Huso granulométrico de las mezclas SMA (Fuente: Carreteras 1997). ....	10
<b>Figura 2. 4.</b> Huso granulométrico de las mezclas BBTM (Fuente: Carreteras 1997). ..	11
<b>Figura 2. 6.</b> Resultados del ensayo BTD en distintas mezclas bituminosas (densa, discontinua sin fibras, discontinua con fibras) (Fuente: Miró, 2006). ....	18
<b>Figura 2. 5.</b> a) Probeta con ranura en la base para el ensayo BTD. b) Fallo del ensayo BTD (Fuente: Lorenzo A., 2002). ....	18
<b>Figura 2. 7.</b> a) Ensayo DC(T). b) Fallo por fisuración en el ensayo DC(T) (Fuente: Pérez F.et al, 2009). ....	19
<b>Figura 2. 8.</b> Energía de Fractura (J/m <sup>2</sup> ) en testigos y probetas de laboratorio (Fuente: Ahmed S.et al., 2010). ....	20
<b>Figura 2. 9.</b> Comparación entre la Energía de Fractura entre mezclas densas y discontinuas (Fuente: Ahmed S.et al., 2010).. ....	20
<b>Figura 2. 10.</b> Energía de Fractura en función del contenido de huecos. (Muestras de campo y Laboratorio) (Fuente: Ahmed S.et al., 2010). ....	20
<b>Figura 2. 11.</b> Pérdidas por desgaste para mezclas BBTM11B con y sin incorporación de polvo de caucho (Fuente: Gruas J.M, et al, 2009).....	22
<b>Figura 2. 12.</b> Resistencia máxima a la tracción directa a 20°C para mezclas con y sin aportación de polvo de neumático (Fuente: Gruas J.M, et al, 2009). ....	23
<b>Figura 2. 13.</b> Deformaciones plásticas obtenidas mediante el ensayo de Pista para mezclas con y sin aportación de polvo de neumático (Fuente: Gruas J.M, et al, 2009). ....	23
<b>Figura 2. 14.</b> Contenido de asfalto en el material reciclado RAP en tramos de carretera distintos (Fuente: Pérez F, et al., 2008). ....	28

<b>Figura 2. 15.</b> Granulometría de las mezclas empleadas en capa de rodadura (Fuente: Celauro C. et al., 2009).....	31
<b>Figura 2. 16.</b> Pérdidas de desgaste (%) en el ensayo Cántabro (Fuente: Celauro C. et al., 2009).....	31
<b>Figura 2. 17.</b> Resistencia a la tracción Indirecta en mezclas densas aplicadas en capa de rodadura (Fuente: Celauro C. et al., 2009).....	32
<b>Figura 2. 18.</b> Resultados de las deformaciones permanentes que presentan las mezclas densas en capa de rodadura (Celauro C. et al., 2009).....	32
<b>Figura 3. 1.</b> Curvas granulométricas de las distintas mezclas empleadas en la campaña experimental.	40
<b>Figura 3. 3.</b> Procedimiento de pesado para la preparación de las probetas. ....	42
<b>Figura 3. 2.</b> Fracciones del árido del proyecto OASIS II. ....	42
<b>Figura 3. 4.</b> Material reciclado RAP clasificado en dos tamaños, “retenido por el tamiz 2 mm” (fracciones 12’5, 8, 4, 2) y “pasa por el tamiz 2 mm” (fracciones 0,5 y 0,063). .	43
<b>Figura 3. 5.</b> Filler pesado en balanza y depositado en vasos de plástico. ....	43
<b>Figura 3. 6.</b> Proceso de fabricación. a) Áridos mezclados en un recipiente metálico sobre la plancha, b) Pesamos el betún, c) Mezcla de los áridos con el betún, d) Añadimos el Filler, e) Comprobación de la T <sup>o</sup> , f) Colocación de la mezcla en el molde .....	44
<b>Figura 3. 8.</b> Probetas desmoldadas pertenecientes a una serie determinada.....	45
<b>Figura 3. 7.</b> a) Máquina de compactación por impacto, b) Probeta en la máquina de compactación, c) Probeta con el papel protector, d) Probeta fabricada antes de desmoldar.....	45
<b>Figura 3. 9.</b> a) Pie de Rey b) Medición de la altura de la probeta mediante pie de rey. ....	46
<b>Figura 3. 10.</b> Máquina de los Ángeles (medidas en mm) (Fuente: Miró, 1994).....	49
<b>Figura 3. 11.</b> a) Temperatura del ensayo Cántabro. b) Pesada de la probeta antes del ensayo c) Máquina de los Ángeles. ....	50
<b>Figura 3. 12.</b> Estado de tensiones que crea una carga vertical sobre el firme (Fuente: Martínez A, 2000) .....	52
<b>Figura 3. 13.</b> a) Configuración de carga; b) Fallo de Tracción Indirecta (Fuente: Kennedy, Thomas W., 1977) . ....	53
<b>Figura 3. 14.</b> Bastidor necesario para el ensayo de Tracción Indirecta (Fuente: UNE-EN 12697-23). ....	53
<b>Figura 3. 15.</b> a) Probetas sometidas al vacío; b) Probetas a 40°C durante 72h.....	54

<b>Figura 3. 16.</b> a) Prensa del Ensayo TI; b) Fallo de la probeta; c) Estado de los áridos .....	55
<b>Figura 3. 17.</b> Curva Carga-Desplazamiento resultante del ensayo Fénix. ....	57
<b>Figura 3. 18.</b> a) Media probeta para el ensayo Fénix, b) Probeta fijada a las placas de apoyo.....	60
<b>Figura 3. 19.</b> a) Probeta antes de ser sometida al ensayo Fénix, b) Probeta después del ensayo, c) Fallo de la probeta .....	60
<b>Figura 3. 20.</b> Procedimiento de mezclado de mezclas bituminosas para placas. ....	62
<b>Figura 3. 21.</b> . Extendido de la mezcla bituminosa en el recipiente metálico. ....	63
<b>Figura 3. 22.</b> Compactación de placa mediante rodillo de acero .....	64
<b>Figura 3. 23.</b> Placa después de compactación.....	64
<b>Figura 3. 24.</b> a) Máquina de Pista; b) Placa sometida al paso de una rueda con una presión de 6 Kg/cm <sup>2</sup> .....	65
<b>Figura 3. 25.</b> Fallo producido por el ensayo de Pista.....	66
<b>Figura 4. 1.</b> Densidades aparente vs Contenido de ligante. ....	68
<b>Figura 4. 2.</b> Densidad máxima vs Contenido de ligante.....	69
<b>Figura 4. 3.</b> Contenido de Huecos vs Contenido de ligante.....	70
<b>Figura 4. 4.</b> Pérdidas por desgaste en el Ensayo Cántabro vs Contenido de Betún (Vía seca).....	71
<b>Figura 4. 5.</b> Pérdidas por desgaste en el Ensayo Cántabro vs Contenido de Betún (Vía húmeda). ....	72
<b>Figura 4. 7.</b> Probeta sometida Ensayo Cántabro.....	73
<b>Figura 4. 6.</b> Pérdidas en seco y tras inmersión.....	73
<b>Figura 4. 8.</b> Resistencia Tracción Indirecta vs Contenido de ligante (Vía Seca).....	75
<b>Figura 4. 9.</b> Resistencia a Tracción Indirecta vs Contenido de ligante (Vía húmeda). 76	
<b>Figura 4. 10.</b> Resistencia conservada vs Contenido de ligante. ....	77
<b>Figura 4. 11.</b> Carga Máxima vs Contenido de ligante.....	78
<b>Figura 4. 12.</b> Desplazamiento de Carga Máxima vs Contenido de ligante.....	79
<b>Figura 4. 13.</b> Desplazamiento a Rotura vs Contenido de ligante. ....	79
<b>Figura 4. 14.</b> Índice de rigidez a Tracción vs Contenido de ligante.....	80
<b>Figura 4. 15.</b> Energía Disipada vs Contenido de ligante.....	81

<b>Figura 4. 16.</b> Índice de Tenacidad vs Contenido de Ligante .....	81
<b>Figura 4. 17.</b> Ensayo de rodadura mezcla patrón, contenido de betún = 5% s/m .....	83
<b>Figura 4. 18.</b> Ensayo de rodadura mezcla patrón, contenido de betún = 4.8% s/m. ...	83
<b>Figura 4. 19.</b> Curvas granulométricas ligeramente modificadas, FT-2.....	84
<b>Figura 4. 20.</b> Curvas granulométricas de las mezclas fabricadas en la planta Asfaltos Augusta. ....	86
<b>Figura 4. 21.</b> Resultados del ensayo de rodadura. Granulometrías de planta. ....	87
<b>Figura 4. 22.</b> Pendiente de deformación de las mezclas de planta reproducidas en laboratorio.....	87
<b>Figura 4. 23.</b> Granulometrías de mezcla discontinua recicladas fabricadas en planta.	88
<b>Figura 4. 24.</b> Resultados del ensayo Fénix en probetas fabricadas en planta .....	90

### **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 2. 1.</b> Husos granulométricos de las mezclas discontinuas tipo F y M españolas (Fuente: OC 5/2001).....	11
<b>Tabla 2. 2.</b> Denominación actual de las mezclas (Fuente O/C 25/2008, PG-3, artículo 543). ....	12
<b>Tabla 2. 3.</b> Porcentajes de aplicación de mezclas BBTM en capa de rodadura respecto el total de mezclas bituminosas fabricadas (Fuente: EAPA). ....	12
<b>Tabla 2. 4.</b> Tipo de ligante Hidrocarbonado a emplear (Fuente: PG-3).....	14
<b>Tabla 2. 5.</b> Proporción de partículas total y parcialmente trituradas del árido grueso (%) (Fuente: PG-3).....	14
<b>Tabla 2. 6.</b> Proporción de partículas totalmente redondeadas del árido grueso (% en masa) (Fuente: PG-3).....	14
<b>Tabla 2. 7.</b> Índice de lajas del árido grueso (Fuente: PG-3).....	15
<b>Tabla 2. 8.</b> Coeficiente de los Ángeles del árido grueso (Fuente: PG-3).....	15
<b>Tabla 2. 9.</b> Coeficiente de pulimiento acelerado (Fuente: PG-3).....	15
<b>Tabla 2.10.</b> Husos granulométricos (Fuente: PG-3).....	16
<b>Tabla 2.11.</b> Tipo, composición y dotación de la mezcla (Fuente: PG-3).....	16
<b>Tabla 2.12.</b> Contenido de Huecos en mezcla (Fuente: PG-3).....	16

<b>Tabla 2.13.</b> Pendiente media de deformación en Pista en el intervalo de 5000 a 1000 ciclos según UNE-EN 12697-22 (mm para $10^3$ ciclos de carga) (Fuente: PG-3). .....	17
<b>Tabla 2.14.</b> Producción de Mezclas asfálticas (millones de toneladas) (Fuente:EAPA). .....	25
<b>Tabla 2.15.</b> Porcentajes de mezclas asfálticas nuevas con presencia de material reciclado (Fuente: EAPA). .....	26
<b>Tabla 2.16.</b> Especificaciones para mezclas bituminosas empleadas en capa de rodadura en Lituania (Fuente: Mucinis D. et al., 2008). .....	30
<b>Tabla 3. 1.</b> Distribución de las probetas fabricadas en los distintos ensayos. ....	36
<b>Tabla 3. 2.</b> Características del betún BM-3c. ....	37
<b>Tabla 3. 3.</b> Granulometría del RAP. ....	37
<b>Tabla 3. 4.</b> Huso granulométrico para mezclas BBTM11B. ....	38
<b>Tabla 3. 5.</b> Granulometría de trabajo FTP para la mezcla BBTM11B con 0%RAP. ....	38
<b>Tabla 3.6.</b> Granulometría de trabajo FT1-10%RAP para la mezcla BBTM11B con 10%RAP. ....	39
<b>Tabla 3.7.</b> Granulometría de trabajo FT1-20%RAP para la mezcla BBTM11B con 20%RAP. ....	39
<b>Tabla 3.8.</b> Granulometría de trabajo FT1-40%RAP para la mezcla BBTM11B con 40%RAP. ....	40
<b>Tabla 3.9.</b> Contenidos de árido virgen, árido reciclado y betún de nueva aportación en la mezcla. ....	41
<b>Tabla 3.10.</b> Cargas de compactación .....	64
<b>Tabla 4. 1.</b> Densidades y Contenido de Huecos. ....	68
<b>Tabla 4. 2.</b> Porcentaje de Pérdidas por desgaste. ....	71
<b>Tabla 4. 3.</b> Resistencia a la Tracción Indirecta en vía Seca. ....	74
<b>Tabla 4. 4.</b> Resistencia a la Tracción Indirecta en vía Húmeda .....	75
<b>Tabla 4. 5.</b> Sensibilidad al agua. ....	77
<b>Tabla 4. 6.</b> Parámetros característicos del ensayo Fénix. ....	78
<b>Tabla 4. 7.</b> Porcentaje óptimo de betún. ....	82
<b>Tabla 4. 8.</b> Granulometría de trabajo FTP2 para la mezcla BBTM11B con 0%RAP. ...	84
<b>Tabla 4. 9.</b> Granulometría de trabajo FT2-10%RAP para la mezcla BBTM11B. ....	84
<b>Tabla 4.10.</b> Granulometría de trabajo FT2-20%RAP para la mezcla BBTM11B. ....	85

---

<b>Tabla 4. 11.</b> Granulometría de trabajo FT2-40%RAP para la mezcla BBTM11B. ....	85
<b>Tabla 4. 12.</b> Contenidos de betún y relación f/b – mezclas fabricadas en planta. ....	89
<b>Tabla 4. 13.</b> Resultados del ensayo Cántabro de las mezclas fabricadas en planta. ...	89
<b>Tabla 4. 14.</b> Resultados de tracción indirecta de las mezclas fabricadas en planta. ...	89
<b>Tabla 4. 15.</b> Resultados del ensayo Fénix de las mezclas recicladas en planta. ....	90

# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1. Planteamiento del Problema

Actualmente, existen muchos firmes que presentan deficiencias que afectan a la seguridad de la circulación, a la comodidad del usuario y a la durabilidad del firme. Estas deficiencias pueden ser la falta de resistencia al deslizamiento, una inadecuada regularidad superficial, deformaciones longitudinales o transversales, o bien, la presencia de fisuras y descarnaduras en el pavimento. Estos aspectos conducen a la necesidad de llevar a cabo una rehabilitación superficial para devolver al firme las características funcionales y estructurales iniciales.

Las principales técnicas de rehabilitación son: fresado y reposición, tratamientos superficiales, capas delgadas, reciclado de firmes y sellado de fisuras.

Sin embargo, sólo el 10% de estas rehabilitaciones se han realizado con técnicas de reciclado debido a que habitualmente se refuerza el firme empleando capas nuevas. Esta práctica conlleva: un incremento de material fresado destinado a los vertederos, explotación de nuevas canteras, así como el consumo de grandes cantidades de betún nuevo. Estos hechos implican un gran impacto ambiental y económico y más, cuando se sabe que este material fresado presenta un elevado potencial debido al árido y ligante que lo constituye y que puede ser reutilizado.

Otro dato que llama la atención es que un estudio realizado por European Asphalt Industry en 2007 sitúa España como el segundo país europeo con una mayor producción de mezclas bituminosas 49,9 millones de toneladas detrás de Alemania con una producción de 51 millones de toneladas. Sin embargo el porcentaje de mezclas nuevas que contengan reciclado en España es sólo el 8 % mientras que en Alemania un 60% de mezclas contienen material reciclado.

Por los aspectos comentados anteriormente y debido a la preocupación general por la preservación de los recursos naturales se están abriendo líneas de investigación para alargar el ciclo de vida de los materiales que forman parte de los firmes mediante el reciclado en planta en caliente, proceso mediante el cual los materiales recuperados son mezclados con árido virgen y betún nuevo, en las proporciones adecuadas, para producir nuevas mezclas en caliente que cumplan los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad para el tipo de capa en que serán utilizadas.

Actualmente, España no cuenta con métodos específicos para caracterizar y diseñar mezclas discontinuas recicladas en caliente en planta; es más, los criterios de aplicación de las técnicas de reciclado de firmes no contemplan el uso de ningún tipo de mezcla reciclada en capa de rodadura ni para las categorías de tráfico más ligeras. Únicamente se contempla su uso en capa intermedia y base, siempre y cuando, se aplique una capa de recrecimiento de 6 a 10 cm dependiendo de la categoría de tráfico pesado que vaya a resistir.

Por estos motivos la construcción sostenible de carreteras es, en la actualidad, no sólo una necesidad, sino también un deber inexcusable. Se debe incrementar el empleo de material reciclado en la rehabilitación y en calzadas de nueva construcción.

Con la presente tesina se pretende ampliar el conocimiento y la experiencia sobre el comportamiento mecánico de las mezclas discontinuas recicladas empleadas en capa de rodadura y comprobar si es posible incrementar las técnicas de rehabilitación de firmes y de obra nueva mediante reciclado.

Las mezclas bituminosas discontinuas son aquellas que presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso.

Para lograr el objetivo planteado se realiza una campaña experimental, analizando los efectos de la incorporación de distintos porcentajes de material reciclado "RAP" (Reclaimed Asphalt Pavement), 10, 20 y 40% en la composición de una mezcla BBTM11B. También, se analiza el efecto del contenido de betún, que se varía entre el 4,75 y 5,75%.

Para caracterizar las mezclas discontinuas se emplean los ensayos de contenido de huecos, Tracción Indirecta y rodadura comprobando si las mezclas cumplen las especificaciones establecidas en el artículo 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3 para mezclas discontinuas. Además, pueden emplearse algunos otros ensayos como el Cántabro y el Fénix, que pueden aportar información muy valiosa para esta tipología de mezclas sobre la resistencia a la abrasión y la resistencia a la fisuración respectivamente.

Se trata de evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas discontinuas recicladas y comparar su comportamiento con el de mezclas convencionales equivalentes, a fin de asegurar que su calidad y características son adecuadas para su utilización en la construcción y rehabilitación de firmes de carretera. A su vez, los ensayos deben permitir definir una fórmula de trabajo óptima para cada tipo de mezcla bituminosa evaluada.

Además se podrán comparar los resultados de la campaña experimental en laboratorio con los resultados de ejecutar los mismos ensayos a probetas procedentes de la fabricación de la mezcla en planta.

## 1.2. Objetivos

Los principales objetivos de la presente tesina son:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre las características mecánicas de las mezclas discontinuas BBTM11B para capas de rodadura, prestando especial atención a las mezclas fabricadas a partir de material reciclado.
- Analizar el comportamiento mecánico de las mezclas BBTM11B recicladas, con diferentes porcentajes de RAP desde el punto de vista de su resistencia a la disgregación, sensibilidad al agua, resistencia a la fisuración, tenacidad y resistencia a las deformaciones plásticas, comparándolas con las de una mezcla del mismo tipo fabricada a partir de materiales nuevos “mezcla patrón”. Además, comprobar que cumplan los valores prescritos en la normativa para mezclas discontinuas en caliente convencionales.
- Analizar el efecto del contenido de betún y del porcentaje de RAP sobre las propiedades mencionadas en el punto anterior.
- Determinar las fórmulas de trabajo, para mezclas bituminosas discontinuas tipo BBTM11B fabricadas con diferentes porcentajes de material reciclado “RAP”.

## 1.3. Contenido de la tesina

La estructura de la tesina empieza con “*Introducción y Objetivos*” donde se plantea el problema y los objetivos que se quieren alcanzar con el estudio experimental. Fruto de la revisión bibliográfica nace el “*Estado del Arte*”, donde se definen las mezclas bituminosas discontinuas en caliente y se presenta el panorama general sobre este tipo de mezclas para saber en qué punto de partida nos encontramos y poder tener una idea de los ensayos que han sido empleados en otros estudios.

Los capítulos más destacados son “*Estudio Experimental*” y “*Resultados y Análisis*”. En el “*Estudio Experimental*” se realiza una descripción de la metodología seguida en la campaña experimental, describiendo las fórmulas de trabajo empleadas y los ensayos realizados, mientras que en “*Resultados y Análisis*” se presentan todos los resultados y se analiza el comportamiento de la mezcla con distintos porcentajes de RAP, comparándolo con una mezcla convencional.

Finalmente, en el capítulo “*Conclusiones*” se comentan los puntos más destacados a los que se ha llegado mediante la campaña experimental.



## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados más relevantes obtenidos a partir de la revisión de estudios, proyectos y publicaciones referentes a las mezclas discontinuas BBTM11B para capa de rodadura, prestando especial atención a los estudios que incorporan materiales reciclados en mezclas bituminosas.

### 2.2. Nuevas mezclas para capa de rodadura.

Los firmes de carretera están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor de diferentes materiales adecuadamente compactados. El firme ha de cumplir las siguientes funciones:

- Proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes bajo las cargas repetidas del tráfico a lo largo de un período suficientemente largo.
- Resistir las sollicitaciones previstas del tráfico pesado repartiendo las presiones verticales ejercidas por las cargas, de forma que a la explanada sólo llegue una pequeña fracción.
- Proteger la explanada de la intemperie y de la acción del agua que puede incidir en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

Los firmes deben poseer unas características funcionales que corresponden a las superficiales de la capa de rodadura y que afectan especialmente a los usuarios. Por otra parte, han de tener también unas características estructurales que están relacionadas con los materiales empleados en las capas de los firmes y con sus espesores. (Kraemer C. et al., 2004)

La presente tesina se centra en mezclas bituminosas en caliente utilizadas en capas de rodadura. La capa de rodadura tiene el compromiso de proporcionar seguridad, comodidad y bajo coste a los usuarios de las carreteras. Del acabado de esta capa y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependerán características superficiales como las siguientes:

- Resistencia al deslizamiento. Influye en la seguridad de circulación, en el desgaste de neumáticos y en el consumo de carburante.
- Regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que afecta a la comodidad de los usuarios en mayor o menor medida según las longitudes de onda de las deformaciones y la velocidad de circulación.
- Ruido de rodadura, tanto en el interior como en el exterior del vehículo.
- Reflexión luminosa, importante para la conducción nocturna y con pavimento mojado.
- Desagüe superficial rápido para limitar cuando llueve el espesor de la película del agua, disminuyendo, así, el riesgo de hidroplaneo y las proyecciones de agua a los vehículos que circulan detrás

Estos aspectos están asociados principalmente con la textura y la regularidad superficial del pavimento. Se pueden definir tres tipos de textura superficial:

La microtextura son irregularidades superficiales menores de 0,5 mm y sirve para definir la aspereza; depende de la textura superficial de los áridos y del mortero bituminoso. Es muy importante para la resistencia al deslizamiento (adherencia neumático-pavimento) y para el desgaste de los neumáticos.

La macrotextura son irregularidades de 0,5 mm a 50 mm; define la rugosidad y depende de la granulometría y del tamaño máximo del árido. Es importante para una adecuada resistencia al deslizamiento a velocidades superiores a los 60 Km/h con pavimento mojado. Mejora la visibilidad al producir una reflexión difusa de la luz y reducir las proyecciones de agua.

La megatextura se corresponde con irregularidades relacionadas con la puesta en obra y con diversos tipos de fallos o degradaciones.

Desde hace tiempo, los técnicos de carretera están luchando por mejorar en todos los sentidos las capas de rodadura. En la década de los 80, fueron los aglomerados drenantes y actualmente se están optimizando las características de las mezclas bituminosas discontinuas en caliente empleadas en capa fina.

Las mezclas drenantes se emplean en capas de rodadura de 4 cm. El agua se introduce en el interior de la capa y es drenada hasta los arcenes a su través, con lo que se consigue mantener la superficie libre de agua y eliminar por completo su proyección por el paso de los vehículos, beneficiando así la visibilidad y seguridad del conductor. (Miró R., 2006)

La mayoría de los países consideran que el aglomerado drenante tiene menor capacidad estructural que uno denso, del 50 al 75%, es decir, que 4 cm de una mezcla porosa equivalen a 2-3 cm de una mezcla densa convencional. Únicamente en España

se considera que ambas capas son equivalentes; se llegó a esta conclusión tras la realización de los primeros tramos experimentales, donde se observó que las capas de rodadura densa y porosa tenían la misma capacidad de refuerzo y producían la misma reducción de la deflexión.

Las mezclas drenantes presentan, además, una elevada resistencia a las deformaciones plásticas y su fallo se produce por disgregación, como consecuencia de una falta de cohesión de la mezcla para poder resistir adecuadamente los esfuerzos de succión y tangenciales del tráfico. Por este motivo, en España este tipo de mezclas se han diseñado en base a su porosidad y su resistencia al desgaste evaluada por el ensayo Cántabro en seco y húmedo. Éste último nos sirve para conocer la adhesividad árido-ligante y la pérdida de cohesión en presencia de agua (Pérez F. et al, 2009).

La duración de esta capa de rodadura, según la experiencia francesa, es de 8-12 años, semejante al intervalo medio de tiempo correspondiente a las renovaciones con pavimentos densos; la experiencia belga ha mostrado que se puede prolongar la vida útil mejorando las propiedades del ligante y, según la española, el comportamiento del aglomerado drenante es mejor que el denso (Miró R., 2006).

Las mezclas discontinuas son de granulometría muy similar a las mezclas porosas, fabricadas con ligantes modificados con polímeros o fibras, compactadas con rodillo liso y cuyo acabado es idéntico al de una mezcla porosa pero se diferencian por su menor porosidad. Al igual que las mezclas porosas proporcionan a las capas de rodadura altas prestaciones en cuanto a resistencia a la fisuración, resistencia a la deformación plástica, durabilidad, sonoridad, comodidad y seguridad.

Esta tesina consiste en caracterizar el comportamiento mecánico de las mezclas discontinuas tipo BBTM11B recicladas y encontrar una fórmula de trabajo válida con distintos porcentajes de RAP para que cumpla las especificaciones prescritas en el PG-3 para mezclas convencionales. Al terminar la tesina no se habrá ejecutado ningún tramo de carretera con este tipo de mezcla, por lo tanto, no podremos comprobar sus características superficiales mediante auscultación, ni obtener resultados mecánicos mediante testigos.

## **2.3. Mezclas discontinuas en caliente para capa de rodadura**

### **2.3.1. Introducción**

Este tipo de mezclas también conocidas como “microaglomerados” se fabrican y se ponen en obra en caliente en capas de espesor medio inferior a los 3’5 cm. Se trata de mezclas con árido de tamaño máximo de 12 mm, elevado porcentaje de gruesos y un alto contenido de huecos.

Su uso en capas delgadas de rodadura está encaminado a proporcionar o restituir las características superficiales del firme pero a su vez proporciona una impermeabilización a las demás capas del firme y mejora notablemente el comportamiento de la sección estructural.

La utilización de estas mezclas viene motivada por alguna limitación técnica o económica para la ejecución de capas más gruesas. Se usan en vías urbanas o túneles en los que no sea posible aumentar la cota de la rasante o vías que busquen especiales características superficiales.

### 2.3.2. Historia, evolución y características de los microaglomerados

La técnica de los microaglomerados en caliente empezó a emplearse en los años 40 principalmente en trabajos de conservación de vías urbanas. Se trataba de morteros asfálticos de textura fina: los americanos "*Sand Asphalt*" y "*Sheet Asphalt*" y los ingleses "*Fine Cold Asphalt*". Consistían en mezclas muy finas, compuestas por arenas naturales, filler y un ligante blando o fluidificado. Estas mezclas presentaban una buena manejabilidad y flexibilidad, debido al bajo rozamiento intergranular producido por el elevado contenido de arenas naturales. Su resistencia mecánica era aportada básicamente por la cohesión del mástico filler-ligante.

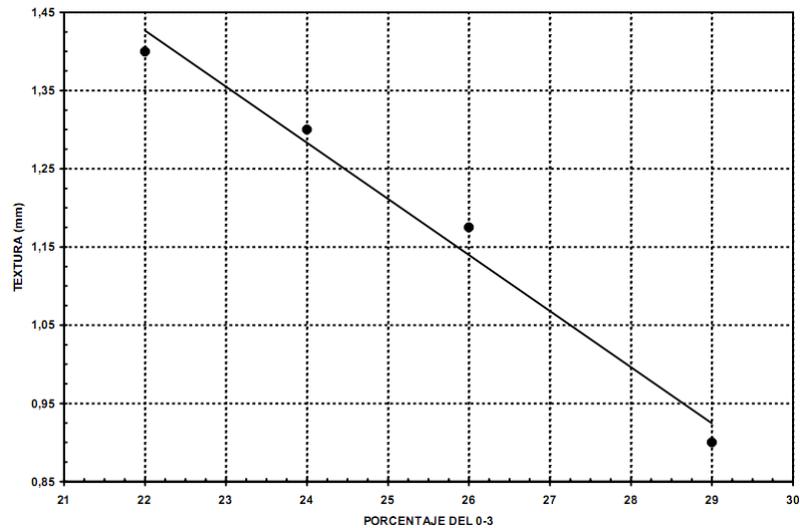
En España y Francia fueron muy utilizados en los años 60 los morteros "*Tapisable*" o "*Composable*". Se fabricaban con áridos duros de procedencia silícea pero cerca del 60 o 65% del esqueleto mineral eran arenas naturales. Presentaban granulometría continua, elevado contenido de filler (8-12%) y elevado porcentaje de ligante (6-8%). Se aplicaban en capas de 1'5 a 2'0 cm para trabajos de regularización de firmes y pavimentación urbana (Gordillo, J., 1997).

Estos morteros, se caracterizaban por un buen comportamiento a fatiga, elevada flexibilidad, bajo nivel sonoro y textura microrugosa áspera adecuada para vías de baja velocidad. Por el contrario, presentaban inconvenientes por su baja estabilidad mecánica, baja resistencia al deslizamiento a velocidades elevadas y mala resistencia al punzonamiento.

Fueron evolucionando y aparecieron los microaglomerados continuos.

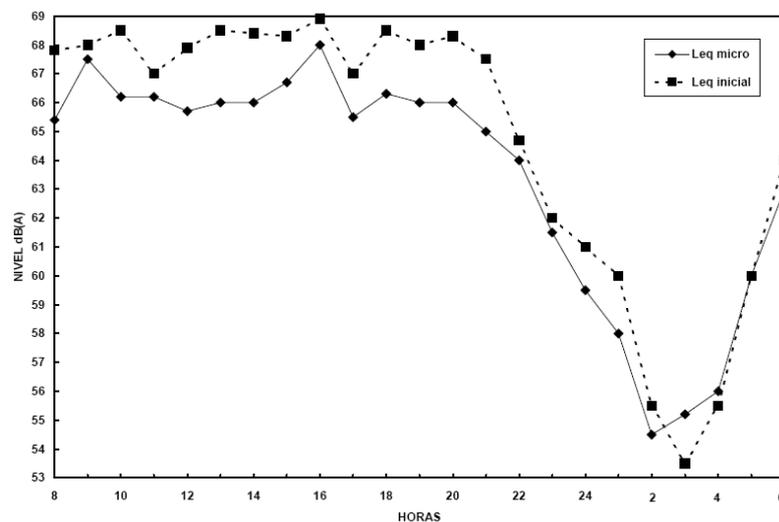
Éstos presentaban una granulometría continua de tipo denso, un elevado contenido de filler del 20 al 35%, áridos de 4, 6, 8 ó 10 mm de tamaño máximo, nulo contenido de huecos y elevado contenido de ligante del 7 al 9,5% debido a la gran superficie específica de la materia mineral. En esta línea se encuentran las "*Sables Enrobé Couté*" francesas y los "*Gussasphalt*" alemanes. Eran muy caros al tener una elevada proporción de betún, tenían problemas de macrotextura y su cohesión era insuficiente para resistir elevadas cargas de tráfico sin que se produjera la fluencia plástica. Estos problemas se solucionaron mediante las mezclas discontinuas en caliente.

Para mejorar las características mecánicas de la mezcla se cambiaron las arenas naturales por arenas procedentes del machaqueo. Y para mejorar los problemas de macrotextura se modificó la granulometría transformándola en discontinua mediante la eliminación total o parcial de alguna fracción del árido. Según Del Pozo, para proporcionar una macrotextura elevada con valores de altura de arena entre 1,2 y 2 mm el porcentaje de la fracción comprendida entre 0 y 3 mm debía ser menor al 24 % (fig.2.1) (Del Pozo, J., 1998).



**Figura 2. 1.** Relación entre el porcentaje de la fracción (0-3mm) y la textura de la mezcla (Fuente: Del Pozo,1998).

La mejora en macrotextura elevó la resistencia al deslizamiento para altas velocidades y tiempo lluvioso. Además, el incremento de la macrorugosidad negativa vino acompañado de una disminución del ruido de rodadura de los vehículos respecto las mezclas convencionales. Apenas existen excitaciones que produzcan vibraciones o deformaciones de los neumáticos y los fenómenos de compresión y expansión de bolsas de aire se ven disminuidos. La figura 2.2 muestra reducciones del nivel sonoro de 1,5 a 2 dB (A) con pavimento seco.



**Figura 2. 2.** Comparación entre el ruido de rodadura de una mezcla convencional y una mezcla discontinua (Fuente: Il Cinturón. Ayuntamiento de Barcelona).

Se trata entonces de mezclas de granulometría 0/6, 0/8, 0/10 ó 0/12, con una discontinuidad del tipo 2/4 ó 3/6, un contenido elevado de fíller del 7 al 10% y un elevado porcentaje de gruesos del 75 al 80%. Se siguen fabricando con un elevado contenido de ligante, del 5 al 7%, para formar con el fíller un buen mástico que proporcione a la mezcla una adecuada cohesión y resistencia a la abrasión.

El elevado contenido de ligante puede causar problemas de estabilidad o exudación del betún, las soluciones propuestas son: la incorporación de fibras o el empleo de betún modificado con polímeros.

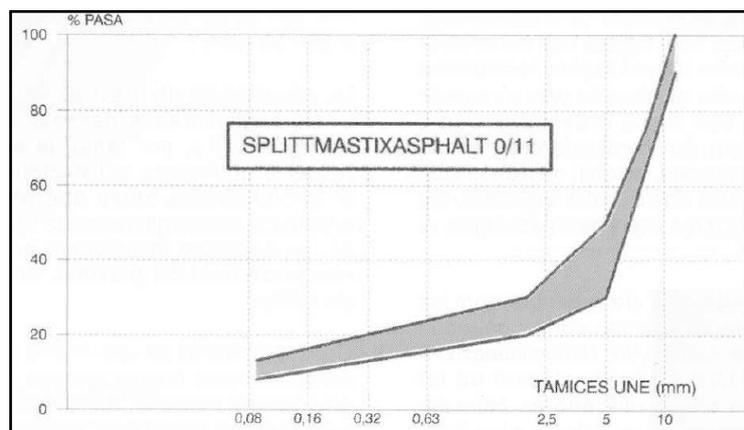
Las fibras producen un aumento de la superficie específica a envolver, se incrementa así el espesor de la película de ligante y se genera un mástico de gran calidad sin riesgo de escurrimiento, interesante desde el punto de vista de durabilidad. La fibra ejerce también un papel estructural aportando una armadura al mortero, mejorando su cohesión, su resistencia a la tracción, a la deformación plástica y a la fatiga (Kraemer C. et al., 2004).

Otra opción es emplear betunes modificados con polímeros en sustitución de los betunes tradicionales para mejorar su cohesión interna, la durabilidad de la macrotextura, minimizar la susceptibilidad térmica y aumentar la elasticidad y la viscosidad. No obstante no todos los polímeros son compatibles con los ligantes bituminosos. Los polímeros empleados de forma más generalizada son los elastómeros termoplásticos de butadieno-estireno telebloque (SBS) y los copolímeros de etilenoacetato de vinilo (EVA) (Miró R., 2006).

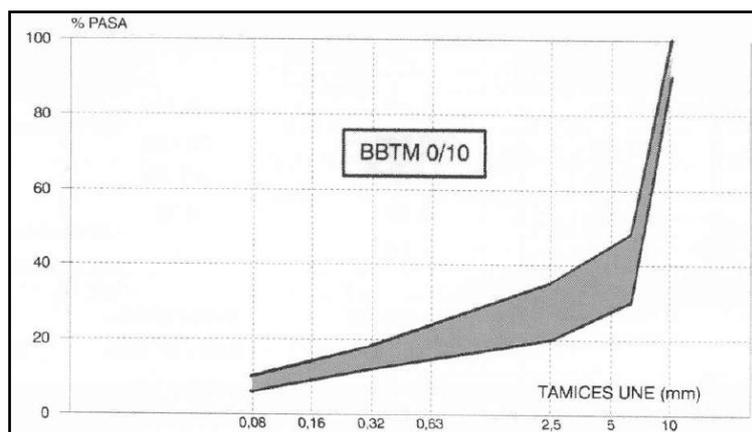
Las mezclas discontinuas en caliente más utilizadas en Europa son: las alemanas denominadas “*Splittmastixasphalt*” o *mezclas SMA* (fig. 2.3), las Francesas BBTM “*Beton Bitumineux Tres Minces*” (fig. 2.4) y las estadounidenses GAP “*gap-graded-asphalt*” (Gordillo,J., 1997).

Las mezclas SMA fueron implantadas en Alemania a finales de los 60 para mejorar la resistencia a la acción de los clavos y posteriormente se desarrollaron en Bélgica y Holanda. Y en el caso francés se emplearon para trabajos de conservación y mejora de la adherencia a elevadas velocidades.

Como reflejan las figuras 2.3 y 2.4 ambas mezclas se caracterizan por poseer elevados contenidos de árido grueso, entre el 65 y 80%, que nos aseguran la estabilidad de la mezcla por el contacto existente entre ellos.



**Figura 2. 3.**Huso granulométrico de las mezclas SMA (Fuente: Carreteras 1997).



**Figura 2.** Huso granulométrico de las mezclas BBTM (Fuente: Carreteras 1997).

Se diferencian porque las SMA presentan un contenido de huecos menor del 4-5% frente al 9-14% de las BBTM, que es debido a un mayor contenido en arena y ligante. Además, las SMA precisan de un aditivo para rigidizar la mezcla e impedir el escurrimiento de ligante y la deformación por fluencia, su macrotextura es menor y pueden necesitar la incrustación de gravillas de 2/5 mm.

Las Francesas se utilizaron por primera vez en España en 1985 como tratamiento de conservación de carreteras sometidas a tráfico intenso. En aquella época los microaglomerados en frío eran muy utilizados, pero el empleo de microaglomerados en caliente compitió con ellos de forma exitosa.

A principios de los 90 tuvieron un desarrollo espectacular con 13 millones de metros cuadrados realizados y en 1996 se normalizaron en un proyecto de la Subdirección General de Conservación del Ministerio de Fomento.

El excelente comportamiento de estos microaglomerados hizo posible que la Dirección General de Carreteras, a través de la Orden Circular 322/97 primero y posteriormente revisada en la Orden Circular 5/2001 del Ministerio de Fomento, normalizó como nuevo artículo 543 "Mezclas discontinuas en caliente para capas de rodadura" del PG-3 dos tipos de mezclas discontinuas en caliente para su empleo en capas de rodadura de pequeño espesor. El primero tipo F (de capa fina) se especificó para capas de espesores comprendidos entre 2 y 3,5 cm; el segundo tipo M (de capa Monogranular) para espesores de 1 a 2 cm. La normativa contemplaba para cada una de las mezclas dos husos granulométricos para tamaños máximos de árido de 8 y 10 mm.

HUSO	CERNIDO POTENCIAL ACUMULADO (%)						
	Tamices UNE-EN 933-2 (mm)						
	12,5	10	8	4	2	0,500	0,063
M8	---	100	75-97	14-27	11-22	8-16	5-7
M10	100	75-97	---	14-27	11-22	8-16	5-7
F8	---	100	75-97	23-38	18-32	11-23	7-9
F10	100	75-97	---	23-38	18-32	11-23	7-9

**Tabla 2. 1.** Husos granulométricos de las mezclas discontinuas tipo F y M españolas (Fuente: OC 5/2001).

Actualmente, la Orden Circular 24/2008 ha realizado algunos cambios en las especificaciones. El artículo 543 del PG-3 ha normalizado dos tipos de mezcla discontinua en caliente para capa de rodadura las BBTM A y las BBTM B. La tabla 2.1 muestra con qué tipo de mezcla se corresponde esta nueva nomenclatura.

DENOMINACIÓN UNE-EN 13108-2 (*)	DENOMINACIÓN ANTERIOR
BBTM 8A	F8
BBTM 11A	F10
BBTM 8B	M8
BBTM 11B	M10

(\*) 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 2. 2.** Denominación actual de las mezclas (Fuente O/C 25/2008, PG-3, artículo 543).

Las mezclas BBTM A se corresponden con las mezclas tipo F, de capa Fina, que se especificaron para capas de espesores comprendidos entre 2 y 3,5 cm. Mientras que las BBTM B se corresponden con las mezclas M, de capa Monogranular, con mayor porcentaje de gruesos y menor de finos, para espesores entre 1 y 2 cm.

En España las mezclas discontinuas en caliente se han ido empleando en capa de rodadura para procedimientos de conservación y rehabilitación y no es hasta hace poco cuando se ha planteado su uso en capa fina en obras de nueva construcción con tráfico medios y pesados.

La Tabla 2.3 nos presenta el porcentaje de mezcla discontinua BBTM empleado en capas de rodadura sobre el total de mezclas asfálticas producidas en 2007, en distintos países europeos. También nos muestra los m<sup>2</sup> construidos (EAPA, 2007). Se puede observar que España es el país europeo con más m<sup>2</sup> de carreteras construidas con mezclas discontinuas.

Country	% of total annual hot and warm mix asphalt production in 2007	In 2007 applied area in million m <sup>2</sup>	Total area in million m <sup>2</sup> incl. 2007
Austria	3,0	1,1	
Belgium	2,0	1,2	
Czech Republic	0,5	0,3	
Greece	0,3	0,2	
Ireland	0,5	0,2	
Portugal	5,3	4,2	
Romania	2,0	10,0	
Spain	3,5	47,6	
Switzerland	4,0	1,1	19,3

**Tabla 2. 3.** Porcentajes de aplicación de mezclas BBTM en capa de rodadura respecto el total de mezclas bituminosas fabricadas (Fuente: EAPA).

## 2.4. Normativa Española para mezclas discontinuas en caliente

Las características y propiedades que deben cumplir las mezclas bituminosas, drenantes y discontinuas, para capa de rodadura, se recogen en el artículo 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), publicado en la Orden Circular 24/2008.

La Norma define como mezclas bituminosas en caliente para capas de rodadura, drenantes y discontinuas, aquéllas cuyos materiales son la combinación de un ligante hidrocarbonato, áridos (en granulometría continua con bajas proporciones de árido fino o con discontinuidad granulométrica en algunos tamices), polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación obliga a calentar el ligante y los áridos.

Las mezclas bituminosas discontinuas son aquellas que por su baja proporción de árido fino, presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso. Se distinguen dos tipos de mezclas bituminosas discontinuas con dos husos granulométricos con tamaño máximo nominal de ocho y once milímetros (8 y 11 mm) cada uno. Con cada huso podrán fabricarse mezclas para capas de rodadura de dos a tres centímetros de espesor.

El objetivo de la presente tesina consiste, mediante un trabajo de laboratorio y un análisis de los resultados, determinar las fórmulas de trabajo e mezclas discontinuas que contenga un alto contenido de RAP y cumplan con las especificaciones del PG-3 para mezclas discontinuas BBTM 11B convencionales. Por este motivo se presentan a continuación las especificaciones de la normativa española para este tipo de mezclas discontinuas, haciendo hincapié en las BBTM B. Si se quiere consultar los valores específicos para otro tipo de mezcla discontinua se puede consultar el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3 (PG-3, 2008).

### 2.4.1. Materiales

#### 2.4.1.1. *Ligante hidrocarbonado*

Se fijará el tipo de ligante hidrocarbonado a emplear en función de la categoría de tráfico pesado definida en la Norma 6.1 IC de Secciones de Firme o en la Norma 6.3 IC de Rehabilitación de Firmes. Mediante la tabla 2.4 se escoge el tipo de ligante a emplear.

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 y T0	T1	T2(*) y T31	T32 y arcenes	T4
DISCONTINUA	BM-3c	BM-3c BM-3b	BM-3b B60/70 BC50/70	B60/70 B80/100 BC50/70	
DRENANTE	BM-3c	BM-3c BM-3a BM-3b	BM-3a BM-3b B60/70 BC50/70	B60/70 B80/100 BC50/70	

(\*) Para tráfico T2 se emplearán betunes modificados en autovías o cuando la IMD sea superior a 5 000 vehículos por día y carril

- Se podrán emplear también betunes modificados con caucho que sean equivalentes a los betunes modificados de esta tabla, siempre que cumplan las especificaciones del artículo 215 de este Pliego. En ese caso, a la denominación del betún se le añadirá una letra C mayúscula, para indicar que el agente modificador es caucho procedente de neumáticos fuera de uso.

**Tabla 2. 4.** Tipo de ligante Hidrocarbonado a emplear (Fuente: PG-3).

#### 2.4.1.2. Áridos

Los áridos a emplear podrán ser naturales o artificiales siempre que cumplan las especificaciones recogidas en el artículo 543. El árido grueso para las categorías de tráfico pesado T00 y T0 no podrá proceder de la trituración de gravas de yacimientos granulares ni de canteras de naturaleza caliza. A continuación se muestran algunas de las especificaciones para el árido grueso que será el principal componente de la mezcla.

La proporción de partículas total y parcialmente trituradas del árido grueso, según la UNE-EN 933-5, deberá cumplir lo fijado en la tabla 2.5.

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
	T00 a T31	T32 y arcenes	T4
DISCONTINUA	100	≥ 90	≥ 75
DRENANTE			

**Tabla 2. 5.** Proporción de partículas total y parcialmente trituradas del árido grueso (%) (Fuente: PG-3).

Adicionalmente, la proporción de partículas totalmente redondeadas del árido grueso, según la UNE-EN 933-5, deberá cumplir lo fijado en la tabla 2.6.

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
	T00 a T31	T32 y arcenes	T4
DISCONTINUA	0	≤ 1	≤ 10
DRENANTE			

**Tabla 2. 6.** Proporción de partículas totalmente redondeadas del árido grueso (% en masa) (Fuente: PG-3).

Para la forma del árido grueso el índice de lajas de las distintas fracciones del árido grueso, según la UNE-EN 933-3, deberá cumplir lo fijado en la tabla 2.7.

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
	T00	T0 a T31	T32 y arcenes	T4
DISCONTINUA	≤ 20		≤ 25	
DRENANTE			≤ 25	

**Tabla 2. 7.** Índice de lajas del árido grueso (Fuente: PG-3).

En cuanto la resistencia a la fragmentación del árido grueso existe un tratamiento diferenciado entre los tipos BBTM A y BBTM B. Los primeros tienen especificaciones similares a las exigidas a las mezclas en caliente convencionales para capa de rodadura, mientras que a las de tipo BBTM B, cuyos áridos tienen que soportar directamente los esfuerzos de compactación y del tráfico se les asigna unas especificaciones más similares a los tratamientos superficiales. El coeficiente de los Ángeles del árido grueso como muestra la tabla 2.8 es más restrictivo para las mezclas BBTM B.

TIPO DE MEZCLA (*)		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes	T4
DISCONTINUA	BBTM A	≤ 15	≤ 20	≤ 25	
	BBTM B	≤ 15			
DRENANTE	PA	≤ 15	≤ 20	≤ 25	

**Tabla 2. 8.** Coeficiente de los Ángeles del árido grueso (Fuente: PG-3).

El coeficiente de pulimiento del árido grueso a emplear en capas de rodadura, según la UNE-EN 1097-8, deberá cumplir lo fijado en la tabla 2.9.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 y T0	T1 a T31	T32, T4 y arcenes
≥ 56	≥ 50	≥ 44

**Tabla 2. 9.** Coeficiente de pulimiento acelerado (Fuente: PG-3).

#### 2.4.2. Tipo y composición de la mezcla

La designación de las mezclas bituminosas discontinuas se hará según la nomenclatura establecida en la UNE-EN 13108-2, siguiendo el siguiente esquema:

BBTM-D-Clase-ligante

Donde D es la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por cien del total del árido. Y en la posición de ligante se debe incluir la designación del tipo de ligante hidrocarbonado utilizado.

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos, deberá estar comprendida dentro del huso BBTM 11B fijado en la tabla 2.10.

TIPO DE MEZCLA (**)	ABERTURA DE LOS TAMICES (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 de la UNE-EN 933-2 y es retenida por el tamiz 2 mm de la 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 2. 10.** Husos granulométricos (Fuente: PG-3).

La dotación mínima de ligante especificado para las mezclas BBTM 11B se recoge de la tabla 2.11, en el cual se establece que será de un 4,75% en masa sobre el total de la mezcla.

CARACTERÍSTICA	TIPO DE MEZCLA					
	PA 11	PA 16	BBTM8B	BBTM11B	BBTM8A	BBTM11A
DOTACIÓN MEDIA DE MEZCLA (kg/m <sup>2</sup> )	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 <sup>2</sup> )	Firme nuevo	> 0,30			> 0,25	
	Firme antiguo	> 0,40			> 0,35	

(\*) Incluidas las tolerancias especificadas en el apartado 543.9.3.1. Se tendrán en cuenta las correcciones por peso específico y absorción de los áridos, si son necesarias.

**Tabla 2. 11.** Tipo, composición y dotación de la mezcla (Fuente: PG-3).

### 2.4.3. Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.

A continuación, se recogen los criterios de dosificación para una mezcla discontinua BBTM11B. Estos criterios se establecen a partir del contenido de huecos, las deformaciones permanentes y la sensibilidad al agua.

#### 2.4.3.1. Contenido de huecos

El contenido de huecos en mezcla, determinado según el método de ensayo de la UNE-EN 12697-8 deberá cumplir para mezclas discontinuas BBTM 11B un valor mínimo de un 12% de huecos.

TIPO DE MEZCLA	% DE HUECOS
BBTM A	≥ 4
BBTM B	≥ 12
Drenante (PA)	≥ 20

**Tabla 2. 12.** Contenido de Huecos en mezcla (Fuente: PG-3).

### 2.4.3.2. Resistencia a la deformación permanente

En mezclas discontinuas, se podrá exigir que la resistencia a deformaciones plásticas, determinada mediante el ensayo de pista de laboratorio, cumpla con lo establecido en la tabla 2.13.

ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
	T00 a T2	T3, T4 y arcenes
CÁLIDA Y MEDIA	0,07	0,10
TEMPLADA		-

**Tabla 2. 13.** Pendiente media de deformación en Pista en el intervalo de 5000 a 1000 ciclos según UNE-EN 12697-22 (mm para  $10^3$  ciclos de carga) (Fuente: PG-3).

### 2.4.3.3. Sensibilidad al agua

Para estudiar la sensibilidad al agua se debe comprobar la adhesividad árido-ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Para ello la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, realizado a 15 °C según la UNE-EN 12697-12, tendrá un valor mínimo del 90% para mezclas discontinuas.

### 2.4.3.4. Ensayos complementarios

La Orden FOM 891/2004 para su dosificación proponía el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste. Esto es debido a que este tipo de mezclas debe resistir la acción abrasiva y disgregadora del tráfico y del agua y el ensayo Cántabro nos permite su evaluación.

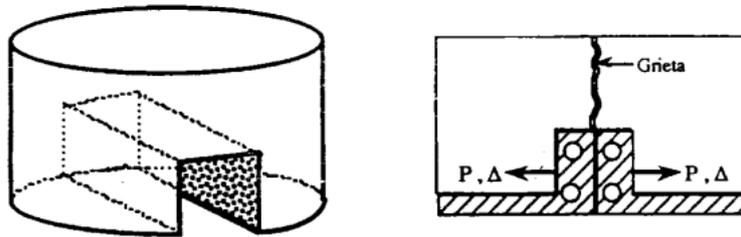
El ensayo Cántabro ha desaparecido en la Orden 24/2008 pero hasta el momento ha sido el ensayo que se ha venido utilizando para el dimensionamiento de mezclas discontinuas y del cual se tiene experiencia.

## 2.5. Estudios realizados en mezclas discontinuas

Este tipo de mezclas van a ser extendidas en capas delgadas sobre pavimentos fisurados, por lo que deberán ser resistentes a la fisuración para retardar al máximo la propagación de las fisuras hacia la superficie. Determinar la energía de fisuración es una de las preocupaciones más destacadas de este tipo de mezclas. Existen diferentes ensayos para obtenerla, inicialmente se empleaba el ensayo de Tracción Directa BTM (desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la ETSCCPB) y posteriormente se ha empezado a emplear el ensayo Fénix.

El ensayo BTM nos permite caracterizar mezclas asfálticas respecto a sus propiedades de fractura mediante: la resistencia a tracción, la energía específica de fractura, el índice de rigidez a tracción y el desplazamiento de rotura total.

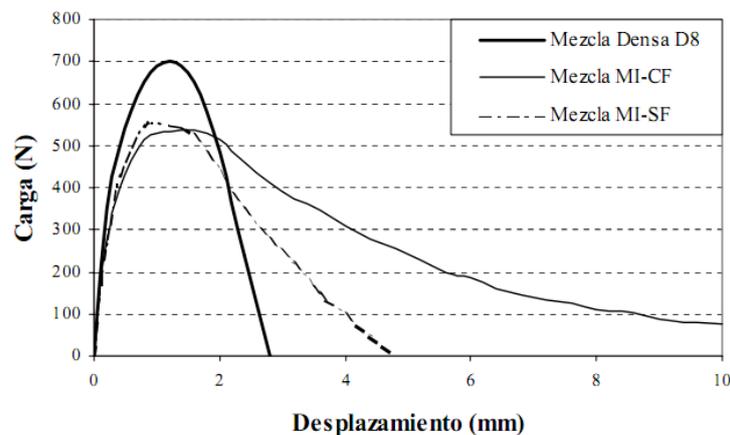
Para la metodología de ensayo se incorporan dos semicírculos metálicos con una entalladura diametral, que servirán de base a la probeta para facilitar la aplicación directa de carga a tracción en una parte de la misma paralela a esta base (fig.2.5a).



**Figura 2. 5.** a) Probeta con ranura en la base para el ensayo BTD. b) Fallo del ensayo BTD (Fuente: Lorenzo A., 2002).

Durante el ensayo se va produciendo la apertura de la entalladura, lo que provoca la fisuración de la probeta (fig.2.5b). La carga necesaria para provocar la rotura (valor pico) y la posterior progresión de la fisura a través de la mezcla permite valorar la tenacidad de la mezcla, es decir la energía absorbida hasta alcanzar la rotura.

Es interesante comparar el comportamiento hasta rotura de una mezcla densa y una mezcla discontinua con y sin incorporación de fibras. Miró lo presenta en la figura 2.6 (Miró R., 2006).



**Figura 2. 6.** Resultados del ensayo BTD en distintas mezclas bituminosas (densa, discontinua sin fibras, discontinua con fibras) (Fuente: Miró, 2006).

El microaglomerado sin fibras (MI-SF) tiene una menor rigidez y un desplazamiento a rotura ligeramente mayor que la mezcla densa (D8), sin embargo, la tenacidad de ambas mezclas (área bajo la curva) es similar. Cuando realmente se aprecia un cambio de la tenacidad y del desplazamiento a la rotura es con la adición de fibra (MI-CF). La tenacidad aumenta entre un 50% y un 100%, y el desplazamiento para el que se produce la rotura total pasa de 2,8 ó 4,5 mm en una mezcla sin fibras, a mayor de 10 mm en una mezcla con fibras. Además la adición de fibras proporciona una mayor capacidad de resistir cargas una vez que se ha producido la rotura del mástico (carga pico).

En esta línea de investigación, en mayo del 2010, Ahmed ha realizado un estudio que pretende caracterizar la resistencia a la fisuración de una mezcla discontinua “*gap graded asphalt*” y una mezcla empleada en capa de rodadura muy delgada conocida por la expresión “*Thin bonded wearing courses*”.

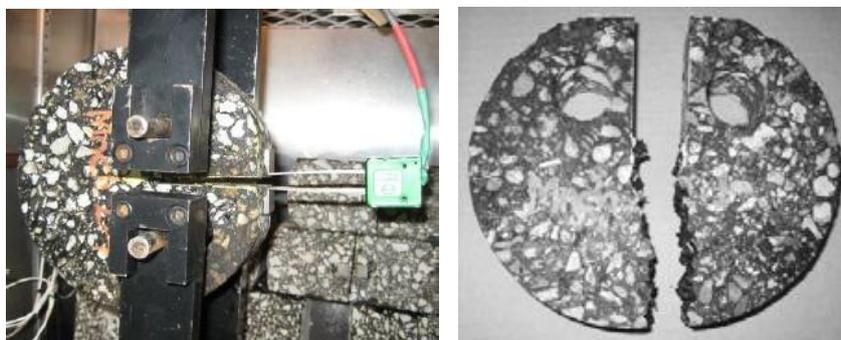
“*Thin bonded wearing course*” es una capa de rodadura muy delgada formada por una mezcla discontinua “*gap graded hot mix asphalt*” aplicada sobre una emulsión bituminosa modificada con polímeros “*tack coat*”. La emulsión sella la superficie existente y produce un alto contenido de betún en la interfase entre la carretera existente y la mezcla discontinua. La mezcla discontinua presenta una textura abierta que permite el paso del agua. Este tratamiento se usa para mantenimiento de carreteras pero podría ser utilizado como capa de rodadura en obra nueva. Presenta la ventaja que puede ser abierta al tráfico en menos de 15 minutos (Ahmed S. et al., 2010).

Se estudiaron tres variables:

- El efecto de la emulsión en el comportamiento a fractura de la capa delgada de rodadura.
- El efecto de la densidad y el contenido de huecos en la resistencia a la fisuración de las mezclas discontinuas.
- El efecto del grosor de la mezcla en las propiedades de fractura de las mezclas discontinuas y de la capa delgada de rodadura.

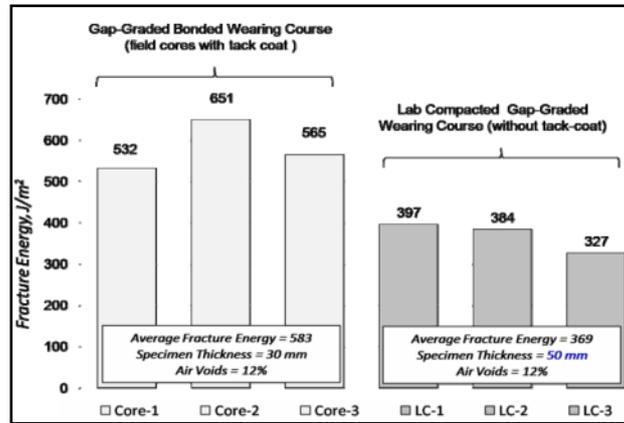
Para estudiar estas variables se compararon los testigos extraídos de tres proyectos distintos con muestras de laboratorio. Los testigos se extrajeron inmediatamente después de la construcción y las probetas de laboratorio fueron compactadas a distintos niveles mediante el compactador SGC “*Superpave Gyrotory Compactor*”.

La resistencia a fisuración fue determinada mediante el ensayo DC(T) “*Disk-Shaped Compact Tensión*”. Este procedimiento no recurre a ninguna carga a compresión. A partir de una probeta se realizan dos pequeños agujeros para aplicar posteriormente dos esfuerzos a tracción (fig.2.7). El aspecto beneficioso de este método es que no se producen zonas de compresión directa y la zona de fractura es mayor. Sin embargo, es posible ocasionar zonas de microfisuras al efectuar los agujeros para la posterior aplicación del esfuerzo a tracción (Pérez F. et al., 2009).

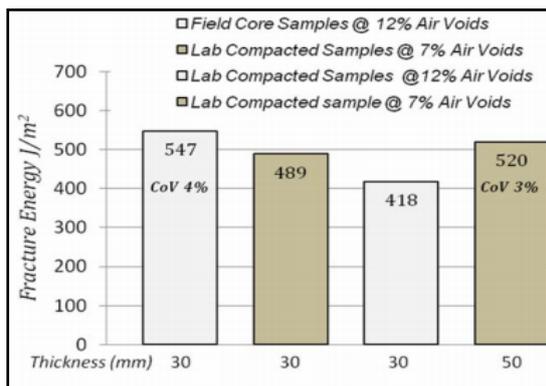


**Figura 2. 7.** a) Ensayo DC(T). b) Fallo por fisuración en el ensayo DC(T)  
(Fuente: Pérez F. et al, 2009).

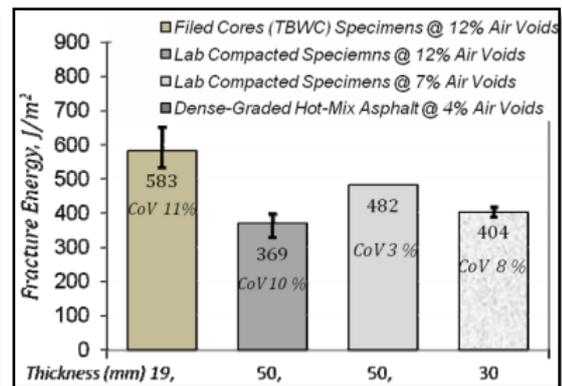
Los resultados más destacados obtenidos en este estudio realizado en 2010 por Ahmed S., et al. se muestran en las figuras 2.8, 2.9 y 2.10.



**Figura 2. 8.** Energía de Fractura (J/m<sup>2</sup>) en testigos y probetas de laboratorio (Fuente: Ahmed S.et al., 2010).



**Figura 2. 10.** Energía de Fractura en función del contenido de huecos. (Muestras de campo y Laboratorio) (Fuente: Ahmed S.et al., 2010).



**Figura 2. 9.** Comparación entre la Energía de Fractura entre mezclas densas y discontinuas (Fuente: Ahmed S.et al., 2010)..

La presencia de la emulsión bituminosa modificada con polímeros, riego de adherencia, incrementa la resistencia a la fisuración (fig. 2.9). A menor contenido de huecos en las mezclas discontinuas, se precisa más energía para provocar su fractura (fig. 2.10). Por último, comentar que presentan un mejor comportamiento a fractura las mezclas discontinuas y las mezclas que han sufrido un riego de adherencia, que las mezclas densas convencionales (fig. 2.9).

## 2.6. Mezclas con materiales Reciclados

El refuerzo de firmes añadiendo capas nuevas es el procedimiento habitual de rehabilitación de firmes, mientras que sólo en el 7-10% de estas obras se ha utilizado algún procedimiento de reciclado. Por este motivo es necesario incrementar el empleo

de material reciclado en este tipo de procedimientos (Pérez Jiménez F.E; Miro R; Martínez C, 2004).

Las ciudades no paran de crecer y se está produciendo un deterioro del medio ambiente debido al incremento del uso de recursos naturales y del consumo de energía. Gracias a la concienciación ecológica, se plantea la necesidad de reutilizar todo tipo de materiales y aprovechar su uso para intentar mejorar alguna característica de las mezclas bituminosas.

En mezclas discontinuas tipo BBTM11B se han realizado gran cantidad de estudios empleando polvo de caucho en su composición para dar salida a la gran cantidad de neumáticos fuera de uso que existen actualmente. Y en otros tipos de mezcla se ha empezado a emplear material reciclado conocido con el acrónimo RAP "*Reclaimed Asphalt Pavement*", que proviene de firmes antiguos, para crear nuevas mezclas asfálticas.

### **2.6.1. Mezclas discontinuas con NFU's**

Debido a los problemas medioambientales que causan los neumáticos fuera de uso NFU's, los artículos 542 y 543 del PG-3 establecen que siempre que sea técnica y económicamente viable se priorizará la utilización de NFU's en las mezclas bituminosas.

El objetivo de la modificación de mezclas bituminosas con polvo de neumáticos es dotarlas de mayor cohesión, resistencia a la fatiga y resistencia a las deformaciones plásticas, análogamente a lo que tradicionalmente se ha pretendido con los betunes modificados con polímeros.

En España, García Serrada et al. En 2008 realizaron y auscultaron unos tramos de prueba en una de las calles más transitadas de Valladolid con objeto de reducir la contaminación acústica. Se utilizaron tres tipos de mezclas: una mezcla semidensa tipo S-12 con betún B-60/70, una mezcla tipo M-10 con betún modificado con polímeros BM-3c y una mezcla M-10 con un betún-caucho. Las medidas de ruido se tomaron antes y después de la ejecución de los tramos con los métodos CPX y *pass-by*.

Las conclusiones a las que se llegaron fueron que con la mezcla M-10 con betún caucho, con el método CPX, se alcanzaba una mejora media de 1dB(A) respecto a la mezcla S-12, mientras que si se comparaban las mezclas M-10 con y sin caucho presentaban valores similares comportándose desde el punto de vista acústico mejor la mezcla con caucho. Con el método *pass-by* la reducción de ruido de la mezcla M-10 con caucho respecto a la S-12 también es de 1dB(A) (García Serrada, C. et al., 2008).

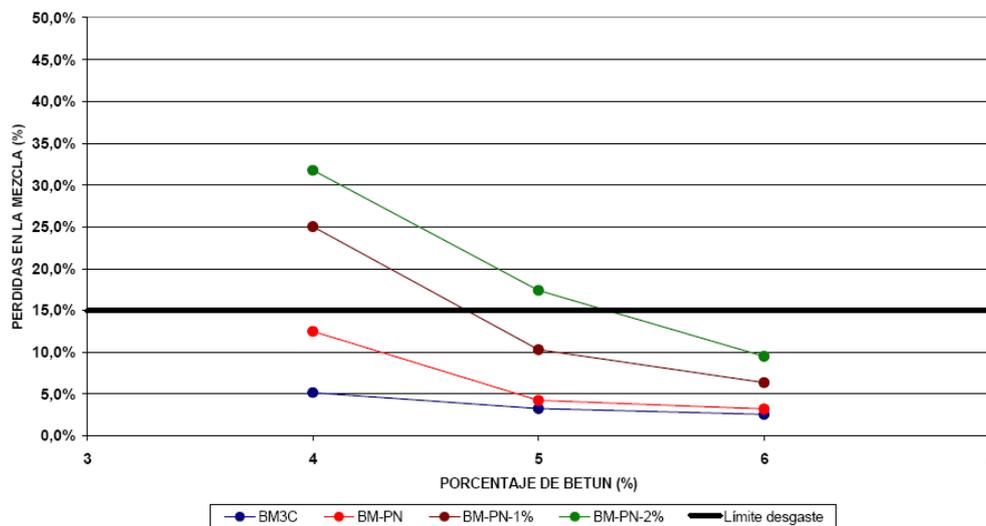
En Marzo de 2009, Gruas J. (Gruas J.M, et al., 2009) presenta en su estudio titulado "Efecto de utilización de mezclas bituminosas con polvo de neumático sobre las características funcionales de un pavimento" los resultados de analizar el efecto que tiene la adición de polvo de neumático en un microaglomerado M10 sobre sus características mecánicas y funcionales. Se realizó a partir de muestras de laboratorio,

testigos y auscultaciones realizadas sobre diferentes tramos experimentales donde se emplearon 4 tipos de ligantes:

- BM-3c.
- BM-PN con un 10% de polvo de neumático respecto el peso de ligante adicionado por vía húmeda.
- BM-PN con un 1% de polvo de neumático respecto el peso de los áridos adicionado por vía seca.
- BM-PN con un 2% de polvo de neumático respecto el peso de los áridos adicionado por vía seca.

Las mezclas preparadas en el laboratorio se caracterizaron con el ensayo Cántabro, Tracción Directa y Pista.

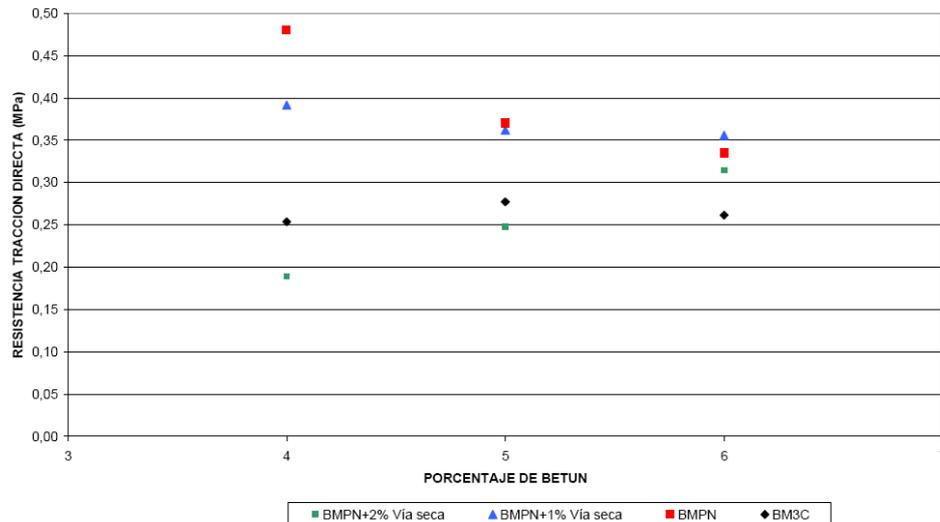
Mediante el ensayo cántabro se observó que las pérdidas para las muestras con betún BM-3c y BM-PN por vía húmeda cumplen las especificaciones. Sin embargo, el betún modificado con polvo de neumático por vía seca con un 1 y 2% adicionado en seco únicamente cumplieron con un 6% de betún (fig.2.11).



**Figura 2. 11.** Pérdidas por desgaste para mezclas BBTM11B con y sin incorporación de polvo de caucho (Fuente: Gruas J.M, et al, 2009).

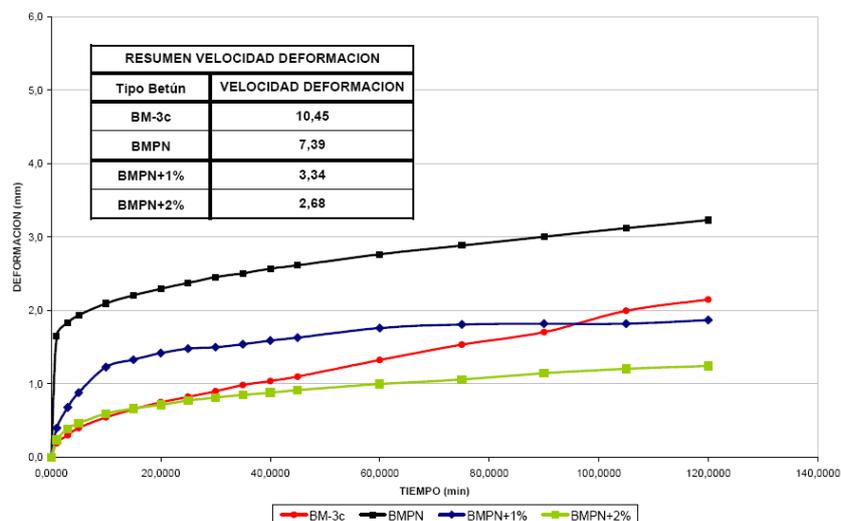
Las pérdidas obtenidas en los testigos de los tramos experimentales cumplían el valor fijado en el PG-3 (Orden FOM891/2004) y no diferían excesivamente de los determinados en las fórmulas de trabajo. Se concluyó que las mezclas con adición de polvo de neumático por vía seca son más susceptibles al desgaste, tanto en seco como tras inmersión.

Las mezclas con polvo de neumático presentaron una mayor resistencia a la tracción directa que las mezclas con betún BM-3c, excepto en el caso de las mezclas con un 2% de polvo de neumático añadido por vía seca (fig.2.12).



**Figura 2. 12.** Resistencia máxima a la tracción directa a 20°C para mezclas con y sin aportación de polvo de neumático (Fuente: Gruas J.M, et al, 2009).

Las deformaciones plásticas (fig.2.13) coincidieron con el comportamiento estudiado por Fontes, L. que determinó que las mezclas que presentaban mayor resistencia a las deformaciones plásticas son mezclas con granulometría discontinua en presencia de polvo de caucho. En su caso, utilizó dos ensayos “*The Repeated Simple Shear Test at Constant Height*” (RSST-CH) y “*The Accelerated Pavement Testing Simulator Test (Wheel Tracking)*”. (Fontes, L. et al, 2010)



**Figura 2. 13.** Deformaciones plásticas obtenidas mediante el ensayo de Pista para mezclas con y sin aportación de polvo de neumático (Fuente: Gruas J.M, et al, 2009).

La auscultación de tramos experimentales en la carretera B-140 entre Sabadell y Santa Perpètua puso de manifiesto que las condiciones de ejecución y de servicio tienen mucha influencia en las características funcionales del pavimento. Además se concluyó que la incorporación de polvo de neumático por vía húmeda no afecta de forma significativa en los valores de textura de la mezcla, mientras que por vía seca a medida que se aumenta el porcentaje de polvo de neumático disminuye la textura. Al incorporar polvo de neumático por vía seca disminuyó el nivel de ruido hasta 1dB(A).

## 2.6.2. Mezclas bituminosas con RAP “Reclaimed Asphalt Pavement”

### 2.6.2.1. Introducción

El RAP se define como el pavimento asfáltico que al haber cumplido su vida útil ha sido fresado o extraído y posteriormente triturado (McDaniel R et al., 2000). Es de gran valor debido a que está constituido por áridos y ligante que aún conservan parte de sus propiedades mecánicas.

El uso de RAP en mezclas bituminosas nace de la necesidad de dar solución a problemas relacionados con el medio ambiente, ya sea por la disminución de recursos naturales, las emisiones generadas, el elevado volumen de residuos que se generan en los procedimientos de conservación de carreteras o el incremento de precio de los derivados del petróleo como es el betún.

El aprovechamiento de material reciclado en capas asfálticas aporta varias ventajas a nuestro entorno:

- Se reduce la generación de residuos y la problemática de su gestión.
- Se ahorran recursos naturales debido a que los áridos y el betún que componen las mezclas antiguas pueden utilizarse en la nueva mezcla, reduciendo así, los porcentajes de árido virgen y de betún nuevo.

Pero también se generan unos gastos debidos al:

- Proceso de fresado y traslado del RAP (consumo energético de la maquinaria empleada).
- Proceso de tratamiento y almacenamiento del RAP.
- Sobrecalentamiento de los áridos y del ligante para la preparación de la mezcla.

Entonces debe establecerse un balance económico entre los ahorros y los gastos. Este balance dependerá del precio del betún y de los áridos en la zona de actuación.

Se pueden establecer dos grandes técnicas de reciclado en caliente, el tratamiento en caliente in situ y el tratamiento en caliente en planta.

Los primeros fueron concebidos en Estados Unidos en el año 1956 e introducidos en Europa en el año 1970. El tratamiento “in situ” consiste en la conservación de firmes degradados que se reutilizan directamente, con o sin aportación de materiales nuevos, mezclándolos in situ y posteriormente extendiendo y compactando la mezcla para constituir una nueva capa de firme.

En el reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente el RAP extraído de capas envejecidas se mezcla en planta con áridos y ligante nuevo y a veces con un agente rejuvenecedor para fabricar una nueva mezcla que ha de cumplir las mismas prescripciones exigidas para las mezclas convencionales.

### 2.6.2.2. Panorama español dentro de Europa

Gracias a una publicación “Key figures of European Asphalt industry in 2007” realizada por la Asociación Europea del Asfalto EAPA “European Asphalt Pavement Association” se observa que España es el segundo país europeo con una mayor producción de toneladas de material asfáltico alcanzando un valor de 49,9 millones de toneladas (Tabla. 2.14).

#### → Total Production of Hot Mix Asphalt in 2002 - 2007 (in million tonnes)

Country	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Austria	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,5
Belgium	4,5	4,8	4,9	5,2	5,0	4,5
Croatia	1,9	3,5	3,0	3,8	3,7	3,7*
Czech Republic	4,4	5,8	5,5	5,6	7,4	7,0
Denmark	2,8	2,9	3,6	3,2	3,4	3,3
Estonia	1,1	0,9	1,1	1,2	1,5	1,5
Finland	3,9	4,9	5,6	6,2	5,5	5,9
France	39,4	38,7	40,5	40,1	41,5	42,3
Germany	58,0	55,0	52,0	57,0	57,0	51,0
Great Britain	27,8	27,8	26,9	27,9	25,7	25,7
Greece	6,5*	6,5*	7,0	7,0*	7,8	8,0
Hungary	3,2	3,1	3,0	3,8	4,4	3,3
Iceland	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
Ireland	3,2	3,3	3,4	3,4	3,5	3,3
Italy	39,9	42,4	46,0	40,1	39,9	35,1
Latvia	0,6*	0,6*	0,6*	0,6*	0,6*	0,6*
Lithuania						1,7
Luxembourg					0,6	0,6
Netherlands	7,9	7,9	7,9	8,6	9,8	10,2
Norway	3,9	4,1	4,5	5,1	5,1	5,9
Poland	10,8	12,0	12,7	15,0	18,0	18,0*
Portugal	6,0	6,0*	9,5	11,1	8,9	9,0
Romania	2,8	2,8*	2,8*	2,8*	2,8*	3,2
Slovakia	1,2	1,2	1,0	1,8	2,2	2,2*
Slovenia	1,4	1,6	1,7	1,5	2,2	2,1
Spain	30,0*	30,0*	38,9	41,5	43,4	49,9
Sweden	6,7	6,6	6,8	7,2	7,3	7,7
Switzerland	5,0	4,8	4,6	4,7	5,4	5,2
Turkey	14,7	13,2	11,3	16,6	18,9	22,2
<b>Europe</b>	<b>297,8</b>	<b>300,6</b>	<b>315,1</b>	<b>320,9</b>	<b>341,7</b>	<b>342,9</b>
Australia	7,0	6,5	6,9	7,7	7,7	9,0
Japan	68,1	63,7	60,2	57,3	56,6	54,9
New Zealand	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
Ontario - Canada	14,0	13,0	11,0	13,0	13,0	13,2
U.S.A.	500,0	500,0	475,0	500,0	500,0	500,0
Venezuela			6,6	9,5	22,0	

Tabla 2. 14. Producción de Mezclas asfálticas (millones de toneladas) (Fuente:EAPA).

Sin embargo la tabla 2.15 muestra que sólo un 8% de las nuevas mezclas asfálticas producidas contienen material reciclado. Es por lo tanto España un país que tiene una cuenta pendiente con el reciclaje de mezclas bituminosas.

Country	Available reclaimed asphalt (tonnes)	% of available reclaimed asphalt used in				% of the new hot and warm mix production that contains reclaimed material
		Hot and warm recycling	Half warm recycling	Cold recycling	Unbound layers	
Austria	1 500 000	10		15	75	
Belgium	1 300 000	50	0			38
Czech Republic	650 000	50		35	15	10
Denmark	479 000	57	0		43	53
France	6 500 000	13		< 2		< 10
Germany	14 000 000	82			18	60
Greece	0	0	0	0	0	0
Great Britain	4 000 000					
Ireland	60 000	40		0		2,5
Italy	14 000 000	20				30
Luxembourg	155 000	90		10		40
Netherlands	3 500 000	90			10	67
Norway	615 000	8	- 0	26	54	6
Portugal	400 000	60	0	0	10	30,0
Romania	20 000	60	10	15	15	5,0
Slovenia	20 000	50		10		15
Spain	1 250 000	45		15	40	8,0
Sweden	900 000	60	25	10	5	50
Switzerland	980 000	50		50*****		17,0
Japan						72,5
Ontario - Canada	3 500 000	60		15	5	60,0
U.S.A.	100 000 000	95 *****				
Venezuela	8 970 000	0		16		0

**Tabla 2. 15.** Porcentajes de mezclas asfálticas nuevas con presencia de material reciclado (Fuente: EAPA).

### 2.6.2.3. Normativa reguladora de las mezclas recicladas

La normativa española que regula la utilización de RAP y de mezclas recicladas figura en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras, PG-4 (PG-4, 2001).

Los criterios de aplicación de las técnicas de reciclado de firmes son los siguientes:

- Con categoría de tráfico T00 no se podrá utilizar en ningún caso materiales reciclados.
- Con categoría de tráfico T0 no se podrán utilizar en ningún caso las técnicas de reciclado in situ en frío. Únicamente se podrán emplear mezclas bituminosas en caliente recicladas en central en el recrecimiento de arcenes, siempre que sobre ellas se disponga posteriormente como mínimo una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 10 cm.
- Con categoría de tráfico T1 se podrán utilizar las mezclas bituminosas en caliente recicladas en central en los mismos supuestos indicados para la categoría T0, considerando, en este caso, que se coloquen capas de recrecimiento en un espesor mínimo de 6 cm. Además podrán emplearse mezclas bituminosas recicladas in situ con emulsión bituminosa en arcenes cuando sobre este material se disponga, como mínimo, una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 8 cm.
- Con categorías de tráfico T2 a T4, podrán utilizarse todas las técnicas de reciclado, con la condición de disponer sobre cualquiera de ellas, como mínimo, una capa de mezcla bituminosa en caliente del tipo densa (D) o semidensa (S).

El artículo 22 del PG-4 titulado “Reciclado en central en caliente de capas bituminosas” describe el procedimiento que deben cumplir para el reciclado en planta de capas asfálticas, el cual se aplica a mezclas asfálticas recicladas con una proporción en masa de material asfáltico reciclable (RAP) comprendida entre el 10 y el 50% de la masa total de la mezcla. Existen puntos destacados en esta normativa:

- **No se contempla el empleo de mezclas recicladas en capas de rodadura.**
- La dotación de ligante de aportación deberá ser como mínimo el 60% de la dotación total de ligante hidrocarbonado de la mezcla reciclada.
- La relación entre la estabilidad Marshall y la deformación Marshall será inferior a 8 KN/mm.
- La dotación total de ligante hidrocarbonado (el de aportación más el procedente del material asfáltico reciclable) no será inferior, expresada en proporción en masa sobre el total de los áridos en seco de la mezcla, al 4% en capas intermedias y al 3,5% en capas de base.

#### 2.6.2.4. Variabilidad del RAP

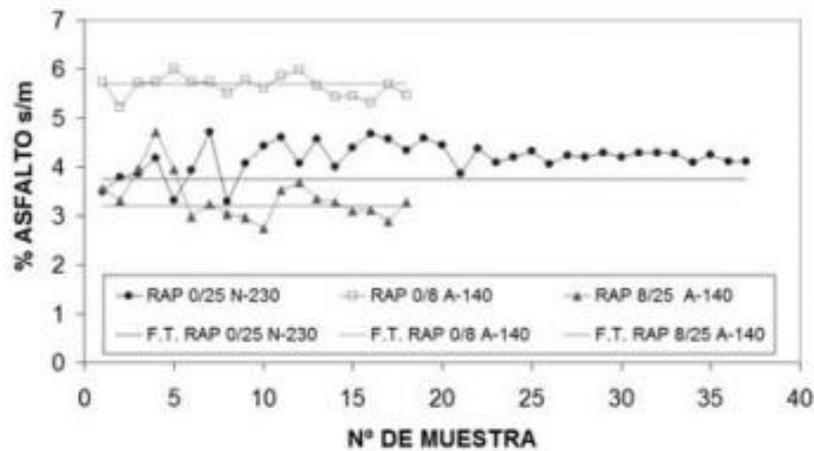
Cabe mencionar que las propiedades del RAP dependen de factores como el tipo de mezcla asfáltica del que proviene, la metodología empleada en su extracción, la capa de pavimento del que se extrajo y el proyecto del que proviene. Estos factores generan una heterogeneidad en el material, implicando variaciones en cuanto a la calidad de los áridos y contenido de ligante adherido, lo cual puede influir en la homogeneidad de la mezcla final que se desea fabricar.

En el marco del proyecto Fénix “Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles”, desarrollado en España en 2007, se realizó un estudio que pretendía determinar la variabilidad existente en los acopios de RAP y sus posibles causas de heterogeneidad, determinar la variabilidad existente en las propiedades de las mezclas fabricadas en planta en caliente que contengan altas tasas de RAP y determinar la influencia del RAP en las propiedades de las mezclas que contienen altas tasas de material reciclado.

Se emplearon 3 proyectos de distintos tramos de carretera donde se habían realizado tareas de conservación con RAP:

- La N-230 ubicada en Lérida donde se realizó un proceso de cribado en los 40 mm del RAP previo a su utilización.
- La autovía A-7 ubicada en Murcia donde se realizó un proceso de cribado, homogenización y secado del RAP previo a su utilización.
- La carretera A-140 ubicada en Huesca donde se utilizaron dos fracciones del RAP en el proceso de fabricación.

Los resultados de extracción de asfalto del material reciclado RAP (fig. 2.14) muestran una cierta dispersión, pero siempre fluctuando en torno al contenido considerado en la fórmula de trabajo.



**Figura 2. 14.** Contenido de asfalto en el material reciclado RAP en tramos de carretera distintos (Fuente: Pérez F, et al., 2008).

Al analizar las variaciones granulométricas obtenidas del RAP se confirmó lo señalado por Don Brock, que al trabajar con más de una fracción de RAP en la fabricación de mezclas recicladas se reduce la variabilidad del material en relación al contenido de asfalto y granulometría (Don Brock J. et al., 2007).

En las mezclas recicladas analizadas en el proyecto Fénix (Pérez F. et al., 2008) existía una variabilidad general en las granulometrías efectuadas, sobre todo en los tamaños de los tamices 4, 8 y 12,5 mm UNE, no así en los tamaños menores, cuyas variaciones respecto a la fórmula de trabajo eran similares a las mezclas convencionales. Además se verificó que el proceso de homogeneizado y secado del RAP y la utilización en mayor cantidad de su fracción más fina de 0/8 mm, ayuda a reducir la variabilidad granulométrica en la mezcla final y las variabilidades existentes no se reflejan en variabilidades significativas en las propiedades volumétricas y mecánicas obtenidas por el ensayo Marshall. Si es cierto, que se manifiesta una tendencia a incrementar la variabilidad en el contenido de asfalto a medida que se incrementa el porcentaje de RAP en la mezcla.

Para obtener más información acerca de la variabilidad en Mezclas asfálticas en caliente fabricadas con altas tasas de material asfáltico reciclable (RAP) puede consultarse este estudio, titulado “*Variability Study of Hot-Mix Asphalt with High Rates of Reclaimed Asphalt Pavement*” (Pérez F. et al., 2008).

#### 2.6.2.5. Elección del ligante hidrocarbonado en mezclas recicladas

Debido a que la calidad del material fresado es muy importante para el proceso de reciclado, propiedades como el contenido y características del betún recuperado han sido evaluadas en distintos estudios para poder desarrollar o adaptar los ligantes hidrocarbonados a las técnicas de reciclado.

Una etapa del proyecto de investigación PARAMIX, en el cual participaron cinco países europeos: España, Alemania, Suecia, Italia y Bélgica se centró en el desarrollo de betunes para mejorar la resistencia mecánica de la mezcla cuando se utilizaban elevados porcentajes de RAP (Pérez F. et al, 2004).

Los ensayos de caracterización se realizaron, en España y Suecia, para tres tipos de mezclas según las especificaciones Españolas. Se estudio una mezcla discontinua de tipo F10, una mezcla densa tipo S20 y una mezcla de alto módulo tipo MAM. Para la mezcla F10 se emplearon dos porcentajes de material reciclado 10 y 30% mientras que para la mezcla S20 y MAM se emplearon los porcentajes del 30 y del 50%. El RAP provenía del mismo tipo de mezcla al que se iba a incorporar debido a que en el caso de la mezcla F10 se aseguraba que fuera árido granítico que es el único que permite la norma en este tipo de mezclas. Estas mezclas fueron sometidas a tres ensayos distintos: la compactación giratoria para evaluar la compactabilidad de la mezcla, el ensayo de tracción directa y el ensayo de pista.

Se investigó el empleo de betunes modificados con polímeros en las mezclas recicladas en planta en caliente tipo F10 y se observó un incremento de la tenacidad y una mejora de su comportamiento a la fatiga, al mismo tiempo que limitaba su deformación plástica por exceso de ligante. Además, se utilizaron betunes de penetración, más blandos, para regenerar el betún envejecido de la mezcla densa. Estos betunes se fabricaban a medida en función de las características del betún viejo. En ambos tipos de betún también se analizó el efecto de los agentes rejuvenecedores en las propiedades finales de la mezcla. No se observaron grandes diferencias entre el uso y no uso de agente rejuvenecedor.

#### 2.6.2.6. *Uso de mezclas recicladas con RAP en capas de rodadura*

Históricamente algunos países no han permitido el uso de RAP en capa de rodadura. Existen dos problemas directamente relacionados con el hecho de que el RAP es un material que proviene del fresado o demolición de firmes en mal estado, con una vida elevada y que pueden contener distintos tipos de agregados, ligantes, parches o sellos. El que más preocupa a los países, es la resistencia al deslizamiento cuando no se conoce la procedencia y, en consecuencia, las características del material reciclado. Y el segundo problema consiste en la posibilidad de usar demasiado contenido de RAP o que este sea demasiado duro y pueda endurecer la capa de rodadura haciéndola mucho más susceptible a la fisuración. Estas preocupaciones pierden valor cuando el material está bien tratado y almacenado debido a que disminuye la variabilidad del RAP.

El adecuado procesamiento y almacenamiento del material reciclado se ha debatido ampliamente en diversas publicaciones de la Asociación Nacional del Pavimento Asfáltico (National Asphalt Pavement Association, 2007) (Newcomb, D. E, E.R. Brown, and J.A. Epps, 2007).

Mucinis et al. (Mucinis D. et al., 2008) presentaron un estudio en el año 2008 en el cual describen el empleo de material fresado de pavimentos "RAP" en Lituania. En este estudio se describe principalmente la experiencia de la república de Lituania en mezclas bituminosas con la incorporación de RAP y cuáles son los requerimientos que se le exigen. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ilustran las exigencias en Lituania a mezclas bituminosas para capas de rodadura fabricadas con RAP en su composición.

Index	Wearing course	
	Pavement structure class	
	VI	IV-V
The size of RAP and added mineral material particles	0/11, 0/16 <sup>1</sup>	
Void content %	4-12	4-12
Stability according to Marshall 25°C, kN	>5	>8
Stiffness modulus, MPa		
Indirect tensile strength, after 7 days of curing, kPa		>300
Water sensitivity, %	>50	>70
<sup>1</sup> it should meet the requirements set for granulometric composition and 90 % (or more) of material should pass through the upper set of sieve		

**Tabla 2. 16.** Especificaciones para mezclas bituminosas empleadas en capa de rodadura en Lituania (Fuente: Mucinis D. et al., 2008).

En 2009 Clara Celauro y Bernardo Celauro realizaron un estudio sobre mezclas bituminosas recicladas con hasta un 50% de RAP e intentaron encontrar unas altas características mecánicas y estructurales en comparación con mezclas convencionales. Se trataba de mezclas densas y gruesas, que no se corresponden con la tipología de mezcla estudiada en esta campaña experimental, pero que resulta interesante presentar este estudio porque no se ha investigado demasiado sobre el empleo de mezclas recicladas en capa de rodadura. Además, puede ser útil para estudiar las diferencias entre propiedades mecánicas de mezclas densas recicladas y mezclas discontinuas recicladas.

Todas las mezclas fueron sometidas a distintos ensayos: compactación mediante SGC “*Shear Gyrotory Compactor*”, ensayo Marshall, Tracción Indirecta, ensayo Cántabro, test de fatiga “*dynamic test for fatigue resistance*” y ensayo de pista “*Wheel Tracking*”.

Para capa de rodadura se fabricaron dos tipos de mezclas, U3 y U5, que se emplearían en capas de 3 cm de espesor y 5 cm respectivamente. En la figura 2.15 se observa como las mezclas empleadas son de granulometría continua.

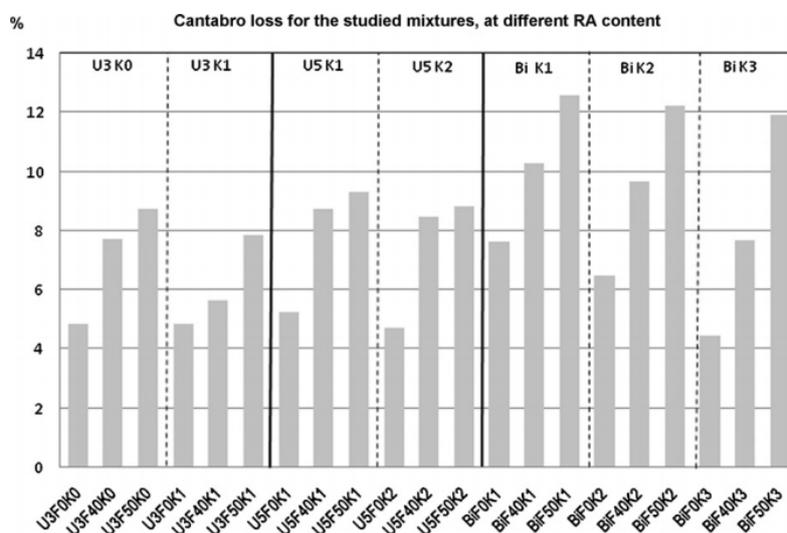
Composition of the mixtures studied and related typical laying thicknesses.

Riddle or sieve	Nominal sizes (mm)	Mixture U3	Mixture U5
Riddle 40	32	100	100
Riddle 30	24	100	100
Riddle 25	20	100	100
Riddle 15	12	100	100
Riddle 10	8	96	
Sieve 5.6	5.6		93
Riddle 5	4	61	
Sieve 2	2	35	56
Sieve 1	1		33
Sieve 0.5	0.5		
Sieve 0.4	0.4	14	
Sieve 0.18	0.18	11	13
Sieve 0.074	0.074	9	11
Sieve 0.063	0.063		8
Bitumen content $b\%$ (richness modulus, $K$ )		$b_0 = 5.17$ ( $K_0 = 3.25$ ), $b_1 = 5.57$ ( $K_1 = 3.50$ ), $b_2 = 6.03$ ( $K_2 = 3.75$ )	$b_1 = 5.03$ ( $K_1 = 3.25$ ), $b_2 = 5.55$ ( $K_2 = 3.50$ )
Typical laying thickness (mm)		25-35	35-50

**Figura 2. 15.** Granulometría de las mezclas empleadas en capa de rodadura (Fuente: Celauro C. et al., 2009).

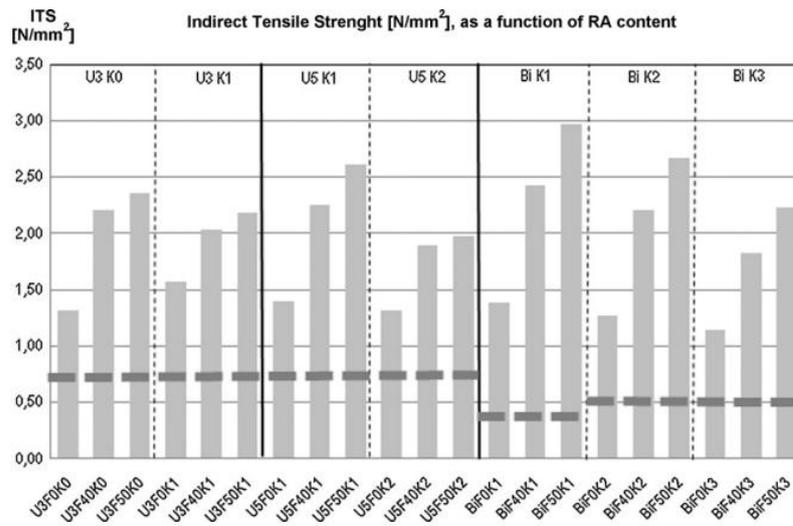
Los contenidos de betún se escogieron dentro del rango marcado por la norma italiana, respetando el mínimo recomendado por la Normativa Suiza. Se emplearon como porcentajes de RAP un 0% para la muestra patrón, un 40 y un 50%.

El ensayo Cántabro mostró una tendencia al empeoramiento de la cohesión interna a medida que se incrementaba la presencia de RAP en la mezcla, así como una disminución de las pérdidas a medida que se incrementaba el contenido de betún (fig. 2.16).



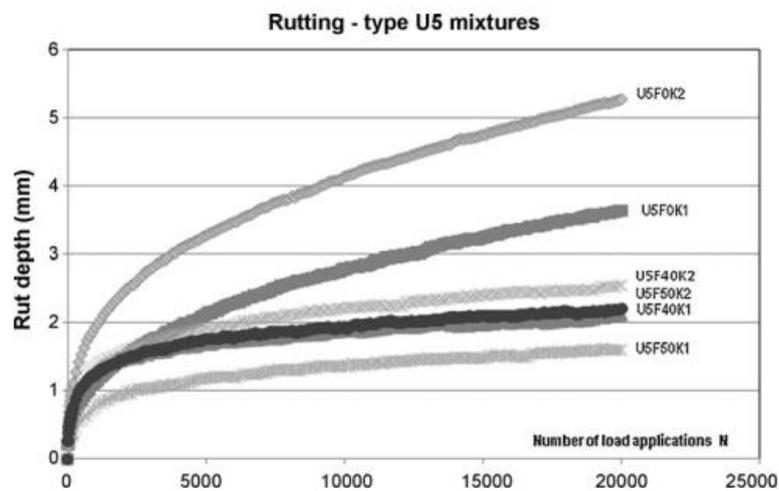
**Figura 2. 16.** Pérdidas de desgaste (%) en el ensayo Cántabro (Fuente: Celauro C. et al., 2009).

El ensayo de tracción indirecta mostró un incremento de la resistencia a tracción a medida que aumentaba el contenido de RAP y disminuía al incrementarse el contenido de ligante (fig.2.17). A mayor cantidad de RAP mayor rigidez presentaba la mezcla.



**Figura 2. 17.** Resistencia a la tracción Indirecta en mezclas densas aplicadas en capa de rodadura (Fuente: Celauro C. et al., 2009).

Las deformaciones plásticas mejoraron a medida que la mezcla presentaba mayores contenidos de material reciclado, pero empeoraba con el incremento del contenido de ligante (fig. 2.18).



**Figura 2. 18.** Resultados de las deformaciones permanentes que presentan las mezclas densas en capa de rodadura (Celauro C. et al., 2009).

Los ensayos de caracterización mecánica llevados a cabo en este estudio mostraron que hasta un contenido muy elevado de material reciclado (mayor al 50%) es posible cumplir con las especificaciones Italianas para mezclas bituminosas para ser utilizadas en capa de rodadura con una intensidad de tráfico elevada para climas cálidos (Celauro C. et al., 2009).

En el año 2002 se realizó en España un estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo BTB “Barcelona Tracción Directa” (Lorenzo A., 2002).

No se trata del mismo tipo de microaglomerado analizado en la presente tesina. En esta ocasión se estudiaron mezclas tipo F8 con porcentajes de RAP del 10 al 30%. Se analizó también el efecto del contenido de betún y la utilización de un agente rejuvenecedor sobre la capacidad de restituir las características iniciales del betún envejecido. Además del ensayo BTD para caracterizar este tipo de mezclas, se empleó, el ensayo Marshall y el ensayo de pista.

En el estudio se cumplieron las especificaciones establecidas para mezclas convencionales para ambos contenidos de material reciclado.

Se observó que la presencia de RAP rigidiza la mezcla disminuyendo la deformación de fisuración. El incremento de ligante proporciona flexibilidad a la mezcla con una zona de deformaciones plásticas mayores. Se obtuvieron unas deformaciones plásticas mayores para un 10% de RAP en mezcla sin agente rejuvenecedor que para un 30% de RAP con agente rejuvenecedor. La presencia del agente rejuvenecedor hace disminuir la resistencia a tracción de la mezcla y aumentar la energía específica.

## **2.7. Conclusiones**

Aunque la utilización de mezclas recicladas en capas de rodadura es muy limitada - sólo en tramos experimentales-, algunas experiencias han puesto de manifiesto que es posible utilizar mezclas con RAP procedente de otras capas de rodadura, especialmente de capas de rodadura drenantes, con comportamientos similares a los de las mezclas discontinuas convencionales.

Por tanto, parece posible diseñar mezclas discontinuas de altas prestaciones para capas de rodadura que incorporen residuos como polvo de neumático procedente de NFU y material reciclado (RAP) procedente de otras capas de rodadura. Se disminuiría así el impacto medioambiental de estas mezclas, a la vez que se mantendrían las características mecánicas y funcionales de los pavimentos con ellas construidos. Sin embargo, es necesario, profundizar en el estudio de este tipo de mezclas, sobretodo en cuanto a las características y contenidos en que pueden utilizarse estos componentes y su efecto sobre las propiedades de estas mezclas, así como estudiar la posibilidad de fabricarlas a menor temperatura que las mezclas convencionales, con objeto reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases a la atmósfera.



### 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Introducción

En este apartado se explica el procedimiento seguido en la fabricación de probetas de mezcla bituminosa discontinua y la metodología seguida en cada uno de los ensayos realizados. Estos ensayos se realizan en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Todos los trabajos de laboratorio son supervisados por los técnicos del laboratorio para asegurar una correcta ejecución y manipulación de los materiales y equipos.

El objetivo que se persigue en este estudio es determinar la influencia del contenido de RAP y porcentaje de betún sobre las propiedades mecánicas de las mezclas discontinuas en caliente, más concretamente las mezclas BBTM11B, que son utilizadas en capa de rodadura.

#### 3.2. Plan de Trabajo

Se decide que se emplearán 3 porcentajes de betún, 4,75, 5,25 y 5,75% sobre mezcla. A la vez se fabrican cuatro tipos de mezcla BBTM11B con distintos porcentajes de material reciclado (RAP) a las cuales se aplican los distintos porcentajes de ligante. Estas mezclas son:

- FTP-0% RAP “Mezcla Patrón.”
- FT1-10% RAP “Mezcla con el 10% de RAP”
- FT1-20% RAP “Mezcla con el 20% de RAP”
- FT1-40% RAP “Mezcla con el 40% de RAP”

Para cada tipo de mezcla (4) se fabrican 3 series de 15 probetas. La serie I con un 4,75% de betún, la serie II con un 5,25% de betún y la serie III con un 5,75% de betún, es decir, se fabrican un total de 180 probetas.

De cada serie de 15 probetas se emplean 6 probetas para el ensayo de Tracción Indirecta, 6 probetas para el ensayo Cántabro, 2 probetas para el ensayo Fénix y una probeta para determinar la densidad máxima de la mezcla.

Finalmente, se determina el contenido óptimo de betún gracias al análisis de los resultados del estudio experimental y se fabrican 8 placas, 2 para cada porcentaje de RAP y se someten al ensayo de Pista para evaluar su deformación plástica.

La distribución del número de probetas en los distintos ensayos queda claramente reflejada en la tabla 3.1.

Tipo de Mezcla	Cántabro		Tracción Indirecta		Fénix	Densidad Máxima	Pista
	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo			
FTP-0%RAP	9	9	9	9	6	3	2
FT1-10%RAP	9	9	9	9	6	3	2
FT1-20%RAP	9	9	9	9	6	3	2
FT1-40%RAP	9	9	9	9	6	3	2

Tabla 3. 1. Distribución de las probetas fabricadas en los distintos ensayos.

### 3.3. Materiales empleados

Una mezcla bituminosa está formada por una fase sólida compuesta por áridos y filler y una fase de consistencia variable llamada betún que es de origen petroquímico. En las mezclas recicladas una parte del árido virgen y del betún de nueva aportación es substituida por material reciclado RAP que contiene betún envejecido. Para poder analizar las propiedades mecánicas de la mezcla es necesario conocer la procedencia y algunas características de los materiales que la forman.

#### 3.3.1. Áridos

Se utilizan dos tipologías distintas de árido, granítica y calcárea, procedentes de la Pedrera del Ordal.

El árido granítico constituye las fracciones gruesas de la mezcla de 5/12 mm y presenta una densidad relativa de 2,800 g/cm<sup>3</sup>, mientras que el árido calizo constituye las fracciones más finas de 0/2 mm y su densidad relativa es 2,669 g/cm<sup>3</sup>.

El filler empleado es filler de aportación de naturaleza calcárea.

### 3.3.2. Betún

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares PG-3, y más concretamente su artículo 543, nos fija emplear un betún modificado BM-3c en mezclas discontinuas en caliente para capa de rodadura cuando éstas se sometan a las categorías de tráfico T00, T0 y T1. Por lo tanto para la fabricación de las mezclas BBTM11B en el laboratorio se emplea este betún modificado.

Los porcentajes de betún utilizados son 4,75, 5,25 y 5,75% sobre mezcla; estos porcentajes incluyen el betún de nueva aportación (BM-3c) y el betún que contiene el RAP.

Las características del Betún BM-3c que se adjuntan en la tabla 3.2, cumplen las especificaciones del artículo 211 del PG-3.

Características	BM-3c
Punto de penetración (1/10 mm)	56
Punto de Reblandecimiento, A y B (°C)	67,2
Índice de Penetración	2,7
Punto de Fragilidad Fraass (°C)	-17
Recuperación elástica (%)	76
Residuo TFOT	
Variación en masa (%)	-0,24
Penetración retenida (1/10mm)	59
Aumento Punto de Reblandecimiento (°C)	8,4

Tabla 3. 2. Características del betún BM-3c.

### 3.3.3. Material reciclado RAP

El material reciclado utilizado procede de la empresa Asfaltos Augusta ubicada en Terrassa. Aunque se conoce la procedencia del material, no se conoce a priori ni la composición ni el porcentaje de betún que contiene la mezcla. Mediante la Norma NLT-164 se determina el contenido de ligante de la mezcla de RAP.

El ensayo consiste en el tratamiento en frío de la mezcla con un disolvente durante unas 8 horas. Gracias al empleo de un extractor centrífugo se separa la solución (disolvente más ligante) de los áridos. El contenido de ligante se calcula por diferencia entre la masa inicial de la mezcla y la masa final de los áridos una vez secos. Mediante este procedimiento se determina que el RAP presenta un 5% de betún sobre árido.

La granulometría del RAP se define en la tabla 3.3.

TAMIZ UNE	16	12,5	8	4	2	0,5	0,063
RAP (%pasa)	100	98,8	77,9	46,4	33,6	19,4	8,6

Tabla 3. 3. Granulometría del RAP.

### 3.4. Fórmulas de trabajo

#### 3.4.1. Granulometrías

La mezcla bituminosa utilizada en este estudio es del tipo BBTM 11B, con una granulometría de tipo discontinuo que cumple el siguiente huso granulométrico:

HUSO GRANULOMÉTRICO									
TAMIZ UNE	22	16	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
% pasa	-	100	90-100	60-80	-	17-27	15-25	8-16	4-6

Tabla 3. 4. Huso granulométrico para mezclas BBTM11B.

Se caracterizan porque la fracción de árido que pasa por el tamiz de 4 mm de la UNE-EN 933-2 y es retenida por el tamiz 2 mm de la UNE-EN 933-2, será inferior al ocho por ciento (8%).

La granulometría de los áridos contenidos en el material reciclado conjuntamente con la granulometría del árido virgen forman la granulometría para la mezcla bituminosa BBTM 11B reciclada. A continuación, en las tablas 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 se presentan las granulometrías para los distintos porcentajes de uso de material reciclado. Estas granulometrías deben ajustarse al huso granulométrico de la mezcla BBTM 11B presentado en la tabla 3.4; este hecho queda representado en la figura 3.1.

FTP							BBTM 11B
	Filler	0/2 CAL	5/12 Gran	Árido Virgen	RAP		
<b>TAMAÑO</b>							
<b>TAMIZ UNE</b>	<b>HUSO BBTM 11B</b>	<b>4%</b>	<b>17%</b>	<b>79%</b>	<b>100%</b>	<b>0%</b>	<b>0% RAP</b>
<b>16</b>	100	100	100	100	100	100	<b>100</b>
<b>12,5</b>	90	100	100	100	98,8	99,1	<b>99,1</b>
<b>8</b>	60	80	100	100	47,9	58,9	<b>58,9</b>
<b>4</b>	17	27	100	97,4	0,3	20,8	<b>20,8</b>
<b>2</b>	15	25	100	83,8	0	18,2	<b>18,2</b>
<b>0,5</b>	8	16	100	33,6	0	9,7	<b>9,7</b>
<b>0,063</b>	4	6	100	5,3	0	4,9	<b>4,9</b>

Tabla 3. 5. Granulometría de trabajo FTP para la mezcla BBTM11B con 0%RAP.

La fórmula de trabajo FTP no presenta material reciclado en su composición. Se fabrica esta mezcla porque al ensayarla podremos determinar las características mecánicas de una mezcla discontinua convencional de tipo BBTM 11B y nos servirá de referencia para evaluar el comportamiento de las mezclas que presentan altos contenidos de RAP.

A medida que la presencia de RAP en la mezcla aumenta se incrementará ligeramente el porcentaje de árido virgen grueso (tipo granítico) debido a que la granulometría del RAP contiene mayores finos.

FT1-10% RAP		Filler	0/2 CAL	5/12 Gran	Árido Virgen	RAP	BBTM 11B
TAMAÑO TAMIZ UNE	HUSO BBTM 11B	3,5%	16%	80,5%	90%	10%	10% RAP
16	100	100	100	100	100	100	100
12,5	90	100	100	98,8	99,0	98,8	99,0
8	60	80	100	47,9	58,1	77,9	60,0
4	17	27	100	97,4	0,3	19,3	22,0
2	15	25	100	83,8	0	16,9	18,6
0,5	8	16	100	33,6	0	8,9	9,9
0,063	4	6	100	5,3	0	4,3	4,8

Tabla 3. 6. Granulometría de trabajo FT1-10%RAP para la mezcla BBTM11B con 10%RAP.

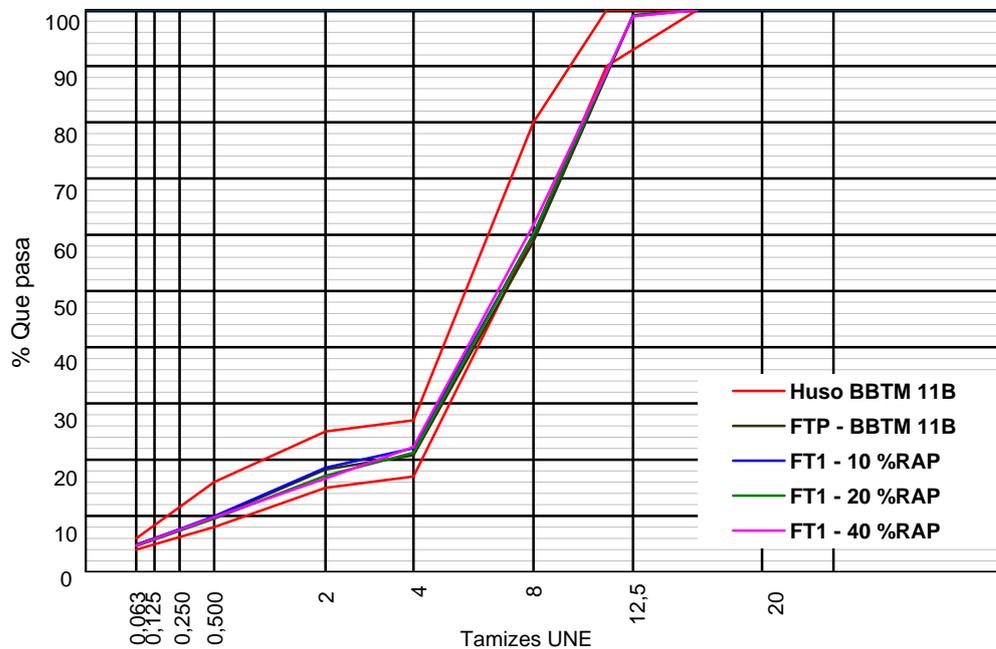
FT1-20% RAP		Filler	0/2 CAL	5/12 Gran	Árido Virgen	RAP	BBTM 11B
TAMAÑO TAMIZ UNE	HUSO BBTM 11B	3%	12%	85%	80%	20%	20% RAP
16	100	100	100	100	100	100	100
12,5	90	100	100	98,8	99,0	98,8	98,9
8	60	80	100	47,9	55,7	77,9	60,2
4	17	27	100	97,4	0,3	14,9	21,2
2	15	25	100	83,8	0	13,1	17,2
0,5	8	16	100	33,6	0	7,0	9,5
0,063	4	6	100	5,3	0	3,6	4,6

Tabla 3. 7. Granulometría de trabajo FT1-20%RAP para la mezcla BBTM11B con 20%RAP.

FT1-40% RAP		Filler	0/2 CAL	5/12 Gran	Árido Virgen	RAP	BBTM 11B
TAMAÑO TAMIZ UNE	HUSO BBTM 11B	2%	4%	94%	60%	40%	40% RAP
16	100	100	100	100	100	100	100
12,5	90	100	100	98,8	98,9	98,8	98,8
8	60	80	100	47,9	51,0	77,9	61,8
4	17	27	100	97,4	0,3	6,2	22,3
2	15	25	100	83,8	0	5,4	16,6
0,5	8	16	100	33,6	0	3,3	9,8
0,063	4	6	100	5,3	0	2,2	4,8

**Tabla 3. 8.** Granulometría de trabajo FT1-40%RAP para la mezcla BBTM11B con 40%RAP.

A continuación se muestran las curvas granulométricas correspondientes a las distintas fórmulas de trabajo empleadas (fig. 3.1). Se puede observar que las granulometrías se han aproximado lo máximo posible al menor porcentaje de árido que pasa por el tamiz en las fracciones mayores de los áridos de forma que la presencia de finos en la mezcla sea menor y el porcentaje de huecos mayor.



**Figura 3. 1.** Curvas granulométricas de las distintas mezclas empleadas en la campaña experimental.

### 3.4.2. Porcentajes de betún y áridos empleados

Para cada mezcla BBTM 11B con distinto porcentaje de RAP la tabla 3.9 muestra de forma esquemática el contenido de áridos y el contenido de betún de nueva aportación de cada una de las probetas de 1100 gramos que se fabrican. Para un mismo contenido de betún, a medida que el porcentaje de RAP en mezcla se incrementa, añadiremos menos betún de nueva aportación debido a que el RAP ya contiene un 5% de betún s.a.

	FTP		FT1-10% RAP	
	Porcentaje s.a	Peso (g)	Porcentaje s.a	Peso (g)
<b>ÁRIDO VIRGEN</b>	100%	1100 g	90%	990 g
<b>RAP</b>	0%	0 g	10%	110 g
<b>BETÚN</b>	4,98%	54,78 g	4,48%	49,28 g
	5,54%	60,94 g	5,04%	55,44 g
	6,10%	67,10 g	5,60%	61,60 g
	FT1-20% RAP		FT1-40% RAP	
	Porcentaje s.a	Peso (g)	Porcentaje s.a	Peso (g)
<b>ÁRIDO VIRGEN</b>	80%	880 g	60%	660 g
<b>RAP</b>	20%	220 g	40%	440 g
<b>BETÚN</b>	3,98%	43,78 g	2,98%	32,78 g
	4,54%	49,94 g	3,54%	38,94 g
	5,10%	56,10 g	4,10%	45,10 g

Tabla 3. 9. Contenidos de árido virgen, árido reciclado y betún de nueva aportación en la mezcla.

## 3.5. Fabricación de las mezclas

### 3.5.1. Preparación de los áridos

La preparación de los áridos se inicia con un tamizado mediante los tamices UNE; los áridos quedarán separados en las siguientes fracciones: 8, 4, 2, 0'5 y 0'063 (fig. 3.2).

El árido retenido en el tamiz 0,063 se somete a un proceso de limpieza con agua mediante la ayuda de un tamiz para poder eliminar el filler que contenga.

Para la fabricación de las probetas se pesa cada fracción de árido de tal manera que quedará depositada en bandejas para ser posteriormente mezcladas con el ligante correspondiente.



**Figura 3. 2.** Fracciones del árido del proyecto OASIS II.

Siguiendo la granulometría de cada fórmula de trabajo se calculan los gramos de cada fracción de árido en la mezcla final de 1100 g. Mediante el peso acumulado en cada tamaño de árido y una balanza de precisión  $\pm 0.1$ g se preparan 15 bandejas metálicas para cada una de las tres series (según el %Betún) y tipo de mezcla en función del porcentaje de material reciclado. Se empieza a pesar del árido más grueso (tamiz UNE 12'5) al más fino (tamiz UNE 0'063) (fig 3.3).



**Figura 3. 3.** Procedimiento de pesado para la preparación de las probetas.

Una vez pesadas las bandejas de árido se procede a pesar el material reciclado RAP. En este caso se diferencian dos fracciones de RAP el retenido por el tamiz UNE 2 y el que pasa por este tamiz (fig. 3.4). Este material se deposita en bandejas distintas a las que contienen los áridos.



**Figura 3. 4.** Material reciclado RAP clasificado en dos tamaños, “retenido por el tamiz 2 mm” (fracciones 12,5, 8, 4, 2) y “pasa por el tamiz 2 mm” (fracciones 0,5 y 0,063).

Una vez pesadas todas las bandejas, las bandejas que contienen los áridos se colocan en el horno a 165°C (24h) mientras que las de RAP se colocan a 120°C (4h) para no incrementar su envejecimiento. Se deben alcanzar estas temperaturas para evitar el enfriamiento del betún al mezclarlo con el árido y el RAP frío.

Finalmente se prepara el filler de aportación que se pesa con la misma balanza de precisión de  $\pm 0,1g$  y se almacena en vasos de plástico (fig. 3.5). Se pesa independientemente para mejorar la precisión de la pesada y porque no se introduce en la mezcla discontinua hasta el final del mezclado. El filler no deberá permanecer en el horno antes de la fabricación.



**Figura 3. 5.** Filler pesado en balanza y depositado en vasos de plástico.

### 3.5.2. Procedimiento de fabricación

Para una correcta fabricación y para mantener en todo momento la temperatura de la mezcla, se deben colocar los moldes cilíndricos, donde se colocará la mezcla, en el horno durante 12h a 160 °C, y aproximadamente entre 2 y 3 horas antes se colocará el

betún en el horno a 160°C; si estuviera más tiempo a esta temperatura se podría producir una oxidación del betún con la modificación de sus propiedades mecánicas.

Los áridos y el RAP se vierten en un recipiente metálico situado sobre una plancha a 160°C y se mezclan para que queden bien repartidos los distintos tamaños (fig. 3.6a). Posteriormente se coloca el recipiente en una balanza con precisión de  $\pm 0,1$ g, se tara y se añade la cantidad de betún necesaria según el porcentaje de ligante (fig. 3.6b y 3.6c). A continuación, se vuelve a colocar el recipiente sobre la plancha y se mezcla todo el contenido para que el betún pueda cubrir bien tanto los áridos como el material reciclado. Como último paso en el proceso de mezclado, se añade el filler (fig. 3.6d) y se sigue removiendo para obtener una mezcla homogénea.

Una vez se tiene la mezcla preparada, se comprueba que la temperatura no exceda los 160°C (fig. 3.6e), se introduce en el molde rápidamente con la ayuda de un embudo y con una espátula se le aplican 25 golpes, 20 en la periferia y 5 en la parte central, para intentar evitar la presencia de huecos y homogeneizar la mezcla (fig. 3.6f). En la parte inferior del molde cilíndrico se coloca una base metálica. Para evitar que la mezcla quede pegada al molde se untan con parafina los laterales del molde y se coloca un papel en cada una de sus bases.



**Figura 3. 6.** Proceso de fabricación. a) Áridos mezclados en un recipiente metálico sobre la plancha, b) Pesamos el betún, c) Mezcla de los áridos con el betún, d) Añadimos el Filler, e) Comprobación de la T°, f) Colocación de la mezcla en el molde

Finalmente, se coloca el molde con un collarín en la máquina de compactación y se compactan las probetas según la UNE-EN 12697-30 mediante compactador por

impacto, aplicando cincuenta golpes por cara. La probeta ya compactada se extrae de la maquina y se quitan los papeles con la ayuda de una espátula (fig. 3.7).



**Figura 3. 7.** a) Máquina de compactación por impacto, b) Probeta en la máquina de compactación, c) Probeta con el papel protector, d) Probeta fabricada antes de desmoldar

Se dejan enfriar y al día siguiente se procede a desmoldarlas; para hacerlo se utiliza un gato hidráulico que ejerce presión a la mezcla y la separa del molde.

Desde el momento que las probetas salen de la maquina compactadora deben numeradas para que estén identificadas en todo momento (fig. 3.8).



**Figura 3. 8.** Probetas desmoldadas pertenecientes a una serie determinada.

### 3.5.3. Normas consultadas

Para una correcta fabricación de las probetas se siguen distintas Partes de la Normativa Española.

UNE-EN 12697-35:2006 Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclas en Laboratorio.

UNE-EN 12697-30:2004 Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la mezcla mediante compactador de impactos.

### 3.6. Determinación de densidades y contenido de huecos

#### 3.6.1. Densidad Aparente

Una vez las probetas han sido compactadas y desmoldadas siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12697-6 se calcula su densidad aparente.

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen, incluidos los huecos de aire. Su valor se determinará por dimensiones debido a que las probetas bituminosas presentan una superficie regular y tienen forma cilíndrica que nos facilita la medición de su diámetro y espesor. Por lo tanto, es preciso conocer la masa y el volumen de la probeta. La masa se obtiene pesando la probeta seca en una balanza con precisión de  $\pm 0,1\text{g}$  y el volumen se obtiene midiendo las dimensiones de la probeta.

Para obtener la altura media de la probeta se realizan 3 mediciones en posiciones uniformemente espaciadas a lo largo del perímetro de ésta. Las mediciones se realizan con un pie de rey con precisión de  $\pm 0,1\text{mm}$ .



**Figura 3. 9.** a) Pie de Rey b) Medición de la altura de la probeta mediante pie de rey.

El diámetro de las probetas proporcionado por el molde de compactación es de 101,6mm.

Finalmente la densidad aparente por dimensiones se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{h_m * \pi * \frac{\phi^2}{4}} \quad (3.1)$$

Donde:

$\rho_{ap}$  Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

$h_m$  Altura media (cm)

$\emptyset$  Diámetro de la probeta (cm)

En el cálculo de la densidad mediante este ensayo se consideran los huecos de la textura superficial como parte de los huecos internos; este hecho puede provocar una subestimación de la densidad aparente o una sobreestimación del nivel de huecos de aire. Se considera correcto este procedimiento porque estos huecos de la superficie son una parte intrínseca de la mezcla bituminosa.

### 3.6.2. Densidad Máxima

La densidad máxima se define como la masa por unidad de volumen, sin incluir los huecos de aire, de un material bituminoso a una temperatura de ensayo conocida. Se sigue la Norma Europea UNE-EN 12697-5 para obtener su valor.

Existen tres procedimientos para calcularla, procedimiento volumétrico, hidrostático y matemático. En nuestro caso se obtiene mediante procedimiento matemático a partir de su composición (contenido de ligante, contenido de árido y contenido de RAP) y de las densidades de las mezclas constituyentes. En el laboratorio también se ha realizado mediante procedimiento volumétrico, pero los resultados no son muy fiables debido al uso de RAP.

Para obtener la densidad máxima matemáticamente se expresa la composición de la mezcla en porcentajes de la mezcla total y se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{(p_a/\rho_a)+(p_{RAP}/\rho_{RAP})+(p_b/\rho_b)} \quad (3.2)$$

Donde:

$\rho_{mc}$  es la densidad máxima de la mezcla (Kg/m<sup>3</sup>) con aproximación a 1Kg/m<sup>3</sup>

$p_x$  es el porcentaje de cada material con diferente densidad existente en la mezcla

$\rho_x$  es la densidad aparente del material (Kg/m<sup>3</sup>)

### 3.6.3. Contenido de huecos

Para calcular el contenido de huecos de aire en una probeta bituminosa se sigue la Norma Europea UNE-EN 12697-8.

Se define el contenido de huecos de aire ( $V_m$ ) como el volumen ocupado por los huecos de aire en una probeta bituminosa, expresado como un porcentaje del volumen total de la probeta.

Para calcular el contenido de huecos de aire de una probeta interviene la densidad máxima de la mezcla y la densidad aparente de la probeta.

La densidad máxima se define como la masa por unidad de volumen, sin incluir los huecos de aire, de un material bituminoso a una temperatura de ensayo conocida.

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen, incluidos los huecos de aire, de una probeta bituminosa a una temperatura de ensayo conocida.

El contenido de huecos se debe calcular, con una aproximación del 0,1% (v/v), mediante la siguiente expresión:

$$Vm = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (3.3)$$

Donde

$Vm$  es el contenido de huecos de aire en la mezcla (%)

$\rho_m$  es la densidad máxima de la mezcla ( $\text{Kg/m}^3$ )

$\rho_b$  es la densidad aparente de la probeta ( $\text{Kg/m}^3$ )

Para calcular la densidad aparente de cada probeta se sigue el procedimiento descrito en el apartado 3.6.1 de la presente tesina. Y para calcular la densidad máxima se sigue el procedimiento descrito en el apartado 3.6.2.

#### 3.6.4. Normas consultadas

Para una correcta determinación de distintas propiedades mecánicas de la mezcla se seguirán distintas Partes de la Normativa Española.

UNE-EN 12697-29. Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 29: Determinación de las dimensiones de las probetas.

UNE-EN 12697-6. Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de las probetas por el método hidrostático.

UNE-EN 12697-5. Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima.

UNE-EN 12697-8. Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas.

### 3.7. Ensayos Utilizados

#### 3.7.1. Cántabro

##### 3.7.1.1. Objeto y campo de aplicación

Los pavimentos de mezcla discontinua en caliente usados en capa de rodadura se caracterizan porque deben resistir la acción abrasiva y disgregadora del tráfico y del agua. Por ello en esta tesina se propone el uso del ensayo cántabro de pérdida por desgaste para comprobar la cohesión y la adhesividad de la mezcla.

Para comprobar la adhesividad árido-ligante se realiza el ensayo Cántabro en seco y tras inmersión. El ligante bituminoso debe ser capaz de envolver a los áridos, dando cohesión a la mezcla y resistir la acción de desmenuamiento del agua.

Los criterios de aceptación de las mezclas discontinuas en caliente se establecen, tanto en seco como tras la inmersión en agua durante 24 horas a 60 °C, no debiendo superar los siguientes valores de pérdidas, establecidos en el artículo 543 del PG-3 de la Orden FOM 891/2004 no de la norma actual.

- Pérdida por abrasión en seco  $\leq 15\%$
- Pérdida por abrasión tras inmersión  $\leq 25\%$

##### 3.7.1.2. Descripción del ensayo

Es un ensayo desarrollado en 1979 por Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer en España para caracterizar las mezclas porosas en su empleo para capas de rodadura.

El ensayo consiste en colocar una probeta fabricada según las Normas Europeas UNE-EN 12697-35 y UNE-EN 12697-30 en la máquina de ensayo de Los Ángeles, pero sin carga abrasiva (bolas) y a una temperatura determinada. Las características de la máquina están definidas en la Norma UNE-EN 1097-2. En la figura 3.10 se presentan sus componentes principales.

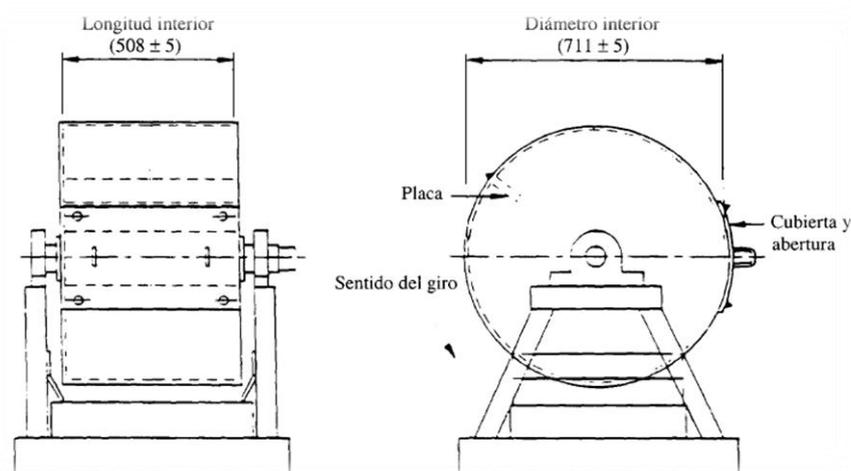


Figura 3. 10. Máquina de los Ángeles (medidas en mm) (Fuente: Miró, 1994).

Una vez la probeta está situada en el tambor de la máquina ésta empieza a dar vueltas y después de un número determinado de revoluciones se extrae de la máquina. Durante el ensayo ha ido perdiendo por desgaste parte de los áridos situados en la superficie. Se pesa la probeta antes y después del ensayo y se obtiene el valor de la pérdida por desgaste expresada en tanto por ciento del peso inicial.

Para mantener constante la temperatura de ensayo, se deberá disponer de una cámara o recinto capaz de alojar la máquina de Los Ángeles, y en la que la temperatura de ensayo pueda regularse con un error máximo de  $\pm 1$  °C.

### 3.7.1.3. Ejecución del ensayo

Se ha definido la temperatura de ensayo a 25°C, debido a su recomendación para fines de diseño. Las probetas se mantienen un mínimo de 4 horas a la temperatura de ensayo (en este caso a 25°C) antes de ser ensayadas. Se pesa en seco la probeta con una balanza con precisión de  $\pm 0,1$  gramos.

Se introduce la probeta en la máquina de Los Ángeles sin ninguna carga abrasiva y se la somete a 300 revoluciones. El tambor gira a una velocidad de 3,1 rad/s.

Se saca la probeta y se pesa con una balanza con precisión de  $\pm 0,1$  gramos.



**Figura 3. 11.** a) Temperatura del ensayo Cántabro. b) Pesada de la probeta antes del ensayo c) Máquina de los Ángeles.

La pérdida por desgaste se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Donde

P Pérdidas por desgaste (%)

$P_1$     Peso inicial de la probeta (g)

$P_2$     Peso final de la probeta (g)

Se realiza este procedimiento tanto para el grupo de probetas secas como para el grupo de probetas que han sufrido un proceso de inmersión en agua durante 24 horas a 60°C.

Para cada mezcla y contenido de betún se ensayan 6 probetas, 3 por vía seca y 3 por vía húmeda. Finalmente se saca el valor promedio de las pérdidas por desgaste de cada grupo de 3 probetas.

#### 3.7.1.4. Normas consultadas

Para una correcta ejecución del ensayo Cántabro se han seguido distintas Partes de la Normativa Española.

UNE-EN 12697-35:2006 Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclas en Laboratorio.

UNE-EN 12697-30:2004 Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la mezcla mediante compactador de impactos.

UNE-EN 12697-17 Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 17: Pérdida de partículas de una probeta de mezcla bituminosa drenante.

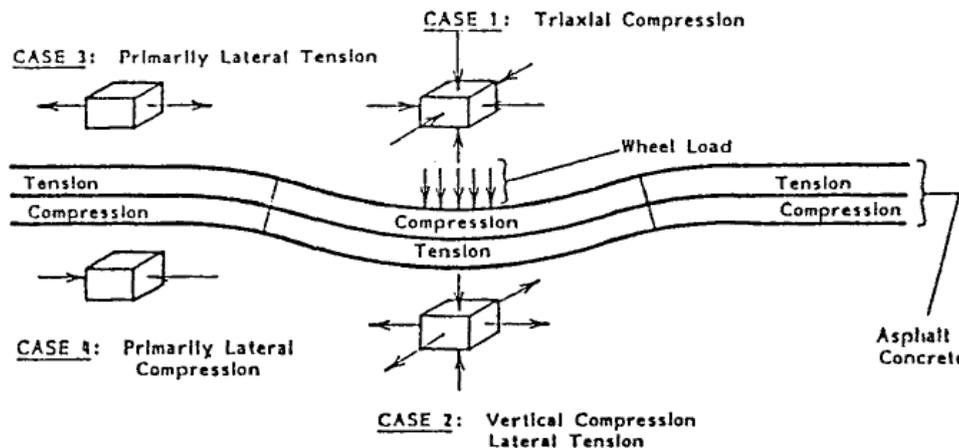
### 3.7.2. Ensayo de Tracción Indirecta

#### 3.7.2.1. Objeto y campo de aplicación

Una forma interesante de caracterizar mecánicamente una mezcla sería poder realizar un ensayo capaz de inducir a las probetas un estado de tensiones similar al que provoca una carga vertical sobre las capas del firme.

En la figura 3.12, extraída de (Martínez A, 2000), Roque y Buttlar esquematizan el estado de tensiones provocado por una carga simple en la estructura de un firme, se distinguen cuatro casos:

1. Compresión triaxial en la superficie e inmediatamente bajo la rueda.
2. Tracción longitudinal y transversal combinado con compresión vertical en la parte inferior de la capa bituminosa debajo de la rueda.
3. Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.
4. Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa bituminosa a una cierta distancia de la carga.



**Figura 3. 12.** Estado de tensiones que crea una carga vertical sobre el firme (Fuente: Martínez A, 2000)

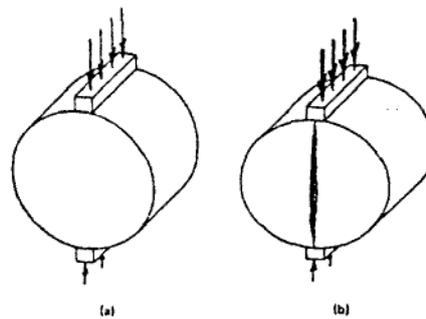
Gracias a la experiencia, se sabe que la zona más crítica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa bituminosa, bajo la carga. El ensayo de tracción indirecta reproduce este estado de tensiones.

Esta tesina propone el uso del ensayo de tracción indirecta para determinar las características necesarias de resistencia a tracción en el caso de una mezcla discontinua en caliente con altos contenidos de material reciclado RAP. Se trata de un ensayo sencillo y representativo que nos permite evaluar la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper. Además se usa para evaluar la sensibilidad a la acción del agua en mezclas asfálticas, de acuerdo a lo establecido en el PG-3, artículo 543, de la Orden Circular 24/2008.

### 3.7.2.2. Descripción del ensayo

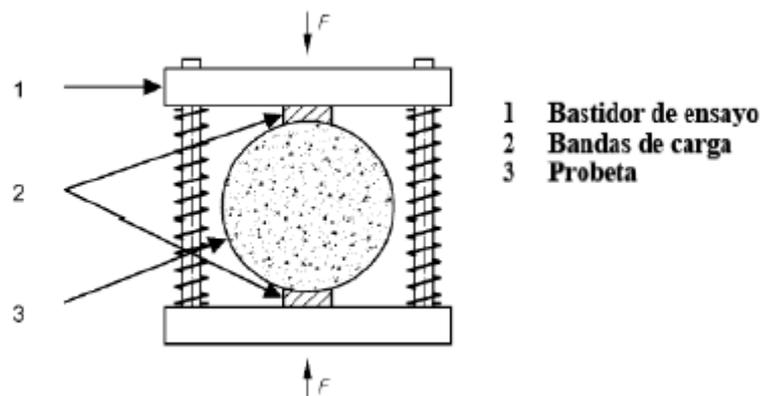
Antes de 1965 este ensayo se utilizaba para medir la resistencia a tracción del hormigón, pero a partir de este año se empezó a emplear en proyectos de investigación sobre mezclas bituminosas desarrollados en la Universidad de Texas, USA.

El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensión en la fibra inferior de una capa de mezcla bituminosa. El ensayo consiste en deformar una probeta cilíndrica por compresión diametral mediante una velocidad constante de desplazamiento. La probeta estará situada horizontalmente entre los platos de una prensa hasta que se produzca su rotura. Se realizará de tal manera los esfuerzos aplicados a la probeta se ubiquen sobre dos generatrices opuestas a lo largo de un plano diametral vertical. Esta configuración de carga provoca una tensión de tracción uniforme perpendicular a la dirección de la carga aplicada y a lo largo del plano vertical diametral, que causa el fallo de la mezcla por fractura a lo largo del diámetro vertical. Se mide la carga de rotura de la probeta. Tanto la aplicación de la carga como el fallo diametral se pueden observar en la figura 3.13. (Kennedy, Thomas W., 1977)



**Figura 3. 13.** a) Configuración de carga; b) Fallo de Tracción Indirecta (Fuente: Kennedy, Thomas W., 1977) .

Para poder cargar diametralmente a compresión la probeta se requiere de un dispositivo de sujeción, conocido como bastidor de ensayo con bandas de carga. Este bastidor cuenta con dos placas de apoyo que disponen de una superficie cóncava con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta. Estas placas de apoyo presentan una longitud mayor que el espesor de la probeta ensayada. La figura 3.14 muestra los elementos descritos anteriormente.



**Figura 3. 14.** Bastidor necesario para el ensayo de Tracción Indirecta (Fuente: UNE-EN 12697-23).

### 3.7.2.3. Ejecución del ensayo

Según la Norma Europea UNE-EN 12697-23 se define la resistencia a tracción indirecta, ITS, como la resistencia máxima a la tracción de una probeta cilíndrica sometida a carga diametral hasta su rotura, a la temperatura de ensayo especificada y a la velocidad de desplazamiento especificada de la prensa de ensayo.

La resistencia a la tracción indirecta se obtiene en función de la carga máxima aplicada cuando se produce la rotura y las dimensiones de la probeta.

Para cada fórmula de trabajo y contenido de ligante a ensayar se preparan 6 probetas, 3 se ensayarán por vía seca y 3 por vía húmeda; comparando ambas resistencias a tracción se puede analizar la sensibilidad al agua de esta mezcla.

Las probetas cilíndricas fabricadas en el laboratorio tendrán un diámetro nominal de 101,6 mm y serán compactadas mediante compactador por impacto con 50 golpes por cara.

Antes de introducir las probetas en el bastidor de ensayo se comprobará que estas sean simétricas y con una superficie curva regular.

Se deben medir las dimensiones de las probetas, altura y diámetro, de acuerdo con la Norma Europea UNE-EN 12697-29. Estas dimensiones ya están determinadas porque han sido necesarias para el cálculo de la densidad aparente. Están recogidas en el *Anejo 1: Densidades y Contenido de Huecos*.

El ensayo se ejecuta en una prensa de accionamiento hidráulico controlada de forma electrónica para medir tensiones y deformaciones que se maneja desde un ordenador con un programa informático. La prensa de ensayo nos permite la aplicación de cargas sobre las probetas de ensayo a una velocidad de deformación constante de  $50\pm 2$  mm/min.

De acuerdo a lo especificado en el PG-3, se fija a  $15^{\circ}\text{C}$  la temperatura del ensayo. Antes de ser sometidas al ensayo se debe proceder al acondicionamiento de las probetas en función de si van a ser ensayadas por vía seca o por vía húmeda.

Las probetas de vía seca se deben poner a  $15^{\circ}\text{C}$  introduciéndolas en una cámara de aire controlada mediante termostato durante al menos 5 horas.

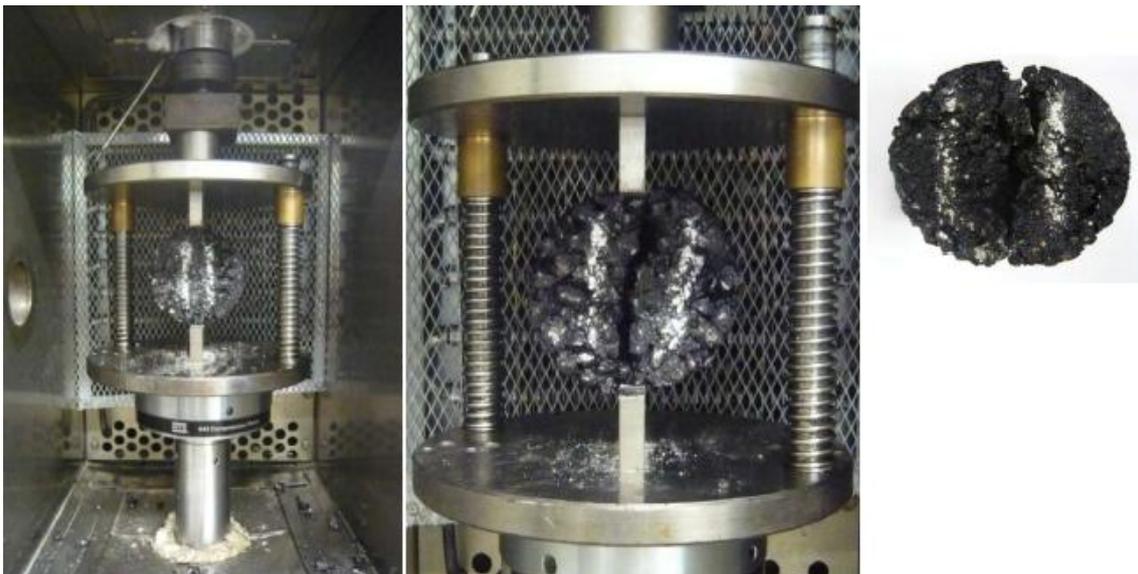
Las probetas de vía húmeda se colocan sobre un estante perforado dentro de un recipiente lleno de agua destilada hasta un nivel de 20 mm por encima de la superficie superior de las probetas. Se aplica vacío hasta obtener una presión absoluta de 50mm Hg en un periodo de tiempo de  $10\pm 1$  min. El vacío se mantiene durante  $30\pm 5$  min. Después se deja que se recupere lentamente la presión atmosférica en el recipiente de vacío (fig. 3.15a). A continuación se dejan las probetas sumergidas en el agua durante otro período de  $30\pm 5$  min. Se miden las dimensiones de las probetas y se rechazan aquellas cuyo valor haya aumentado más del 2%. Finalmente, se coloca el subconjunto de probetas húmedas en un baño de agua a  $40\pm 1$  °C durante 72 horas (fig. 3.15b). Pasadas las 72 horas se colocan en una cámara de aire controlada mediante termostato para que pierdan la humedad y alcancen la temperatura de ensayo.



**Figura 3. 15.** a) Probetas sometidas al vacío; b) Probetas a  $40^{\circ}\text{C}$  durante 72h.

La máquina de ensayo debe estar situada en una habitación cuya temperatura esté comprendida entre 15°C y 25°C.

Se toman las probetas acondicionadas y se colocan en el bastidor de ensayo, se debe alinear sobre la banda de carga inferior (fig. 3.16a). Se inicia la compresión de la probeta y se aplica la carga diametral a una velocidad constante de deformación de  $50 \pm 2$  mm/min, hasta que se alcance la carga máxima; después se continúa aplicando carga hasta que se produzca la rotura de la probeta. Una vez fuera del bastidor se debe abrir la probeta por la línea de rotura y se observa el aspecto de las superficies con objeto de determinar el estado de los áridos (fig. 3.16c).



**Figura 3. 16.** a) Prensa del Ensayo TI; b) Fallo de la probeta; c) Estado de los áridos

Para cada probeta se calcula la resistencia a tracción indirecta, ITS, aplicando la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (3.5)$$

Donde

ITS es la resistencia a tracción indirecta, (GPa)

P es la carga máxima (KN)

D es el diámetro de la probeta (mm)

H es la altura de la probeta (mm)

Se calcula el valor medio de cada tipo de mezcla y contenido de betún a partir de los valores obtenidos en los grupos de tres probetas.

Finalmente, podemos evaluar el efecto de una inmersión en agua sobre la resistencia a la tracción indirecta en probetas de mezclas bituminosas mediante la sensibilidad al agua que se expresa con el valor ITSR que según la Norma Europea UNE-EN 12697-12 se define como la relación de resistencia a la tracción indirecta calculada como el

cociente entre la resistencia a la tracción indirecta de probetas húmedas y la resistencia a la tracción indirecta de probetas secas, expresada como un porcentaje.

Se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (3.6)$$

Donde

ITSR es la razón de la resistencia a la tracción indirecta (%)

$ITS_w$  resistencia a la tracción indirecta del conjunto de probetas húmedas

$ITS_d$  resistencia a la tracción indirecta del conjunto de probetas secas

El valor mínimo exigido por el PG-3 para mezclas discontinuas tipo BBTM 11B para la sensibilidad al agua es un valor ITS<sub>R</sub> igual o superior al 90%.

#### 3.7.2.4. Normas consultadas

Para una correcta ejecución del ensayo de Tracción Indirecta se siguen distintas Partes de la Normativa Española.

UNE-EN 12697-23 Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de las probetas bituminosas.

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.

### 3.7.3. Ensayo Fénix

#### 3.7.3.1. Campo y objeto de aplicación

La fisuración de los pavimentos es una de las causas más frecuente de su deterioro. Las continuas aplicaciones de carga sobre el firme nos conducen a su deformación principalmente en la zona de rodadura. Además, en la capa de rodadura puede producirse el fallo estructural por fisuración. Éste, se produce cuando el pavimento debido a las repetidas aplicaciones de ejes de carga ha sido solicitado hasta el límite y empieza aparecer en él una fisuración en malla fina.

Los ensayos cíclicos que representan este fenómeno de deterioro son muy complejos y por este motivo no se suelen utilizar para el diseño de las mezclas asfálticas.

Por estos motivos en esta tesina se propone el ensayo Fénix para la determinación de la resistencia a la fisuración mediante el cálculo de la energía disipada en el proceso de fisuración.

Una de las principales ventajas de este ensayo es que simula el mecanismo de fisuración de las mezclas bituminosas, mediante su principal modo de propagación de

fisura, cuando son solicitadas por el medioambiente, mediante esfuerzos térmicos, y por las sollicitaciones de tráfico. Otra gran ventaja es la facilidad para realizar el ensayo, tanto a probetas Marshall como a testigos extraídos.

Además, nos permite el estudio de la tenacidad de la mezcla; si la mezcla presenta tenacidad, su rotura no se produce de forma frágil sino con una gran deformación y absorbiendo mucha energía una vez se ha iniciado el proceso de rotura. A medida que la mezcla va envejeciendo se vuelve más frágil por este motivo es interesante analizar el efecto del contenido de RAP y el porcentaje de betún sobre la resistencia y tenacidad de la mezcla.

### 3.7.3.2. Descripción del ensayo

El ensayo Fénix es un nuevo ensayo de fractura desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña que nos permite evaluar los mecanismos de fisuración de las mezclas asfálticas. Es muy sencillo, de fácil aplicación y económico.

El ensayo consiste en someter media probeta cilíndrica, con una fisura inducida de 6 mm de longitud, fabricada mediante el procedimiento Marshall, o bien, mediante el compactador giratorio, a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante a una temperatura determinada.

Mediante este ensayo se puede graficar la curva Carga-Desplazamiento mostrada en la figura 3.17.

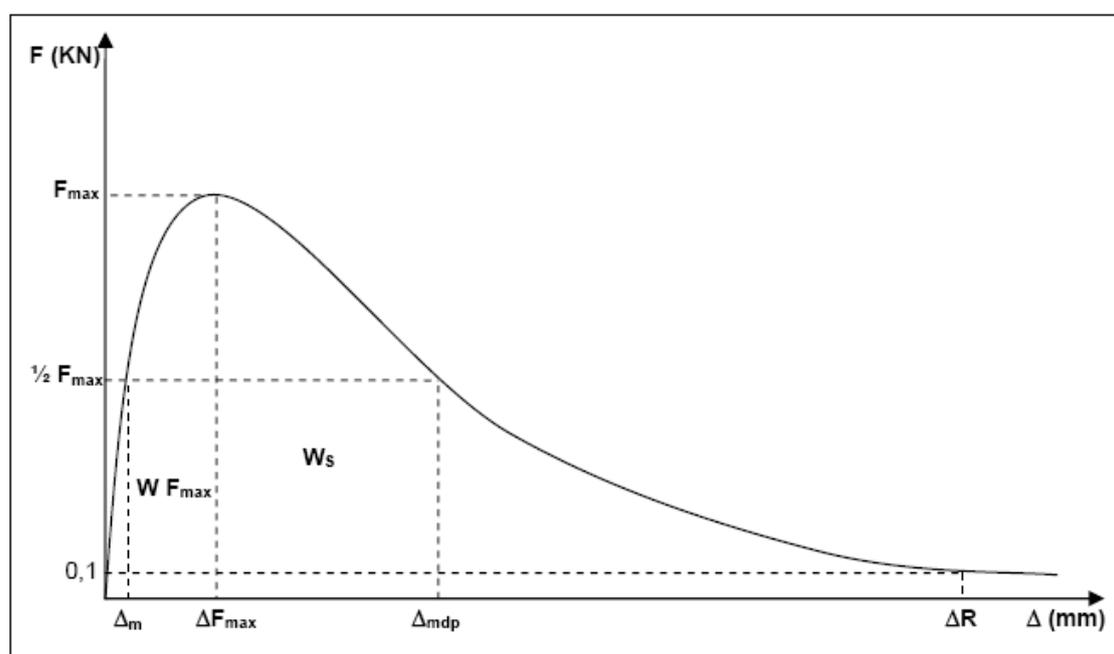


Figura 3. 17. Curva Carga-Desplazamiento resultante del ensayo Fénix.

Con los datos de cargas y desplazamientos y conociendo las medidas geométricas de la probeta es posible calcular la energía disipada en todo el proceso de fisuración, así como otros parámetros de interés que se presentan a continuación.

La **carga máxima a tracción ( $F_{max}$ )** registrada en el ensayo a tracción directa.

El **desplazamiento a carga máxima ( $\Delta F_{max}$ )** es el realizado por el pistón cuando se registra la carga máxima a tracción.

La **resistencia a tracción ( $R_T$ )** es la relación entre la carga máxima registrada,  $F_{max}$ , y el área de fractura. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_T = \frac{1000 \times F_{max}}{h \times l} \quad (3.7)$$

Donde,

$R_T$  Resistencia a tracción, (MPa)

$F_{max}$  Carga máxima a tracción (KN)

$h$  espesor de la probeta (mm).

$l$  Longitud inicial de fractura (mm).

El **desplazamiento de rotura ( $\Delta_R$ )** es aquel en el cual la carga ha caído hasta los 0,1 KN. Nos permite calcular las energías disipadas en el proceso de fractura de las mezclas, y a su vez, permite distinguir entre mezclas con iguales energías disipadas,  $G_D$ , diferenciando las más frágiles de las más dúctiles.

El **índice de rigidez a tracción ( $I_{RT}$ )** es la relación entre la mitad de la carga máxima,  $\frac{1}{2} F_{max}$ , y el desplazamiento correspondiente a ese valor de carga antes de la carga máxima,  $\Delta_m$ . A mayor índice de rigidez a tracción menos flexible es la mezcla. El índice de rigidez de tracción se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$I_{RT} = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{max}}{\Delta_m} \quad (3.8)$$

Donde,

$I_{RT}$  Índice de rigidez a tracción (KN/mm)

$F_{max}$  Carga máxima registrada (KN)

$\Delta_m$  Desplazamiento antes de la carga máxima a  $\frac{1}{2} F_{max}$  (mm).

El **desplazamiento al 50%  $F_{max}$  postpico, ( $\Delta_{mdp}$ )** es el registrado por la mezcla una vez que la carga ha caído a la mitad del valor de su carga máxima. Nos indica la capacidad que tiene la mezcla evaluada de admitir deformación, puesto que a medida que las mezclas son más dúctiles se obtienen mayores valores de  $\Delta_{mdp}$ , mientras que para mezclas más frágiles se obtienen menores valores de  $\Delta_{mdp}$ .

La **energía disipada por unidad de superficie ( $G_D$ )** es el trabajo total realizado en el proceso de fisuración,  $W_D$ , dividido entre el área de fractura, perpendicular a la fuerza aplicada. Se calcula de acuerdo a la ecuación.

$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l} \quad (3.9)$$

Donde

- $G_D$  Energía disipada por unidad de superficie en el proceso de fisuración (J/m<sup>2</sup>)
- $W_D$  Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento (KN · mm).
- $h$  Espesor de la probeta (m).
- $l$  Longitud inicial de la fractura (m).

El **índice de tenacidad (IT, (J/m<sup>2</sup>)-mm)** es la energía disipada en el periodo de relajación multiplicada por un factor de fragilidad, el cual corresponde al desplazamiento realizado desde la carga máxima,  $F_{max}$ , hasta que la carga ha caído a la mitad de su valor máximo. Este índice puede evaluar la tenacidad de la mezcla bituminosa, por tanto, a medida que este parámetro aumenta, la mezcla es más tenaz y a medida que este factor disminuye, la mezcla tiene un comportamiento más frágil. Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{h \cdot l} \cdot \Delta_{mdp} - \Delta_{F_{max}} \quad (3.10)$$

Donde

- $I_T$  Índice de tenacidad ((J/m<sup>2</sup>)-mm).
- $W_D$  Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento (KN · mm).
- $W_{F_{max}}$  Trabajo realizado hasta carga máxima (KN · mm).
- $\Delta_{F_{max}}$  Desplazamiento a Fmax (mm).
- $\Delta_{mdp}$  Desplazamiento a ½ Fmax post pico (mm).
- $h$  Espesor de la probeta (m).
- $l$  Longitud inicial de ligamento (m).

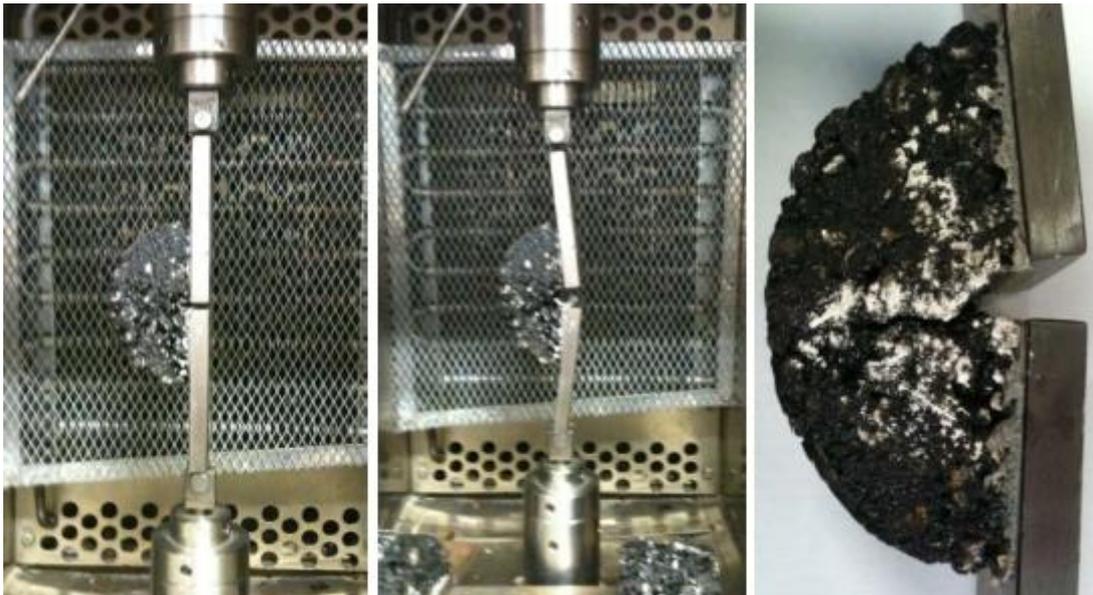
### 3.7.3.3. Ejecución del ensayo

Las dos probetas ensayadas se fabrican mediante el compactador por impacto con 50 golpes por cara. Seguidamente se divide la probeta por su parte central en dos partes y se induce una fisura de 6 mm de longitud (fig 3.18a). Se fijan mediante resina epoxi unas placas de acero a las dos secciones de cara plana separadas por la entalladura, dejando libre esta entalladura (fig 3.18b).



**Figura 3. 18.** a) Media probeta para el ensayo Fénix, b) Probeta fijada a las placas de apoyo.

Las placas de acero son fijadas a los soportes de la prensa en posición vertical y se permite el movimiento de rotación respecto a las fijaciones (fig 3.19a). Ya colocada la media probeta en la prensa se la somete a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante de 1mm/min y a una temperatura de 20°C.



**Figura 3. 19.** a) Probeta antes de ser sometida al ensayo Fénix, b) Probeta después del ensayo, c) Fallo de la probeta

Mediante un equipo de adquisición de datos se van registrando durante la ejecución del ensayo las cargas generadas en función del desplazamiento de las placas de acero y posteriormente se calcula la energía disipada en todo el proceso de fisuración.

#### 3.7.3.4. Normas consultadas

Al tratarse de un nuevo ensayo no existe una normativa de referencia pero se realizará el ensayo siguiendo las consideraciones encontradas en el estudio experimental que se llevó a cabo en su momento para el desarrollo del ensayo. Dicho documento se encuentra en la publicación IV Jornada Nacional, ASEFMA 2009.

### 3.7.4. Ensayo de Pista

#### 3.7.4.1. Objeto y campo de aplicación

Las deformaciones plásticas es otro de los tipos de deterioro que preocupa en el diseño de las mezclas bituminosas en caliente debido a su comportamiento viscoelastoplástico. El paso de cargas va produciendo una acumulación de deformaciones de tipo plástico, especialmente en condiciones de altas temperaturas o bajas velocidades. Se manifiestan mediante roderas que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de vehículos, exactamente en la zona de rodada de los vehículos pesados.

Una capa de rodadura con presencia de deformaciones plásticas se caracteriza por una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original.

Las mezclas discontinuas en caliente van a ser utilizadas en capa de rodadura y sometidas a tráfico pesado; por este motivo la presente tesina propone el ensayo de pista para poder determinar la deformabilidad de cada tipo de mezcla en función del contenido de material reciclado que la compone y el porcentaje de betún.

Este ensayo se realizará después de determinar el contenido óptimo de betún de nuestra mezcla y no se ensayarán probetas cilíndricas sino probetas paralelepípedas conocidas coloquialmente con el nombre de “placas”.

#### 3.7.4.2. Fabricación de las placas

Para la realización de este ensayo se precisan probetas de mezcla bituminosa en forma de paralelepípedo, conocidas con el nombre de placas. El proceso de fabricación es muy similar al de probetas cilíndricas pero al tratarse de una cantidad mayor de áridos se utiliza un recipiente metálico mayor, una amasadora y otro dispositivo de compactación.

Previamente se calculará la masa de mezcla bituminosa que se introduce en el molde. Esta masa se determina en función de la densidad máxima de dicha mezcla bituminosa,  $\rho_m$ , de las dimensiones interiores del molde, L y l, del espesor de la probeta, e, y del contenido de huecos, v, en la placa de mezcla bituminosa de acuerdo con la siguiente expresión:

$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_m * \left( \frac{100 - v}{100} \right) \quad (3.11)$$

Donde

M es la masa de la placa de mezcla bituminosa (Kg)

L es la longitud interior del molde (mm)

l es la anchura interior del molde (mm)

e es el espesor final de la placa (mm)

$\rho_m$  es la densidad máxima de la mezcla bituminosa (Kg/m<sup>3</sup>)

$v$  es el contenido de huecos en la placa de mezcla bituminosa (%)

La densidad máxima se habrá calculado anteriormente mediante las 14 probetas fabricadas y puede encontrarse en el *Anejo 1: Densidades y Contenido de Huecos*. Las dimensiones del molde son 300 mm de anchura interior, 400 de longitud interior y 40 mm de espesor.

La mezcla se prepara de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-35:2006+A1. El procedimiento se encuentra descrito fotográficamente en la figura 3.20 y se describe a continuación.



**Figura 3. 20.** Procedimiento de mezclado de mezclas bituminosas para placas.

Se determinan los gramos de cada fracción de árido a partir de las granulometrías y posteriormente se inicia el proceso de fabricación de la mezcla con un pesado de los áridos que se depositan en una bandeja metálica (fig. 3.20a). Tanto los áridos como la cubeta de mezclado se someten a un calentamiento hasta la temperatura de mezclado (fig. 3.20b). Se vierten los áridos en la cubeta y se añade la cantidad precisa de ligante que le corresponda (fig. 3.20d y 3.20e). Se mezclan los componentes en la cubeta de mezclado durante unos 20 segundos y a continuación se añade el filler y se prosigue la operación de mezclado hasta que el árido está completamente recubierto por el ligante.

Una vez la mezcla es homogénea se llena el molde con la masa bituminosa y se extiende cuidadosamente y uniformemente con una pala (fig. 3.21b y 3.21c). Antes de empezar la compactación se apisona la mezcla, incluidas las esquinas, para conseguir una superficie tan lisa y uniforme como sea posible.

Anteriormente el molde se ha calentado hasta la temperatura de compactación especificada durante más de 2 horas y ha sido pulverizado ligeramente con un

producto antiadherente no miscible en el ligante bituminoso, como por ejemplo, parafina.

La figura 3.21 describe fotográficamente estos últimos pasos de mezclado.



**Figura 3. 21.** . Extendido de la mezcla bituminosa en el recipiente metálico.

La compactación de la mezcla se realiza aplicando una carga mediante un rodillo de acero, haciendo pasadas a velocidad constante y paralelamente al eje de la placa. Se define pasada como el movimiento hacia delante o hacia atrás de la carga móvil. Se puede compactar con una energía controlada o hasta que se alcance un volumen determinado.

El compactador de rodillo (fig. 3.22) es el mejor método de preparación de probetas en laboratorio para fabricar las losas de mezcla bituminosa, ya que es el más parecido al proceso que se realiza in situ.

Puede aplicar cargas de hasta 30 KN sobre un ancho de 305 mm, lo que equivaldría al equipo de compactación in situ más pesado utilizado en carreteras. Se controla mediante un PLC (Programmable Logic Controller), pudiéndose seleccionar tanto el número de pasadas, como la energía de compactación. El equipo está alojado en un recinto de seguridad y no funciona a menos que las puertas de acceso estén perfectamente cerradas.

Nuestra campaña experimental compacta aplicando una carga constante y un número de pasadas determinado en 4 ciclos distintos.

La carga aplicada será incrementada pasado un número de ciclos preestablecido. Se ajusta con los cuatro reguladores de presión etiquetados como Pressure 1, Pressure 2, Pressure 3 y Pressure 4. Para cada valor de presión se determina el número de pasadas a realizar. Los utilizados en nuestra campaña se especifican en la tabla 3.10.

	Presión (bar)	Carga (KN)	Nº Pasadas
Pressure 1	1,72	8,45	20
Pressure 2	3,45	16,91	20
Pressure 3	5,17	25,37	10
Pressure 4	6,89	33,83	30

**Tabla 3. 10.** Cargas de compactación

Sobre el rodillo también se pulveriza una solución jabonosa ligera para evitar que la mezcla se quede adherida en su superficie.



**Figura 3. 22.** Compactación de placa mediante rodillo de acero

Cuando la compactación se termina, se deja que la placa de mezcla bituminosa se enfríe hasta la temperatura ambiente, antes de extraerla del molde (fig.3.23).



**Figura 3. 23.** Placa después de compactación.

### 3.7.4.3. Procedimiento del ensayo

La Norma UNE-EN 12697-22:2008+A1 describe los métodos de ensayo a seguir para determinar la susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse cuando están sometidos a carga. El ensayo es aplicable a mezclas con tamaño máximo de árido menor o igual a 32 mm.

La susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse se evalúa midiendo la profundidad de la rodera producida por pasadas repetidas, a temperatura constante, de una rueda sometida a carga.

Se cortan las probetas para obtener probetas rectangulares de dimensiones 260 mm x 300 mm como mínimo.

La placa bituminosa se somete al paso de una rueda con unas condiciones de presión de  $6 \text{ Kg/cm}^2$  y una temperatura de  $60^\circ\text{C}$  dentro de una cámara termostática; el mecanismo que hace circular la rueda está diseñado para que se realicen un total de  $47 \pm 1$  pasadas por minuto, con un recorrido en cada sentido de  $23 \pm 0,5$  cm. La figura 3.24 nos muestra la máquina que realiza el ensayo de pista en placas de mezcla bituminosa.



**Figura 3. 24.** a) Máquina de Pista; b) Placa sometida al paso de una rueda con una presión de  $6 \text{ Kg/cm}^2$

Se pone la máquina en movimiento y se toman lecturas del desplazamiento vertical de la rueda; primero la lectura inicial y después 6 ó 7 veces como mínimo en la primera hora, y después de esto, al menos, una lectura cada 500 ciclos de carga. Un ciclo de carga se define como dos pasadas (ida y vuelta) de la rueda de cargada. La posición vertical de la rueda se define como el valor medio del perfil de la probeta en una longitud de  $\pm 50$  mm aproximadamente del centro del área de carga en el punto medio del recorrido, medido en, al menos, 25 puntos aproximadamente igualmente espaciados. La posición vertical de la rueda se debe medir sin detenerla. El ensayo de pista se continúa hasta que se apliquen 10.000 ciclos de carga, o hasta que la profundidad de la rodera sea de 20 mm, lo que ocurra antes.

En la placa ensayada puede observarse la rodera que se forma, figura 3.25.



**Figura 3. 25.** Fallo producido por el ensayo de Pista.

Para cada placa se obtiene el nivel de deformación plástica que tiene una mezcla. Es la pendiente de la curva de rodadura y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$WTS_{AIRE} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (3.12)$$

Donde,

$WTS_{AIRE}$  Pendiente de la deformación, en milímetros, por cada 1000 ciclos

$d_{5000}$  Profundidad de la huella después de 5000 ciclos (mm)

$d_{10000}$  Profundidad de la huella después de 10000 ciclos (mm)

Los resultados que se obtienen se representan en una gráfica Deformación-Tiempo y se pueden obtener los valores de velocidad de deformación entre dos instantes determinados que puedan ser representativos del comportamiento de la mezcla bituminosa.

Se ensayaran 2 placas para cada mezcla con distinto porcentaje de RAP el contenido de betún en este caso será fijo.

#### 3.7.4.4. Normas consultadas

Para una correcta ejecución del ensayo de Pista se siguen distintas Partes de la Normativa Española.

UNE-EN 12697-35:2006+A1:2007 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio.

UNE-EN 12697-32 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 32: Elaboración de probetas con compactador de placa.

UNE-EN 12697-22:2008+A1 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Rodadura.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Introducción

Una vez realizado el estudio experimental se procede a la presentación de los resultados de cada uno de los ensayos realizados y a su análisis. Para cada mezcla hay variables que se han mantenido fijas como el tipo de betún (BM-3c), la tipología de los áridos y del RAP, el tipo de filler y la temperatura de realización de los ensayos; entonces, para cada mezcla se estudiará el efecto del contenido de ligante presente en la mezcla del 4,75 al 5,75%, y además se comprobará el efecto del contenido de RAP en las distintas propiedades mecánicas de las mezclas discontinuas en caliente BBTM 11B.

Existen 4 tipos de mezcla en función del contenido de RAP (0, 10, 20 y 40%) y dentro de cada mezcla existen tres series en función del contenido de ligante que presentan: serie I con el 4,75% de betún, serie II con el 5,25% y serie III con el 5,75%.

Esta tesina es pionera en el empleo de material reciclado en mezclas BBTM 11B para capa de rodadura; por lo tanto, los resultados presentados a continuación no se pueden considerar definitivos, pero si orientativos para próximas investigaciones en este tipo de mezcla.

### 4.2. Densidades y Contenido de Huecos

Se han ensayado un total de 188 probetas; en el **Anejo 1: Densidades y Contenido de Huecos** puede encontrarse la densidad aparente que corresponde a cada probeta y su contenido de huecos, pero en este apartado sólo se presentarán las densidades promedio y el contenido de huecos promedio para cada serie (en función del betún) de cada una de las mezclas. Es decir, el valor promedio de cada serie formada por 14 probetas.

Tipo de Mezcla	Betún (%)	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Contenido de Huecos (%)
FTP-0% RAP	4,75	2,103	2,503	16,0
	5,25	2,114	2,485	14,9
	5,75	2,117	2,466	14,2
FT1-10% RAP	4,75	2,139	2,501	14,5
	5,25	2,157	2,482	13,1
	5,75	2,157	2,464	12,4
FT1-20% RAP	4,75	2,125	2,498	14,9
	5,25	2,152	2,479	13,2
	5,75	2,153	2,461	12,5
FT1- 40% RAP	4,75	2,189	2,495	12,3
	5,25	2,200	2,477	11,1
	5,75	2,187	2,458	11,1

Tabla 4. 1. Densidades y Contenido de Huecos.

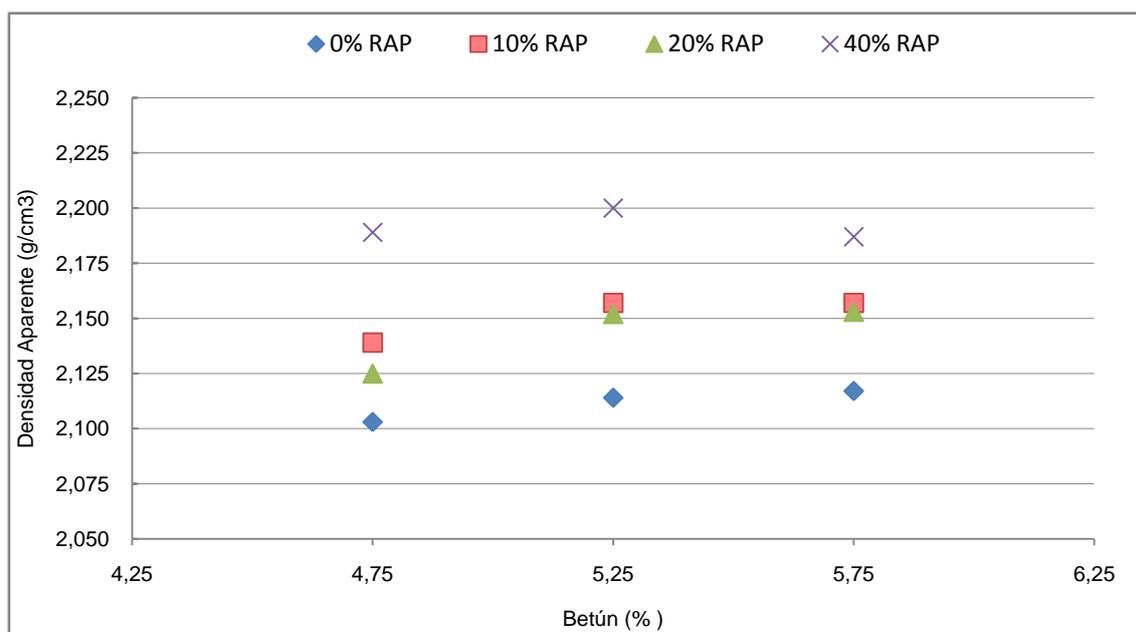


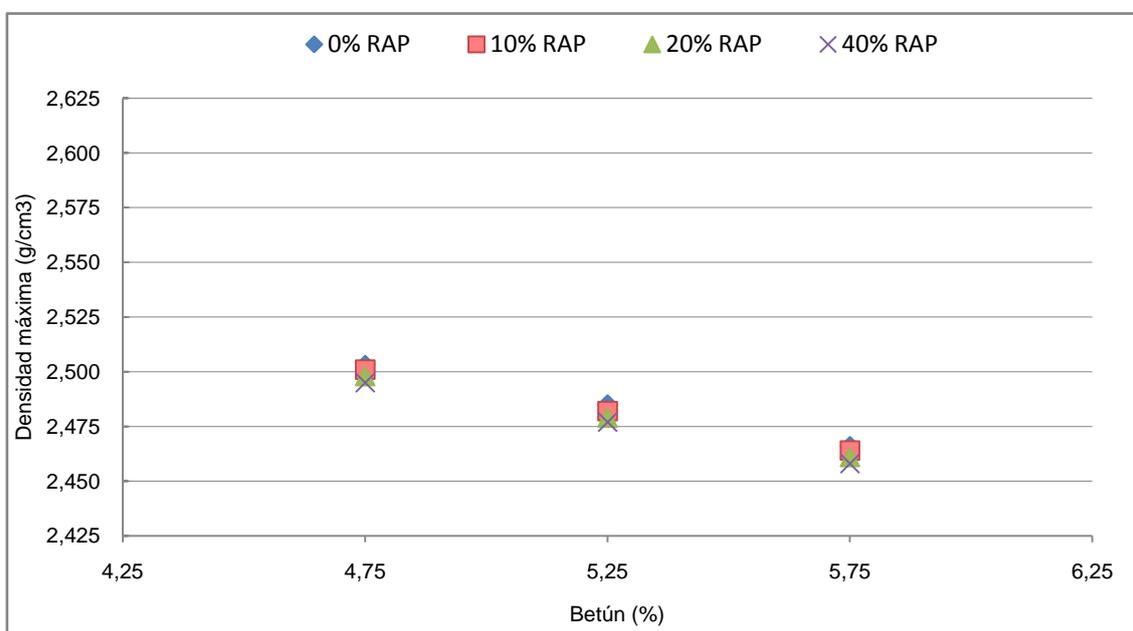
Figura 4. 1. Densidades aparente vs Contenido de ligante.

Tras analizar los datos de la tabla 4.1 y la figura 4.1 podemos observar dos aspectos. El primero, que a medida que aumenta el contenido de RAP en la mezcla ésta se hace más densa. Como hemos comentado anteriormente la densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen incluidos los huecos de aire, es decir, depende de las dimensiones de la probeta y si nos fijamos en las alturas medias de las probetas que aparecen en el Anejo 1 se refleja que, a medida que la presencia de RAP en la mezcla es mayor, la altura de la probeta disminuye en comparación con la muestra patrón (todas las probetas han seguido el mismo procedimiento de compactación Marshall). Pasamos de probetas con alturas aproximadas de 67,5 mm (0% RAP) a probetas con alturas de 63,5 mm (40% RAP) aproximadamente. Esto podría ser

debido a la variabilidad del material reciclado pues, mediante el fresado pueden quedar trozos de RAP que queden retenidos por el tamiz de 2 mm pero que presenten finos adheridos al betún y al calentar este material, se deshace el betún y los finos se colocan en los huecos de la mezcla. Entonces las mezclas con mayor porcentaje de RAP presentarán más finos y por lo tanto una mayor densidad aparente y en consecuencia deberían presentar menor contenido de huecos.

El segundo comentario que se desprende de la figura 4.1 es que al aumentar el contenido de betún no se aprecian cambios destacados en la densidad de la mezcla, simplemente se observa un ligero incremento para los contenidos intermedios de betún (5,25%) y una tendencia a disminuir para cantidades mayores de betún.

En la figura 4.2 se representa la densidad máxima de la mezcla que no tiene en cuenta el volumen de huecos.



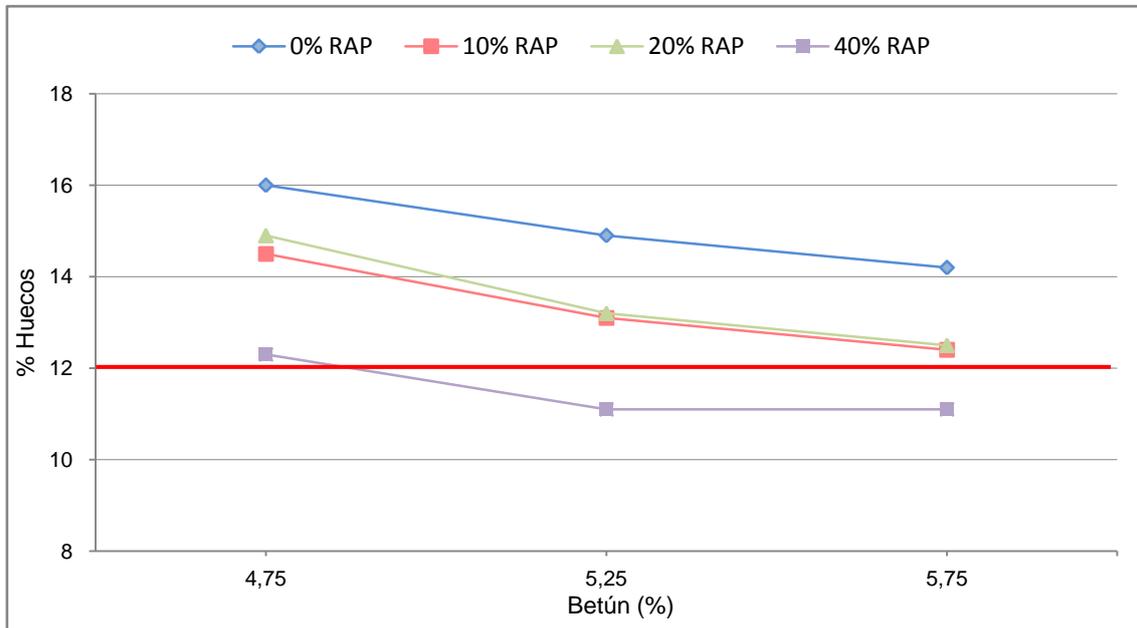
**Figura 4. 2.** Densidad máxima vs Contenido de ligante.

El comportamiento de la densidad máxima es distinto a la densidad aparente; a medida que se incrementa el porcentaje de material reciclado, la densidad no varía ya que la densidad del RAP es muy parecida a la densidad del árido virgen. A medida que aumenta el contenido de betún la mezcla tiende a disminuir la densidad máxima debido a la menor densidad del betún respecto a la del árido.

Como se ha comentado en el apartado 3.6, mediante la densidad máxima de la mezcla y la densidad aparente de cada probeta se ha encontrado su contenido de huecos. Se ha realizado el promedio de huecos para cada porcentaje de RAP y de betún y se ha representado en la figura 4.3.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3, y más concretamente el artículo 543, fija que las mezclas discontinuas BBTM 11B deben presentar un porcentaje de huecos superior o igual al 12%. En la figura 4.3 se observa que este requisito se cumple en todas las mezclas menos con la del 40 % de RAP con altos

contenidos de betún (>5%). Este hecho nos restringirá el contenido óptimo de betún para esta mezcla.



**Figura 4. 3.** Contenido de Huecos vs Contenido de ligante.

De esta figura también se desprende que a mayor contenido de RAP el porcentaje de Huecos en mezcla disminuye; este hecho es coherente con lo comentado anteriormente acerca del aumento de la densidad aparente a medida que se incrementa el % de RAP, ya que la mayor presencia de finos va cerrando la mezcla. Este resultado se intuía antes de empezar la campaña experimental; por este motivo, al decidir las fórmulas de trabajo, se adoptó una granulometría lo más abierta posible dentro del huso granulométrico para evitar que un alto contenido de RAP en la mezcla provocase su cierre.

Además, al aumentar el contenido de ligante, éste suele ocupar los huecos presentes en la mezcla y disminuye su valor.

Los valores de las alturas, la densidad aparente, la densidad máxima y el contenido de huecos de cada probeta fabricada para cada porcentaje de RAP y contenido de betún pueden ser consultados en el **Anejo 1: Densidades y Contenido de Huecos** de la presente tesina.

### 4.3. Ensayo Cántabro

Como se ha comentado anteriormente al estudiar mezclas discontinuas que se colocarán en capa de rodadura es importante determinar la resistencia a la abrasión que presentan, es decir, la resistencia a las tensiones tangenciales provocadas por el tráfico y al efecto de desmenuamiento del agua. Para caracterizar el comportamiento frente a la abrasión de las mezclas discontinuas con material reciclado, se ha utilizado el ensayo Cántabro descrito en el apartado 3.7.1.

Los pesos de las probetas antes y después de ser sometidas al ensayo pueden ser consultados en el **Anejo 2: Ensayo Cántabro** de la presente tesina.

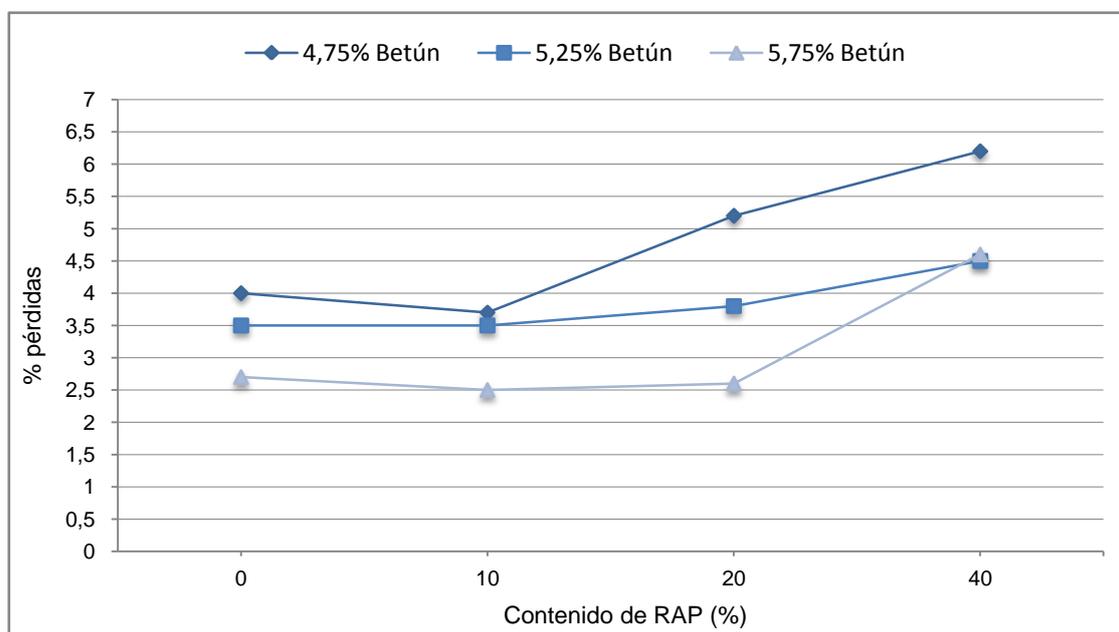
A continuación se presenta una tabla resumen con el porcentaje promedio de pérdidas para cada serie de probetas con distinto contenido de RAP y de ligante y para las dos vías de ensayo, seca y húmeda.

Tipo de Mezcla	4,75%		5,25%		5,75%	
	SECA (%)	HÚMEDA (%)	SECA (%)	HÚMEDA (%)	SECA (%)	HÚMEDA (%)
FTP-0% RAP	4	8,4	3,5	5,4	2,7	3,9
FT1-10% RAP	3,7	5,9	3,5	4,7	2,5	2,9
FT1-20% RAP	5,2	6,9	3,8	5,2	2,6	3,2
FT1-40% RAP	6,2	7,7	4,5	6,9	4,6	6,6

**Tabla 4. 2.** Porcentaje de Pérdidas por desgaste.

Observando la tabla 4.2 se puede afirmar en primer lugar que los porcentaje de pérdidas por abrasión de la mezcla BBTM 11B con distintos porcentajes de RAP son muy inferiores a los porcentajes de pérdidas máximas admitidas, 15% en seco y 25% tras inmersión. Entonces se puede afirmar que las mezclas estudiadas presentan una buena cohesión.

En la figura 4.4 se representan las pérdidas por vía seca.

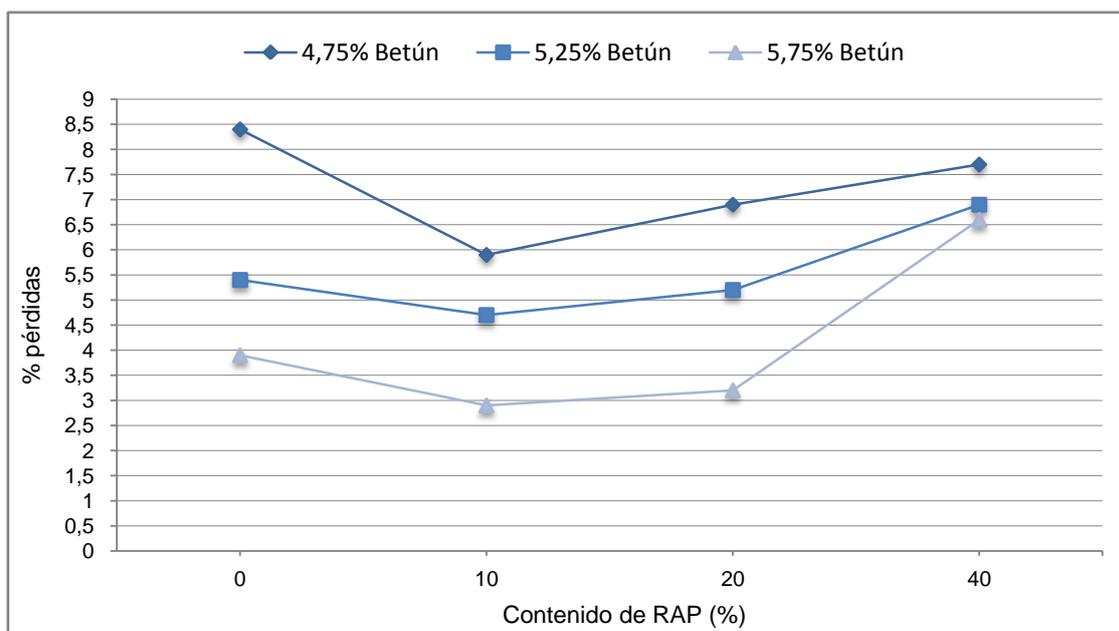


**Figura 4. 4.** Pérdidas por desgaste en el Ensayo Cántabro vs Contenido de Betún (Vía seca).

A partir de la tabla 4.2 y la figura 4.4 se puede observar que a medida que la presencia de RAP en la mezcla es mayor, se incrementan las pérdidas por desgaste, debido a la dureza del ligante envejecido aportado por el RAP.

Sin embargo, esto anterior no se cumple para la mezcla FT1-10% RAP al compararla con la mezcla patrón FTP. Las pérdidas de la mezcla FT1-10%RAP son menores a las pérdidas de la mezcla patrón debido a la combinación de dos tendencias: A mayor cantidad de material reciclado, mayores pérdidas por desgaste, pero a la vez, a mayor densidad de la mezcla, menores son las pérdidas por desgaste. Y cabe recordar que a medida que la mezcla contenía mayor porcentaje de RAP su densidad se incrementaba. Estas dos tendencias hacen que con un 10% de RAP en la mezcla el porcentaje de pérdidas sea el mínimo para cualquier contenido de betún, es decir, es la mezcla que presenta menores pérdidas y un mejor comportamiento frente a la abrasión. Este comportamiento puede ser observado en la figura 4.4. Las pérdidas de la mezcla FT1-10% y FT1-20% son muy similares, siendo las del 20% ligeramente superiores debido a que presentan densidades muy parecidas.

Para determinar la adhesión del ligante al árido en presencia de agua se han comparado los resultados de la resistencia al desgaste de probetas mantenidas al aire frente a otro grupo de probetas, fabricadas con la misma mezcla, contenido de RAP y contenido de ligante, pero que antes del ensayo han sido mantenidas en agua durante 24 horas a 60°C. En la figura 4.5 se representan las pérdidas por vía húmeda.



**Figura 4. 5.** Pérdidas por desgaste en el Ensayo Cántabro vs Contenido de Betún (Vía húmeda).

La diferencia entre las pérdidas se puede observar en la figura 4.6 y es debida únicamente, al efecto de desenvuelta producido por el agua.

Las gráficas reflejan que cuando se incrementa el porcentaje de betún la diferencia entre las pérdidas en seco y tras inmersión disminuye, es decir, mejora la adhesividad árido-ligante porque existe mayor contenido de betún.

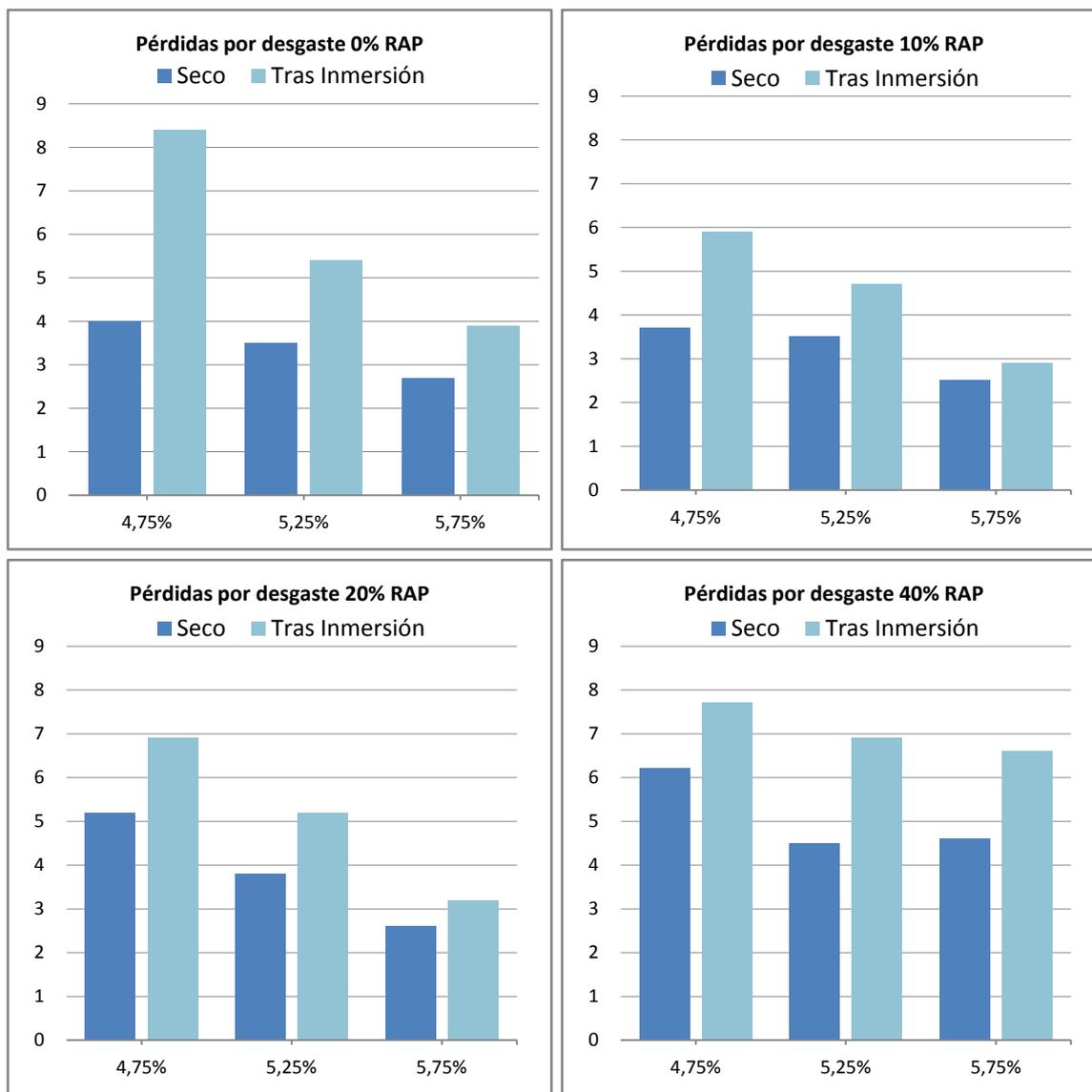


Figura 4. 6. Pérdidas en seco y tras inmersión.

Mediante las fotografías tomadas de este ensayo a lo largo de la campaña experimental pueden observarse las diferencias entre las probetas antes y después de someterlas al ensayo. Esta fuente nos puede dar una idea visual de cómo quedará el firme una vez se someta al tráfico rodado.



Figura 4. 7. Probeta sometida Ensayo Cántabro.

#### 4.4. Ensayo de Tracción Indirecta

El efecto del contenido de ligante sobre la resistencia a tracción indirecta ha sido evaluado en 4 mezclas discontinuas con distinto porcentaje de RAP, en las que se ha variado el contenido de ligante BM-3c, entre el 4,75 y 5,75%. Todas las probetas han sido compactadas a la temperatura de 160°C, con 50 golpes/cara.

Mediante este ensayo también se analiza el efecto de la acción del agua. De cada serie y para cada tipo de mezcla se separaron las 6 probetas destinadas al ensayo de Tracción Indirecta en dos grupos de 3 probetas, un grupo para ensayarlas en seco y el otro para ensayarlas tras haber permanecido 72 horas a 40°C.

De los resultados obtenidos mediante el ensayo de Tracción Indirecta se puede graficar la curva Carga-Deformación y posteriormente calcular el valor de Resistencia a la tracción indirecta, en seco y en húmedo, mediante la fórmula 3.5 del apartado 3.7.2.

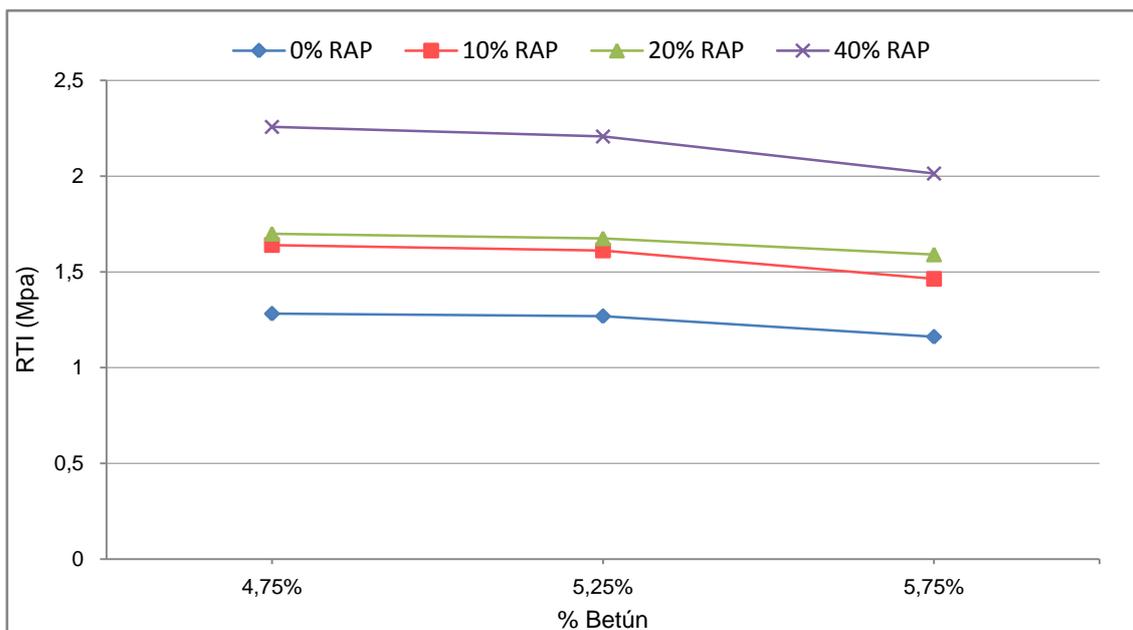
Las curvas Carga-Deformación de cada probeta se pueden consultar en el **Anejo 3: Ensayo de Tracción Indirecta** de la presente tesina.

Los resultados promedio del ensayo de Tracción Indirecta realizados en vía seca y húmeda quedan resumidos en las tablas 4.3 y 4.4.

Tipo de Mezcla	Betún (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura (mm)	F <sub>máx</sub> (N)	ITS (MPa)
FTP-0%RAP	4,75	2,127	67,1	13733	1,282
	5,25	2,099	67,5	13670	1,269
	5,75	2,119	67,2	12443	1,161
FT1-10%RAP	4,75	2,142	65,5	17145	1,640
	5,25	2,162	65,6	16875	1,612
	5,75	2,146	65,8	15373	1,464
FT1-20%RAP	4,75	2,120	66,0	17906	1,699
	5,25	2,166	65,1	17416	1,675
	5,75	2,153	65,4	16606	1,591
FT1-40%RAP	4,75	2,185	63,7	22910	2,257
	5,25	2,198	63,4	22336	2,207
	5,75	2,189	64,2	20630	2,014

Tabla 4. 3. Resistencia a la Tracción Indirecta en vía Seca

La conclusión que se desprende del análisis de los resultados en vía seca es que la resistencia a tracción apenas varía con el contenido de betún; únicamente se observa una ligera disminución a medida que se incrementa el contenido de ligante. En la figura 4.8 se puede observar este comportamiento.

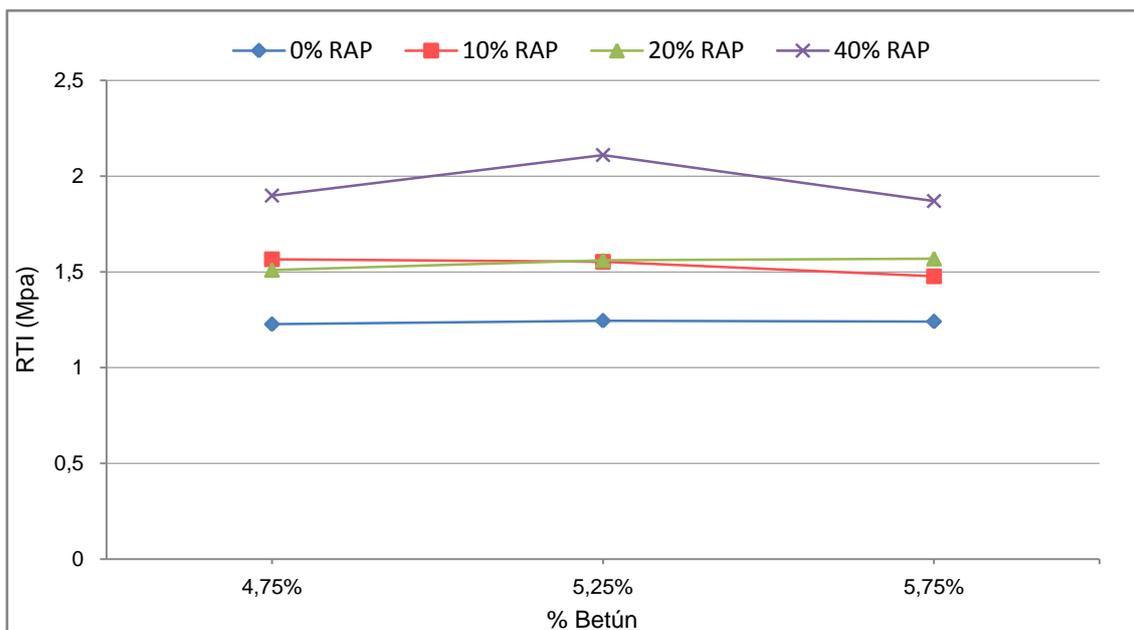


**Figura 4. 8.** Resistencia Tracción Indirecta vs Contenido de ligante (Vía Seca).

Los Resultados promedio para las probetas que han sido sumergidas en agua a 40°C durante 72 horas se presentan en la tabla 4.4 y en la figura 4.9.

Tipo de Mezcla	Betún (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura (mm)	Fmáx (N)	ITS (MPa)
FTP-0%RAP	4,75	2,116	66,6	13043	1,227
	5,25	2,129	66,4	13180	1,245
	5,75	2,122	66,3	13135	1,241
FT1-10%RAP	4,75	2,144	66,0	16490	1,566
	5,25	2,140	65,9	16330	1,553
	5,75	2,179	66,0	15555	1,477
FT1-20%RAP	4,75	2,127	65,5	15780	1,51
	5,25	2,141	65,4	16293	1,561
	5,75	2,153	65,4	16386	1,569
FT1-40%RAP	4,75	2,182	63,7	19310	1,898
	5,25	2,205	63,2	21255	2,1100
	5,75	2,190	64,2	19150	1,87

**Tabla 4. 4.** Resistencia a la Tracción Indirecta en vía Húmeda



**Figura 4. 9.** Resistencia a Tracción Indirecta vs Contenido de ligante (Vía húmeda).

Para la dosificación de las mezclas BBTM 11B, el PG-3 establece un criterio de sensibilidad al agua que corresponde a una resistencia conservada del 90%. Por este motivo son interesantes los resultados del ensayo por vía húmeda, pero primeramente vamos a analizar el efecto del contenido de RAP en este tipo de mezclas.

Las mezclas recicladas (FT1-10, FT1-20 y FT1-40) presentan mayores resistencias, ITS, que la mezcla patrón FTP, tanto por la vía seca como por la vía húmeda. Como queda reflejado en las figuras 4.7 y 4.8 a medida que la mezcla contiene más material reciclado la resistencia a tracción indirecta aumenta. Este comportamiento es debido a que la presencia de material RAP rigidiza la mezcla porque contiene betún envejecido. Recordemos que el RAP proviene de mezclas bituminosas situadas en capas de rodadura que han sido afectadas por la oxidación del betún y las pérdidas de aceites que han provocado su envejecimiento. El betún antiguo rigidiza la nueva mezcla (más resistencia), pero también la hace más vulnerable a la rotura frágil a bajas temperaturas. Un comportamiento frágil implica una tensión mayor necesaria para la rotura

Tal como se indicaba en el apartado 3.7.2 de la presente tesina, mediante la inmersión en agua de las probetas es posible evaluar su sensibilidad al agua mediante el cociente de la resistencia a tracción indirecta en probetas húmedas y la resistencia a tracción indirecta en probetas secas. El PG-3 fija que la resistencia conservada para mezclas discontinuas en caliente debe ser superior al 90%. En la figura 4.10 se puede comprobar que esta resistencia conservada se cumple siempre, excepto para las mezclas con altos contenidos de RAP (20% y 40%) cuando presentan un contenido de betún bajo, próximo al 4,75%. Este hecho condicionará el cálculo del contenido óptimo de betún.

RESISTENCIA CONSERVADA (%)			
Betún (%)	4,75	5,25	5,75
FTP-0%RAP	95,71	98,11	100
FT1-10%RAP	95,49	96,34	100
FT1-20%RAP	88,86	93,19	98,62
FT1-30%RAP	84,09	95,6	92,85

Tabla 4. 5. Sensibilidad al agua

Es importante destacar que a medida que crece el contenido de RAP en la mezcla bituminosa la resistencia conservada disminuye y a medida que el contenido de ligante se incrementa la sensibilidad al agua es menor.

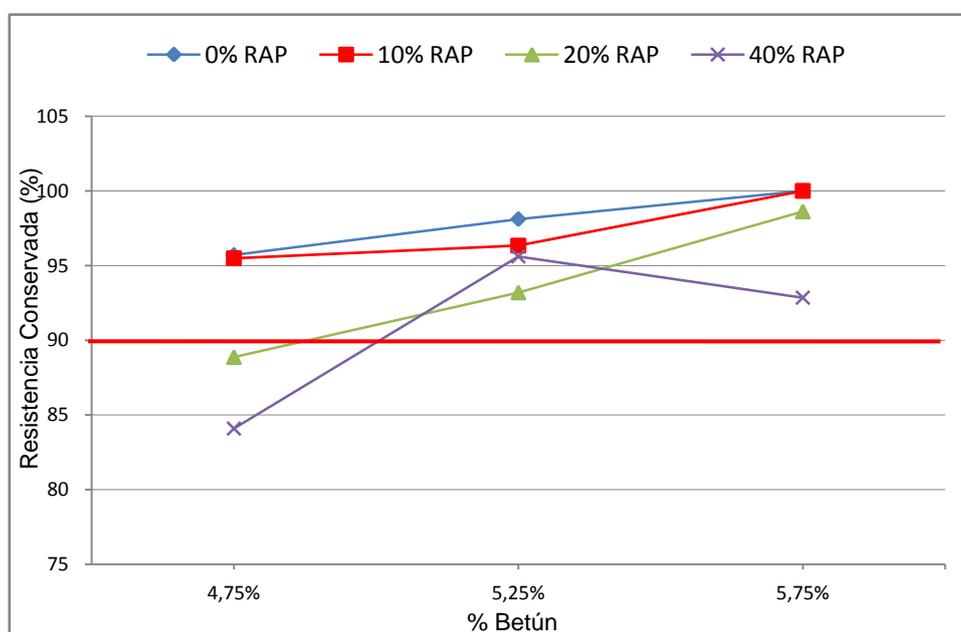


Figura 4. 10. Resistencia conservada vs Contenido de ligante.

#### 4.5. Ensayo Fénix

Una vez procesados los resultados obtenidos mediante el ensayo Fénix se obtienen las curvas Carga-Desplazamiento para cada una de las probetas ensayadas. A partir de las gráficas se obtienen distintos parámetros que caracterizan las mezclas bituminosas frente a la fisuración.

Las curvas Carga-Deformación para cada probeta ensayada se pueden consultar en el **Anejo 4: Ensayo Fénix** de la presente tesina.

Con la ayuda de la tabla 4.6 y mediante las distintas figuras que se presentaran a continuación pueden obtenerse distintas conclusiones sobre la resistencia a la fisuración y la tenacidad que presentan las mezclas BBTM 11B con RAP.

Tipo de Mezcla	Betún (%)	F <sub>máx</sub> (KN)	ΔF <sub>max</sub> (mm)	ΔR (mm)	IRT (KN/mm)	GD (J/m <sup>2</sup> )	IT (J/m <sup>2</sup> .mm)
FTP-0% RAP	4,75	0,37	0,46	4,82	3,48	379	750
	5,25	0,38	0,5	5,27	3,61	395	846
	5,75	0,37	0,48	8,31	3,39	570	1746
FT1-10% RAP	4,75	0,47	0,3	4,27	4,75	350	507
	5,25	0,48	0,41	4,99	4,57	439	786
	5,75	0,46	0,37	5,49	4,29	468	944
FT1-20% RAP	4,75	0,63	0,32	3,07	6,04	339	339
	5,25	0,62	0,33	4,1	4,44	424	540
	5,75	0,56	0,41	5,25	4,32	484	708
FT1-40% RAP	4,75	0,94	0,3	3,85	6,85	523	425
	5,25	0,86	0,28	3,91	6,06	521	571
	5,75	0,81	0,33	4,13	5,99	486	430

Tabla 4. 6. Parámetros característicos del ensayo Fénix.

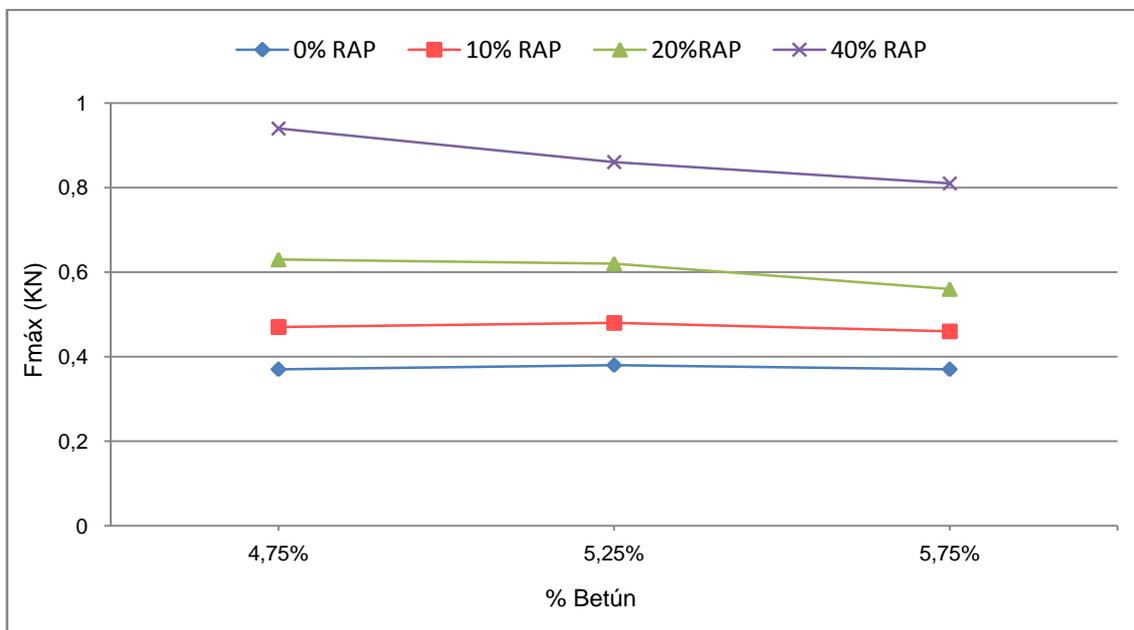
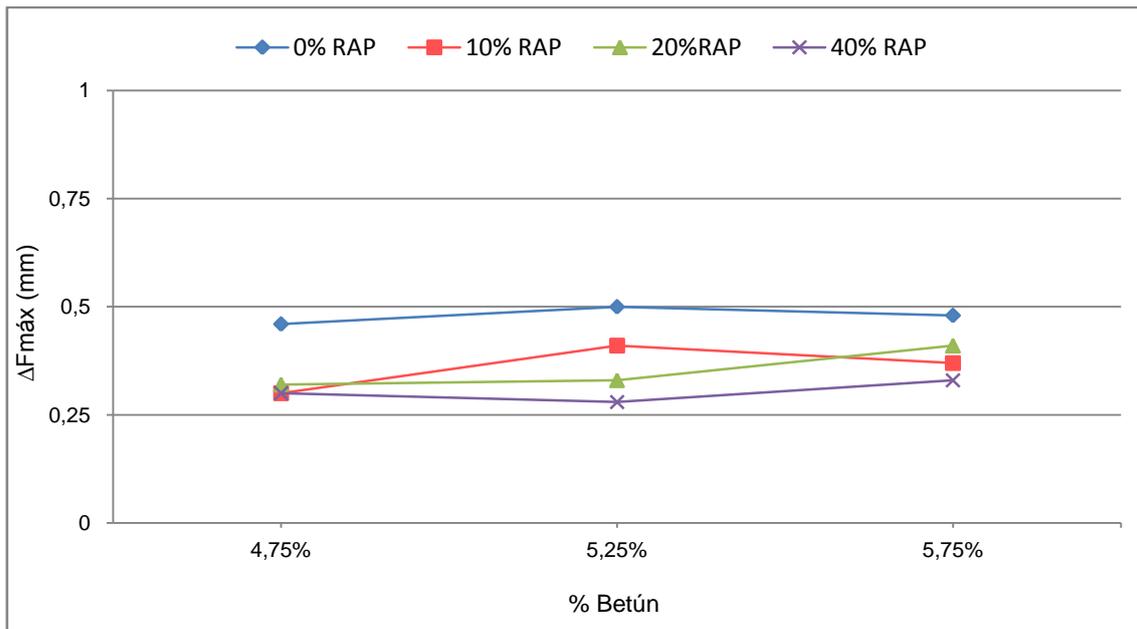
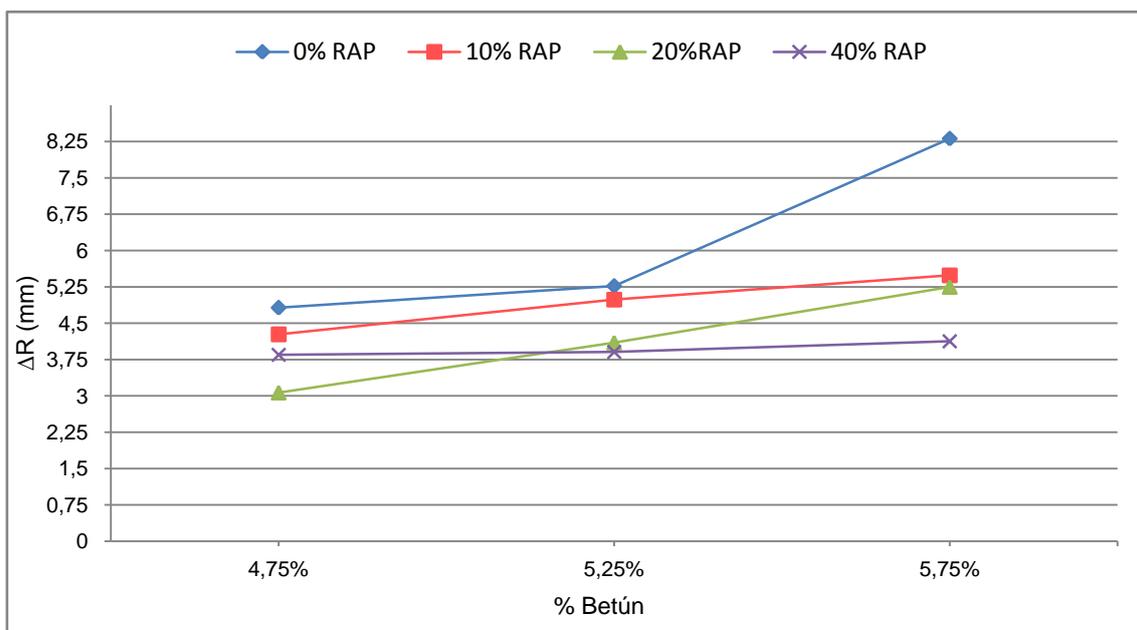


Figura 4. 11. Carga Máxima vs Contenido de ligante.



**Figura 4. 12.** Desplazamiento de Carga Máxima vs Contenido de ligante

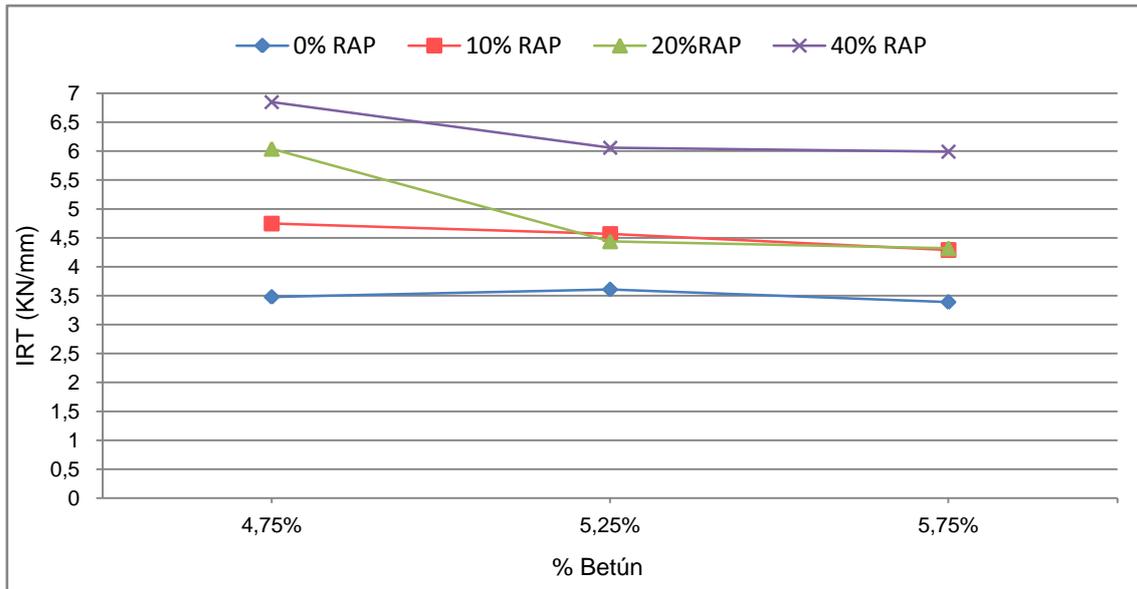
En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se observa como a medida que se incrementa el contenido de RAP en la mezcla, ésta adquiere un comportamiento más frágil con elevadas cargas máximas ( $F_{máx}$ ) acompañadas de valores menores en el desplazamiento de carga máxima ( $\Delta F_{máx}$ ) y bajos desplazamientos de rotura ( $\Delta R$ ). Este comportamiento es debido a la presencia de betún envejecido en el RAP que nos rigidiza la mezcla. A medida que se incrementa el contenido de ligante de nueva aportación los desplazamientos de carga máxima y de rotura crecen, ya que el betún favorece la deformación de la mezcla bituminosa.



**Figura 4. 13.** Desplazamiento a Rotura vs Contenido de ligante.

El parámetro  $\Delta R$  (mm desplazados hasta rotura) nos permite diferenciar entre una mezcla frágil o una mezcla más dúctil. En la figura 4.13 se observa que la mezcla patrón es más dúctil que la mezcla reciclada, y a medida que incrementamos el contenido de betún se incrementa la ductilidad de la mezcla.

La figura 4.14 muestra como varía el Índice de resistencia a tracción en función del incremento de RAP en la mezcla y del contenido de ligante.



**Figura 4. 14.** Índice de rigidez a Tracción vs Contenido de ligante

Los valores del Índice de resistencia a tracción coinciden con los análisis comentados anteriormente. Un valor alto del IRT refleja mezclas rígidas y en la tabla 4.6 se observa que las mezclas que presentan un mayor porcentaje de material reciclado, presentan un valor más alto de resistencia a tracción, mientras que la mezcla patrón es, más flexible, presenta valores más bajos a la resistencia a tracción.

Este índice es sensible al contenido de ligante, mostrando una tendencia a disminuir a medida que se incrementa el contenido de betún, cuando la mezcla adquiere más flexibilidad.

La energía disipada se define como el trabajo realizado en el proceso de fisuración dividido por el área de fractura.

En la figura 4.15 se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de betún la energía disipada aumenta, menos en el caso del 40% de RAP, que se mantiene prácticamente en el mismo nivel para los distintos contenidos de betún evaluados.

Si se incrementa el valor de energía disipada la mezcla presentará un mejor comportamiento a la fisuración, debido que se requiere más energía para iniciar y propagar las fisuras en el firme.

De la gráfica se desprenden dos comportamientos. Para contenidos bajos de betún las mezclas presentan una energía disipada muy similar excepto para el 40%, que presenta más energía debido a que la carga máxima es mayor. A diferencia de este

comportamiento, para contenidos altos de betún, todas las mezclas con RAP son similares y por debajo de la patrón ya que ésta presenta un mayor valor del desplazamiento a rotura incrementándose así la energía disipada. En resumen no se muestran grandes diferencias entre las mezclas evaluadas a distintos porcentajes de RAP y similares contenidos de betún.

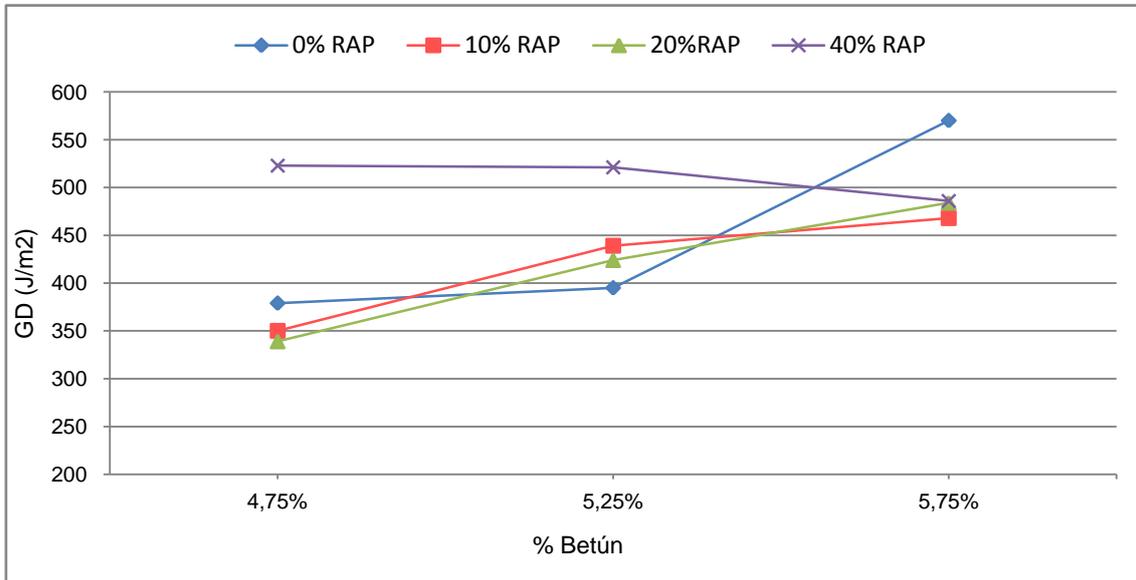


Figura 4. 15. Energía Disipada vs Contenido de ligante

La tenacidad se define como la energía disipada en el período de relajación multiplicada por un factor de fragilidad. Nos da una idea de la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ya ha alcanzado su resistencia máxima. Los resultados del estudio experimental reflejan que a menor cantidad de material reciclado la mezcla es más tenaz y a medida que aumenta el contenido de betún la tenacidad se incrementa debido al aumento de ligante que envuelve los áridos.

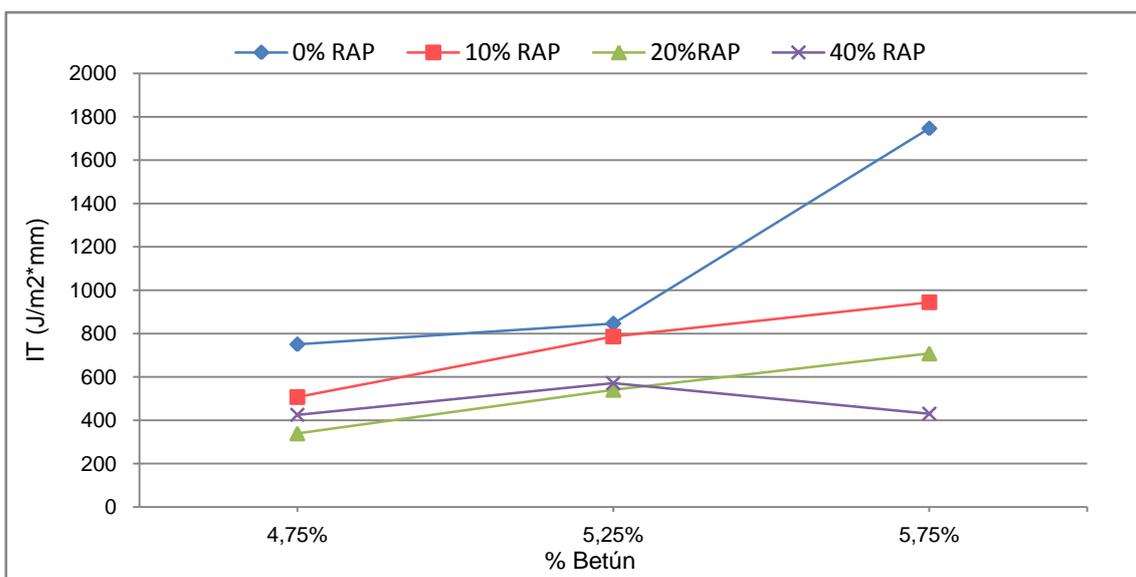


Figura 4. 16. Índice de Tenacidad vs Contenido de Ligante

#### 4.6. Determinación del Contenido óptimo de Betún

Se ha obtenido el porcentaje óptimo de betún mediante el contenido de huecos y el ensayo de Tracción Indirecta. El ensayo Cántabro también podría haber sido útil pero en este caso todas las mezclas cumplen cómodamente con los máximos establecidos en la Orden FOM 891/2004.

Fijándonos en la figura 4.3 “Contenido de huecos” la fórmula de trabajo para mezclas con alto contenido de material reciclado, FT1-40%RAP, deberá emplear bajos contenidos de betún próximos al 4,75% sobre mezcla para evitar que con más betún se cierre la mezcla por debajo del 12% de huecos.

Además teniendo en cuenta lo establecido en el artículo 543 del PG-3 que fija al 90% la resistencia conservada, entre la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo, se establece que para las fórmulas de trabajo, FT1-20%RAP y FT1-40%RAP, se precisa utilizar un contenido de ligante mayor o igual al 4,8% y el 5% sobre mezcla respectivamente.

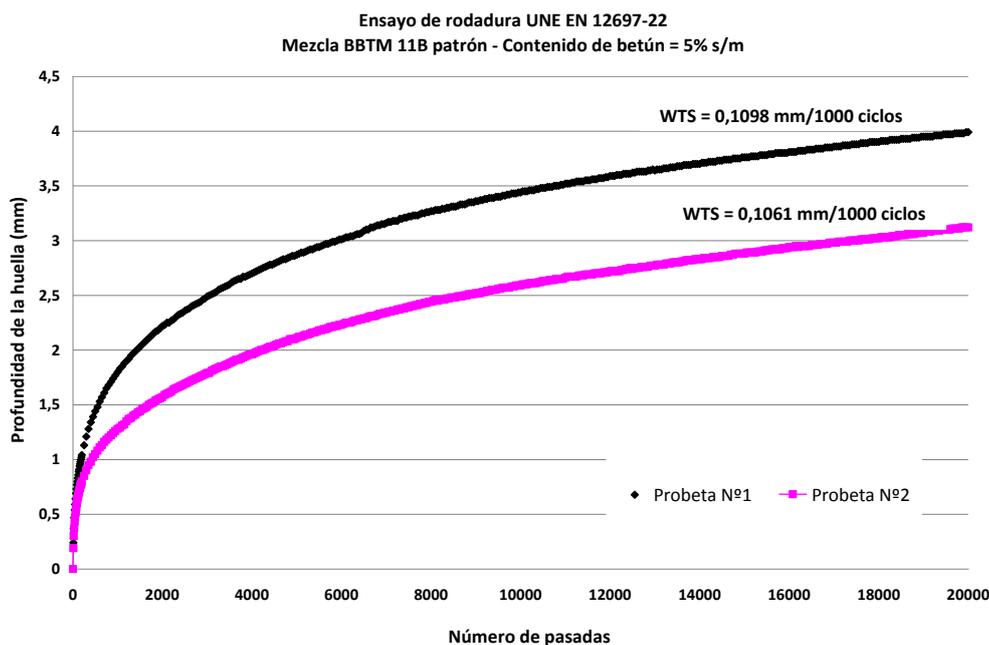
Se realiza el ensayo de pista para cada fórmula de trabajo con los porcentajes de betún indicados en la tabla 4.7 y se comprueba que se cumpla lo especificado en el artículo 543 del PG-3.

Fórmula de trabajo	% Betún s.m
FTP	4,9
FT1-10	4,9
FT1-20	5
FT1-40	5

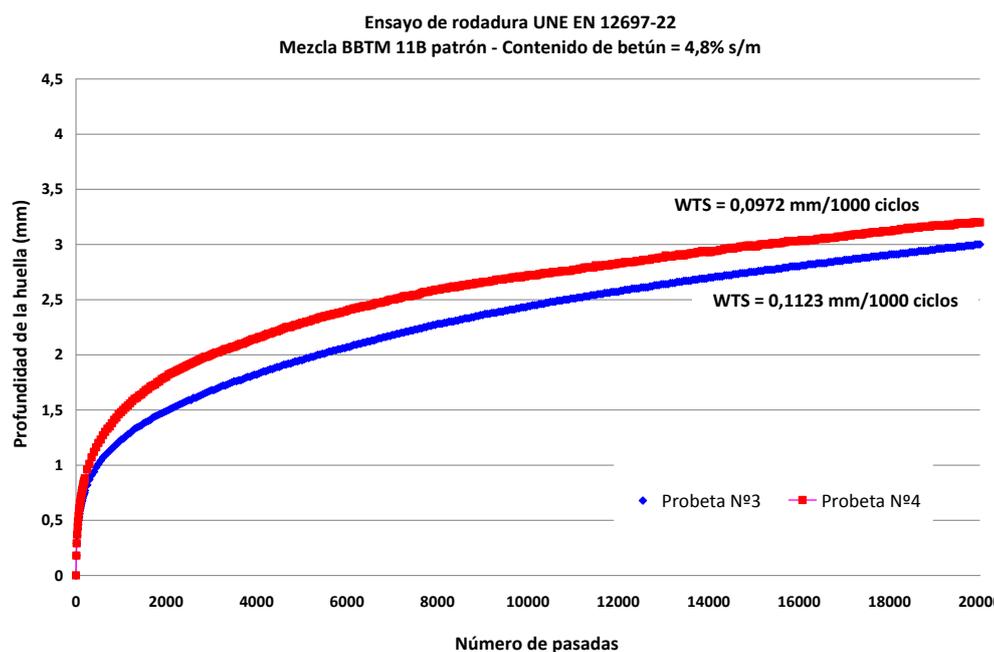
Tabla 4. 7. Porcentaje óptimo de betún.

#### 4.7. Ensayo de Pista

Se realizan unos primeros ensayos de rodadura sobre la mezcla patrón (0% de RAP) con contenidos de betún del 5.0% s/m (fig. 4.17) y del 4,8% s/m (fig. 4.18). Las figuras muestran un valor de la pendiente media de deformación de 0,107 mm en el primer caso y un 0,104 mm en el segundo. Al disminuir el contenido de betún se han disminuido ligeramente las deformaciones plásticas pero se ha superado el valor establecido en el PG-3, 0,07 mm para la pendiente media de deformación en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos.

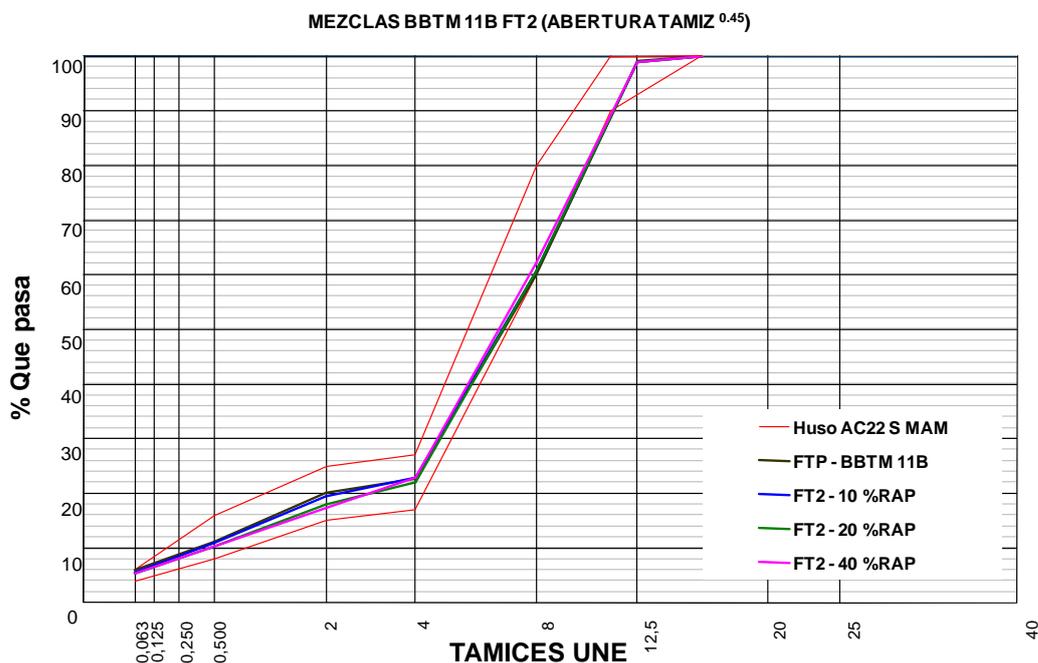


**Figura 4. 17.** Ensayo de rodadura mezcla patrón, contenido de betún = 5% s/m



**Figura 4. 18.** Ensayo de rodadura mezcla patrón, contenido de betún = 4.8% s/m.

En base a los resultados obtenidos al ejecutar el primer ensayo de Pista donde no alcanzan las especificaciones del PG-3 se modifican ligeramente las fórmulas de trabajo incrementando el contenido de finos y filler. Se aumenta así el porcentaje de paso por tamiz UNE 2 del 18 al 20% y el porcentaje de paso por el tamiz UNE 0,063 del 4 al 6%. La Figura 4.19. representa las nuevas curvas granulométricas obtenidas. Gracias a otros estudios se sabe que estas formulaciones estarán del lado de la seguridad respecto a la sensibilidad al agua y a la resistencia a la disgregación (propiedades estudiadas anteriormente).



**Figura 4. 19.** Curvas granulométricas ligeramente modificadas, FT-2.

FTP2		Filler	0/2 CAL	5/12 Gran	Árido Virgen	RAP	BBTM 11B
TAMAÑO TAMIZ UNE	HUSO BBTM 11B	5%	18%	77%	100%	0%	0% RAP
16	100	100	100	100	100	100	100,0
12,5	90	100	100	100	98,8	99,076	99,1
8	60	80	100	100	47,9	59,88	59,9
4	17	27	100	97,4	0,3	22,76	22,8
2	15	25	100	83,8	0	20,08	20,1
0,5	8	16	100	33,6	0	11,05	11,0
0,063	4	6	100	5,3	0	5,95	6,0

**Tabla 4. 8.** Granulometría de trabajo FTP2 para la mezcla BBTM11B con 0%RAP.

FT2-10%RAP		Filler	0/2 CAL	5/12 Gran	Árido Virgen	RAP	BBTM 11B
TAMAÑO TAMIZ UNE	HUSO BBTM 11B	4'5%	16%	79'5%	90%	10%	10% RAP
16	100	100	100	100	100	100	100,0
12,5	90	100	100	100	98,8	99,0	99,0
8	60	80	100	100	47,9	58,6	60,5
4	17	27	100	97,4	0,3	20,3	22,9
2	15	25	100	83,8	0	17,9	19,5
0,5	8	16	100	33,6	0	9,9	10,8
0,063	4	6	100	5,3	0	5,3	5,7

**Tabla 4. 9.** Granulometría de trabajo FT2-10%RAP para la mezcla BBTM11B.

FT2-20%RAP		Filler	0/2 CAL	5/12 Gran	Árido Virgen	RAP	BBTM 11B
TAMAÑO TAMIZ UNE	HUSO BBTM 11B	4%	12%	84%	80%	20%	20% RAP
16	100	100	100	100	100	100	100,0
12,5	90	100	100	98,8	99,0	98,8	98,9
8	60	80	100	47,9	56,2	77,9	60,6
4	17	27	100	97,4	0,3	15,9	22,0
2	15	25	100	83,8	0	14,1	18,0
0,5	8	16	100	33,6	0	8,0	10,3
0,063	4	6	100	5,3	0	4,6	5,4

**Tabla 4. 10.** Granulometría de trabajo FT2-20%RAP para la mezcla BBTM11B.

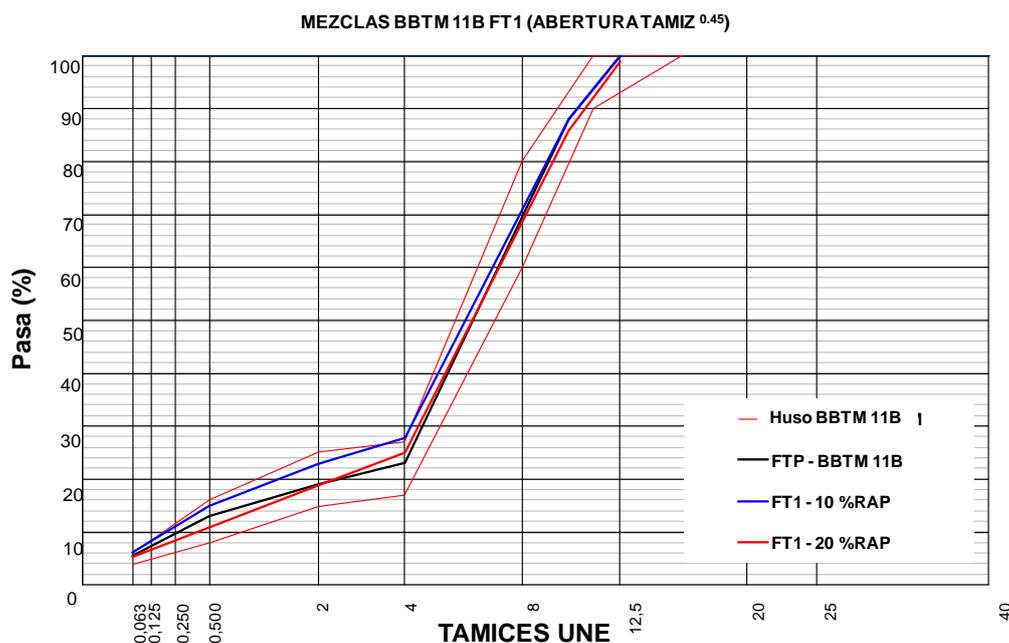
FT2-40%RAP		Filler	0/2 CAL	5/12 Gran	Árido Virgen	RAP	BBTM 11B
TAMAÑO TAMIZ UNE	HUSO BBTM 11B	3%	4%	93%	60%	40%	40% RAP
16	100	100	100	100	100	100	100,0
12,5	90	100	100	98,8	98,9	98,8	98,8
8	60	80	100	47,9	51,5	77,9	62,1
4	17	27	100	97,4	0,3	7,2	22,8
2	15	25	100	83,8	0	6,4	17,2
0,5	8	16	100	33,6	0	4,3	10,4
0,063	4	6	100	5,3	0	3,2	5,4

**Tabla 4. 11.** Granulometría de trabajo FT2-40%RAP para la mezcla BBTM11B.

Estas fórmulas de trabajo FT2 con los porcentajes de betún propuestos en el apartado 4.6 se envían a planta donde se fabrican una serie de probetas y se someten a los mismos ensayos ejecutados en la fase de laboratorio. La fabricación en planta no es tan precisa como en laboratorio y las curvas granulométricas obtenidas pueden variar ligeramente respecto la fórmula de trabajo.

Una vez realizada la fabricación de la mezcla en la planta Asfaltos Augusta y ejecutada la campaña de ensayos en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB se puede observar que el valor de los resultados sigue la línea del estudio experimental comentada hasta el momento. Estos resultados se pueden consultar en el apartado 4.8.

Los resultados de las granulometrías de las mezclas fabricadas en planta se muestran en la figura 4.20. Todas las mezclas fabricadas están dentro del huso de las mezclas discontinuas BBTM11B y es la mezcla del 10% de RAP la que más se aleja de la fórmula de trabajo FT2 con un mayor contenido de finos. Los estudios granulométricos los realizó EPTISA y se adjuntan en el anejo 5.



**Figura 4. 20.** Curvas granulométricas de las mezclas fabricadas en la planta Asfaltos Augusta.

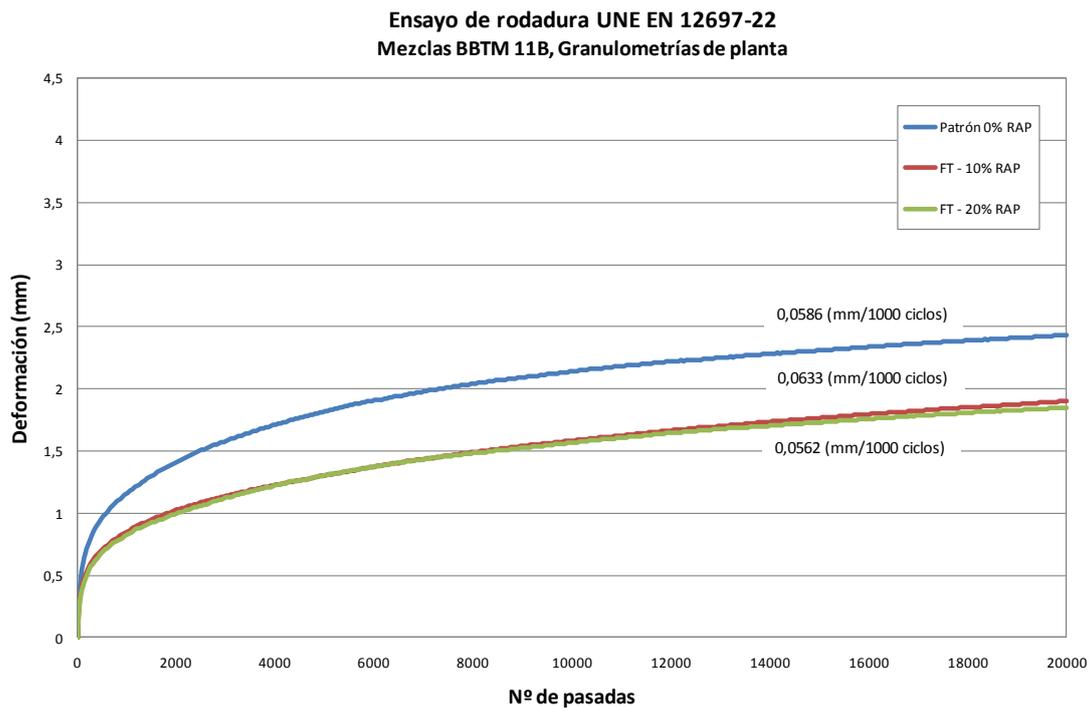
Finalmente, se ha realizado en laboratorio los ensayos de rodadura con las granulometrías obtenidas de las mezclas fabricadas en planta para reproducir exactamente las mezclas que posteriormente serán fabricadas.

Los contenidos de betún utilizados han sido del 4.9% s.m. para las mezclas patrón y con el 10% de RAP y del 5.0% s.m. para la mezcla con el 20% de RAP, correspondientes a cada una de las fórmulas de trabajo establecidas en la etapa de diseño. En este último caso, el contenido de betún es ligeramente superior al obtenido realmente en la mezcla fabricada en planta, por lo que la resistencia a la deformación plástica obtenida en esta mezcla estaría del lado de la seguridad.

Los resultados obtenidos se recogen en las Figuras 4.21 y 4.22. Las pendientes medias de deformación obtenidas para cada mezcla en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos están, para cualquiera de las tres mezclas, por debajo del valor especificado en el Pliego para la categoría de tráfico más pesado (0.07 mm/1000 ciclos de carga). El mayor valor (0.063 mm/1000 ciclos) se obtiene para la mezcla con un 10% de RAP, que tal como se ha visto anteriormente, es la mezcla con menor contenido de huecos, debido al mayor porcentaje de finos y de filler de la mezcla fabricada.

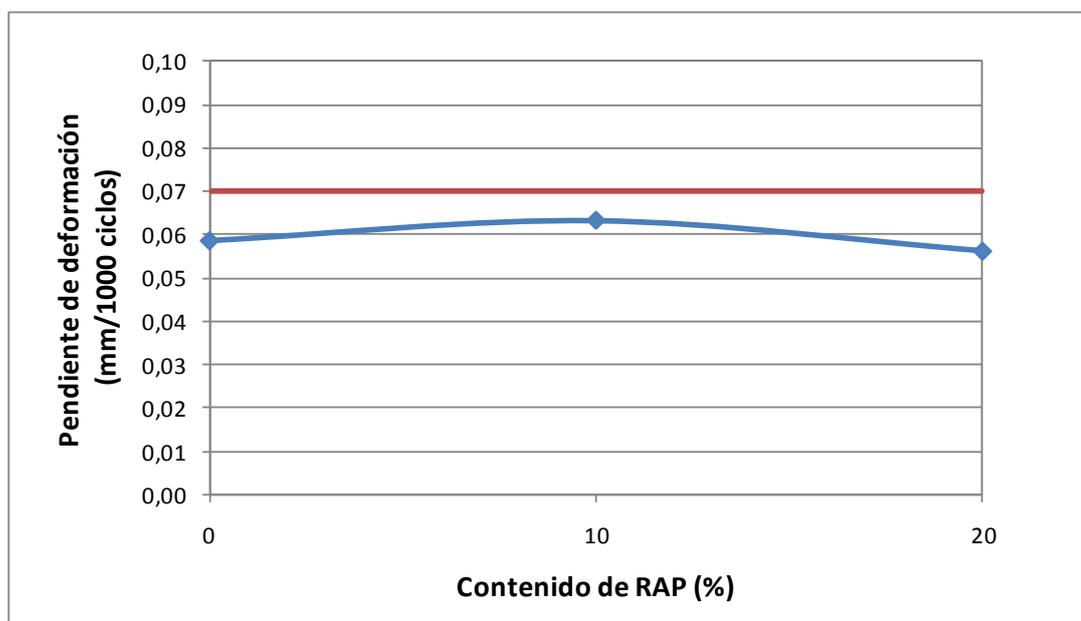
El ensayo de rodadura no se ha realizado en la mezcla FT2-40% de RAP debido a que no es posible su fabricación en una planta convencional ya que los requerimientos de calentamiento de los áridos son muy elevados.

El ensayo de rodadura no se ha realizado en la mezcla FT2-40% de RAP debido a que no es posible su fabricación en una planta convencional ya que los requerimientos de calentamiento de los áridos son muy elevados.



**Figura 4. 21.** Resultados del ensayo de rodadura. Granulometrías de planta.

No es objetivo comparar las mezclas con distinto porcentaje de RAP debido a que en cada una de ellas se han empleado distintos porcentajes de betún. Al ser muy parecidos si se puede comentar que toman valores muy similares siendo la del 10 % de RAP la que presenta peores prestaciones.



**Figura 4. 22.** Pendiente de deformación de las mezclas de planta reproducidas en laboratorio.

## 4.8. Resultados obtenidos de las probetas fabricadas en planta

Para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas en la primera fase de la campaña experimental de laboratorio, se decidió hacer una prueba de fabricación de las mezclas diseñadas en la planta asfáltica discontinua, propiedad de Asfaltos Augusta, ubicada en el Ordal. Para ello se fabricaron 3 tipos de mezcla con diferentes contenidos de RAP, empezando con la mezcla patrón, con un 0% de RAP, y después con 10 y 20% de RAP. Esta prueba fue realizada el 23 de octubre de 2010. No se fabricó la mezcla del 40% de RAP debido a que la planta no está preparada para el calentamiento al que se debe someter el árido antes de ser mezclado con el material reciclado. Para cada mezcla se fabricaron 10 probetas cilíndricas a pie de planta, 4 para el ensayo Cántabro (2 en seco y 2 en húmedo), 4 para el ensayo de tracción indirecta (2 en seco y 2 en húmedo) y 2 para el ensayo Fénix. Estas probetas se enviaron al Laboratorio de Caminos de la ETSCCPB donde fueron ensayadas

A continuación se presentan los resultados de los ensayos que caracterizan el comportamiento mecánico de estas mezclas.

### 4.8.1. Granulometrías

Los resultados de las granulometrías de las mezclas fabricadas, tras la extracción del ligante, muestran que las mezclas fabricadas estuvieron dentro del huso especificado en la normativa, (fig.4.23) , observándose que la mezcla con un 10% de RAP presenta un mayor contenido de finos que las otras mezclas evaluadas (En el Anejo 5 se presentan los informes proporcionados por EPTISA). A su vez, los contenidos de ligante se ajustaron a lo establecido en las fórmulas de trabajo, Tabla 4.12.

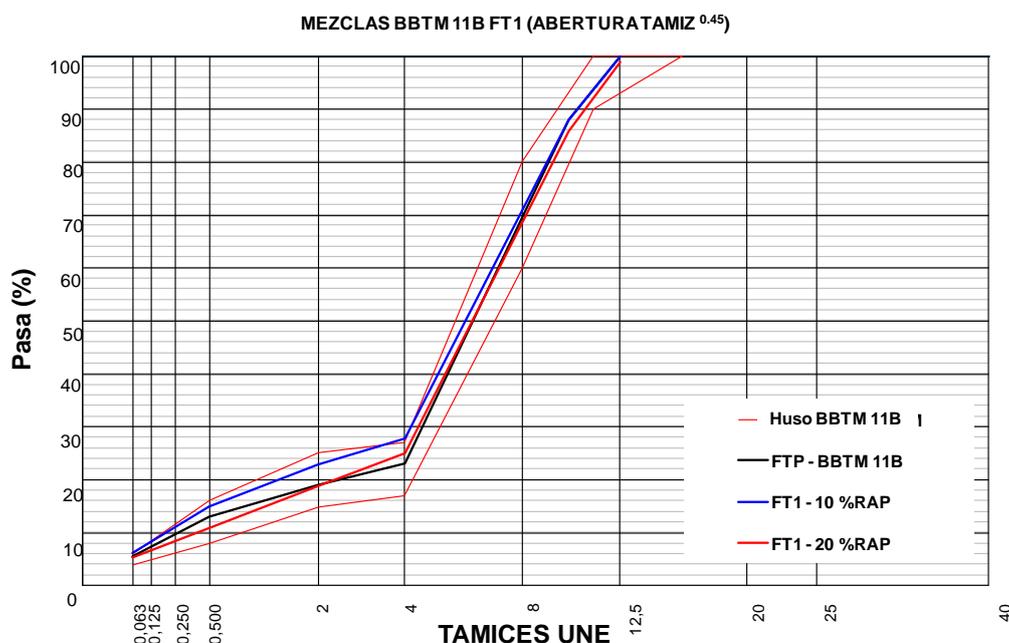


Figura 4. 23. Granulometrías de mezcla discontinua recicladas fabricadas en planta.

	Contenido de betún s.m.	Relación filler/betún
FT- Patrón	4,86	1,1
FT- 10% RAP	4,97	1,2
FT- 20% RAP	4,80	1,1

Tabla 4. 12. Contenidos de betún y relación f/b – mezclas fabricadas en planta.

#### 4.8.2. Ensayo Cántabro

En la Tabla 4.13 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo cántabro, realizado tanto a probetas secas como a probetas previamente acondicionadas, sumergidas en agua durante 24 horas a 60°C. Las pérdidas están muy por debajo de los máximos que establecía el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3 (O. FOM. 891/2004), 15% en seco y 25% tras inmersión. Esto pone de manifiesto que las mezclas evaluadas presentan una adecuada cohesión y adhesividad.

Al analizar el contenido de huecos, se observa que todas las mezclas evaluadas superan el valor mínimo del 12% especificado en la normativa para este tipo de mezclas, observándose un menor porcentaje de huecos en la mezcla con un 10% de RAP, hecho que puede atribuirse al mayor porcentaje de finos, de filler y de betún, así como a la mayor relación filler/betún de esta mezcla.

Tipo de Mezcla	Betún (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Huecos (%)	Pérdidas seco (%)	Pérdidas húmedo (%)
FTP-0% RAP	4,86	2,089	17,1	2,8	6,3
FT1-10% RAP	4,97	2,185	12,5	2,9	5,2
FT1-20% RAP	4,80	2,131	14,2	2,7	4,4

Tabla 4. 13. Resultados del ensayo Cántabro de las mezclas fabricadas en planta.

#### 4.8.3. Ensayo de tracción indirecta

Los resultados obtenidos en el ensayo de sensibilidad al agua por tracción indirecta se pueden observar en la Tabla 4.14. Las densidades fluctúan entre los 2,134 y los 2,205 g/cm<sup>3</sup>, siendo muy similares a las obtenidas en las fórmulas de trabajo. Únicamente la mezcla fabricada con un 10% RAP, presenta una densidad ligeramente superior a la obtenida inicialmente en laboratorio, ya que, tal como se ha señalado anteriormente, esta mezcla presenta un mayor porcentaje de finos, de filler y de betún.

Tipo de Mezcla	Betún (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	RTI seco (MPa)	RTI húmedo (MPa)	Resistencia conservada (%)
FTP-0% RAP	4,86	2,134	1,42	1,42	100
FT1-10% RAP	4,97	2,205	1,81	1,69	93,4
FT1-20% RAP	4,80	2,160	1,50	1,46	97,3

Tabla 4. 14. Resultados de tracción indirecta de las mezclas fabricadas en planta.

Las resistencias a tracción indirecta obtenidas en seco y en húmedo, son muy similares entre sí, por lo que la resistencia conservada de todas las mezclas es superior al límite mínimo de 90% establecido en la normativa.

#### 4.8.4. Ensayo Fénix

Los resultados medios obtenidos mediante el ensayo Fénix de las probetas fabricadas en planta se representan en la Figura 4.24. La resistencia máxima a tracción,  $F_{max}$ , es muy similar en todas las mezclas evaluadas, mostrando una ligera tendencia a aumentar a medida que aumenta el contenido de RAP en la mezcla. La misma tendencia se observa en el Índice de rigidez a tracción (IRT).

La mayor diferencia observada entre las mezclas radica en la mayor capacidad de deformación ( $\Delta R$ ), la mayor energía disipada ( $G_D$ ) y la mayor tenacidad ( $I_T$ ) de la mezcla fabricada con un 10% de RAP. Esto de nuevo puede ser debido al mayor contenido de finos, filler y betún observado en esta mezcla en comparación con las otras dos. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 4.24, aunque se aprecia esta diferencia, ésta no es significativa.

Tipo de Mezcla	Betún (%)	F <sub>máx</sub> (KN)	$\Delta F_{max}$ (mm)	$\Delta R$ (mm)	IRT (KN/mm)	GD (J/m <sup>2</sup> )	IT (J/m <sup>2</sup> .mm)
FTP-0% RAP	4,75	0,35	0,56	3,79	1,94	298	472
FT1-10% RAP	4,75	0,37	0,55	4,36	2,33	373	708
FT1-20% RAP	4,75	0,38	0,50	3,81	2,77	313	497

Tabla 4. 15. Resultados del ensayo Fénix de las mezclas recicladas en planta.

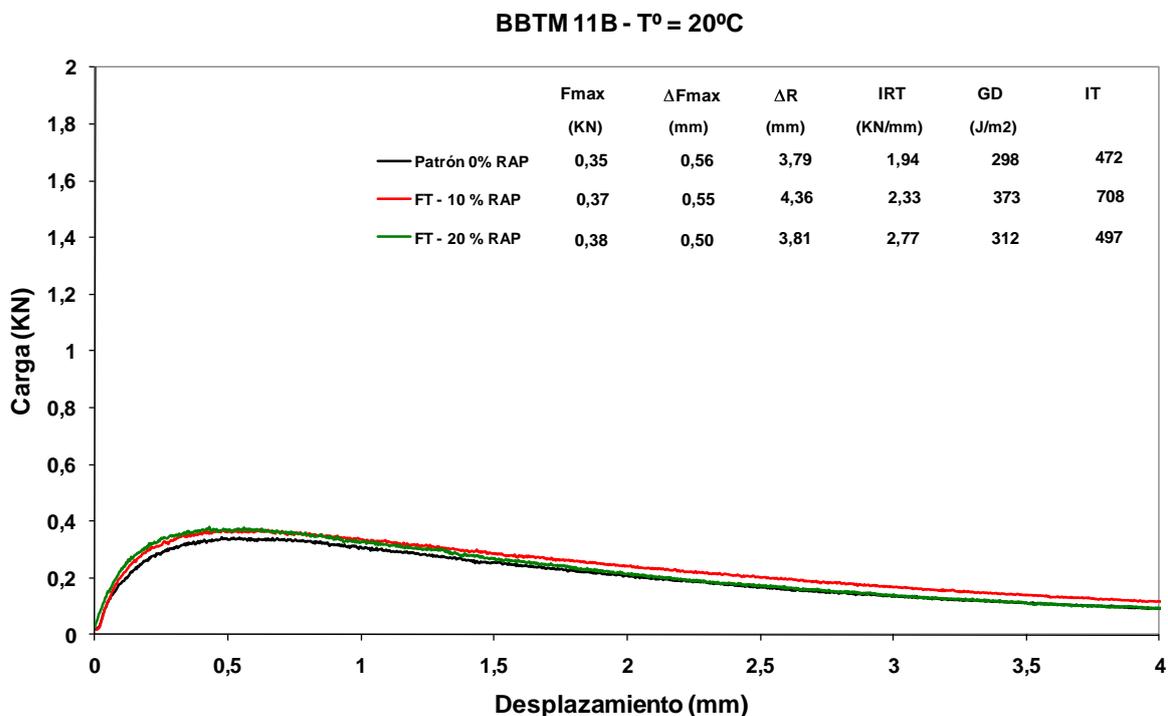


Figura 4. 24. Resultados del ensayo Fénix en probetas fabricadas en planta

#### 4.8.5. Conclusiones

Las probetas de las mezclas discontinuas recicladas fabricadas en planta alcanzan una densidad muy similar a la obtenida en probetas fabricadas en laboratorio durante el estudio de las fórmulas de trabajo, con un contenido de huecos acorde a lo especificado en la normativa, siendo la mezcla con un 10% de RAP la que presenta una mayor densidad y un menor contenido de huecos, consecuencia del mayor contenido de finos, de filler y de betún observado en la mezcla.

Las mezclas recicladas con los porcentajes de RAP considerados (10 y 20%) fabricadas en planta presentan una cohesión y adhesividad, evaluadas mediante el ensayo Cántabro, adecuadas, obteniéndose unos valores de pérdidas, tanto en seco, como en húmedo, muy por debajo de los máximos que se especificaban en el Pliego (O. FOM. 891/2004).

Los valores de las pérdidas en seco y en húmedo del ensayo Cántabro realizado a las mezclas de planta es del orden de magnitud de los valores obtenidos en laboratorio tendiendo a su disminución debido al incremento de filler y finos en su composición.

Los resultados obtenidos en el ensayo de sensibilidad de las mezclas al agua, evaluados a partir de la resistencia conservada, fueron superiores al 90% establecido en el Pliego actual.

El análisis de la resistencia a la fisuración de las mezclas, evaluada mediante el ensayo Fénix, no muestra grandes diferencias entre las mezclas estudiadas, obteniéndose para todas ellas prestaciones similares. Las pequeñas diferencias observadas es la mayor tenacidad y capacidad de deformación de la mezcla con un 10% de RAP respecto a las demás mezclas evaluadas, se explica por el mayor contenido de finos, filler y betún que presentó esta mezcla.

Estos resultados ponen de manifiesto que ha sido posible fabricar mezclas discontinuas recicladas, con contenidos de RAP de hasta un 20%, aún utilizando una planta convencional, no adaptada, sin un detrimento significativo de sus propiedades mecánicas.



## 5. CONCLUSIONES

Para la obtención de una fórmula de trabajo válida para mezclas BBTM11B con elevados contenidos de material reciclado "RAP" se seleccionan distintos ensayos recogidos en el artículo 543 del PG-3 y así como en otros estudios realizados en mezclas discontinuas. Del PG-3 se emplean: el contenido de huecos, el ensayo de Tracción Indirecta y el ensayo de rodadura y a partir de otros estudios se utiliza el ensayo Cántabro y el ensayo Fénix; el Cántabro para determinar la resistencia al efecto disgregador del tráfico y del agua debido a que son mezclas discontinuas empleadas en capa de rodadura y el Fénix para estudiar la resistencia a la fisura, ya que, por su espesor de capa (inferior a los 3 cm) y el material reciclado que contiene puede ser un fallo habitual.

En todos los ensayos, exceptuando la rodadura, se ha analizado la influencia del contenido de ligante variando su porcentaje entre el 4,75 y el 5,75%.

Con cada uno de los ensayos utilizados se observa una buena repetitividad de los datos, ensayándose grupos de tres probetas para cada dosificación. Se obtienen dispersiones mínimas que dan fiabilidad a los datos presentados.

Del análisis de los resultados se puede afirmar:

- A mayor contenido de material reciclado en mezcla el contenido de huecos disminuye. Al incrementar la cantidad de material reciclado se incrementa el contenido de finos adheridos al ligante que acabarán rellenando huecos e incrementando la densidad de la mezcla.
- El ensayo Cántabro refleja que para cualquiera de los contenidos de RAP utilizados las mezclas tienen buena cohesión y adhesividad, con unas pérdidas por desgaste muy inferiores a las máximas admitidas en el PG-3 de la Orden FOM 891/2004, siendo la mezcla del 10% de RAP la que presenta mayores prestaciones para cualquiera de los contenidos de betún utilizados.
- La presencia de RAP rigidiza la mezcla. A mayor porcentaje de RAP mayor resistencia a tracción indirecta.

- El ensayo Fénix pone de manifiesto como aumenta la rigidez y la fragilidad al incrementarse el contenido de RAP y como se invierte esta tendencia al aumentar el contenido de betún para cada una de las mezclas.

Para estudiar la resistencia a fisuración se observan comportamientos muy distintos entre bajos y altos contenidos de betún:

- Para contenidos bajos de betún del 4,75 al 5,25% la energía disipada de las mezclas es muy similar, a excepción de la mezcla con un 40% de RAP. Esta última presenta una energía disipada mayor debido a que presenta una carga de rotura superior aunque con un desplazamiento a rotura ligeramente inferior a las otras mezclas. Con la presencia de RAP las mezclas pierden tenacidad, pero no existen grandes diferencias entre distintos porcentajes de material reciclado.
- Para un elevado contenido de betún próximo al 5,75% la mezcla patrón (0%RAP) presenta una energía disipada y una tenacidad mayor, es decir, se precisa más energía para separar los componentes de la mezcla y llegar a la rotura. Con este contenido de betún a mayor porcentaje de RAP la tenacidad baja en mayor medida que para contenidos bajos de ligante, y las energías disipadas son muy similares.

Para un mismo porcentaje de material reciclado a medida que se incrementa el contenido de ligante la mezcla se hace más tenaz y más dúctil.

El contenido óptimo de betún se acota mediante el contenido de huecos (>12%) y la resistencia conservada (>90%) y se comprueba a partir de los resultados de las deformaciones plásticas. Las mezclas con elevada presencia de material reciclado "RAP" (20% y 40%) son las que más se alejan de las especificaciones del PG-3, por lo que el contenido de ligante óptimo está mucho más acotado.

Cuando la mezcla contiene un 40% de material reciclado, un contenido de betún mayor al 5% s.m cierra mucho la mezcla y el contenido de huecos es inferior al 12%; pero a la vez, para contenidos bajos de betún (próximos al 4,75% s.m) la sensibilidad al agua es muy alta con una resistencia conservada inferior al 90%. Por lo tanto, el contenido óptimo de ligante debe estar próximo al 5% s.m.

Para mezclas con un 20% de RAP la sensibilidad al agua nos marca el contenido de ligante en una cantidad superior al 4,8% s.m.

Para mezclas con bajo contenido de RAP, 10%, el contenido de betún vendrá fijado por las deformaciones plásticas. Se propone para la mezcla patrón y del 10 % un valor del 4,8% al 5%.

Tras ejecutar los primeros ensayos de Pista (mezcla patrón) se observa que las mezclas son algo deformables y no alcanzan las especificaciones del PG-3 con una pendiente media de deformación superior a 0,07 mm. Por esta razón se retocan ligeramente las fórmulas de trabajo incrementando el contenido de finos y filler. Se aumenta así el porcentaje que pasa por tamiz UNE 2 del 18 al 20% y el porcentaje que pasa por el tamiz UNE 0,063 del 4 al 6%. Esta fórmula se propone para la fabricación

en planta. Todos los resultados de los ensayos obtenidos hasta el momento siguen teniendo validez debido a que se sabe que estas nuevas formulaciones estarán del lado de la seguridad respecto a la sensibilidad al agua y a la resistencia a la disgregación.

El contenido óptimo de betún que se propone para estas formulas de trabajo son:

- FTP2 - 0%RAP con un contenido de betún del 4,9% s.m.
- FT2 - 10%RAP con un contenido de betún del 4,9% s.m.
- FT2 - 20%RAP con un contenido de betún del 5% s.m.
- FT2 - 40%RAP con un contenido de betún del 5% s.m.

Para comprobar la resistencia a rodadura de las fórmulas propuestas, se decide reproducir las granulometrías obtenidas en planta pero con los porcentajes de betún propuestos en laboratorio y ligeramente superiores a los obtenidos en planta de forma que estaremos del lado de la seguridad para las deformaciones plásticas.

El ensayo de rodadura no se ha realizado en la mezcla FT2-40% de RAP debido a que no es posible su fabricación en una planta convencional ya que los requerimientos de calentamiento de los áridos son muy elevados.

Los resultados del ensayo de rodadura nos permiten afirmar que las mezclas diseñadas cumplen con las exigencias del PG-3 y se pueden fabricar en una planta convencional.

Cabe recordar que esta tesina es pionera en el empleo de material reciclado en mezclas BBTM 11B para capa de rodadura; por lo tanto, los resultados obtenidos no se pueden considerar definitivos, pero si orientativos para próximas investigaciones en este tipo de mezcla.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, S. "Et al". (2010). Fracture Characterization of Gap-Graded Asphalt Mixtures and Thin Bonded Wearing Courses. *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp. 128-134. Chinese Society of Pavement Engineering. 2010.

Celauro C., Celauro B., Boscaino G., (2009). Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54, pp. 337-347. 2009.

Del Pozo, J. (1998). Experiencia de ACESA en las mezclas discontinuas en caliente para capas finas. *Carreteras*, Vol. 96, pp.34-45.1998.

Don Brock, J. "Et al". (2007). Milling and Recycling . *Technical Paper T-127*, ASTEC, pp. 1-36. 2007.

EAPA (2007). *Asphalt in Figures* . European Asphalt Pavement Association. 2007.

Fontes, L. "Et al". (2010). Evaluating Permanent Deformation in Asphalt Rubber Mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp.1193-1200. 2010.

García Serrada, C. et al. (2008). Propiedades Acústicas Intrínsecas de los Asfaltos. Comparación de los Aglomerados fabricados con y sin Polvo de Neumático. *III Jornada Técnica ASEFMA*, pp. 25-41. Madrid. 2008.

Gordillo, J. (1997). Microaglomerados en caliente. Evolución, tipos, características y campos de aplicación. *Carreteras*, Vol. 91, pp. 24-43.1997.

Gruas, J.M, "Et al". (2009). *Efecto de utilización de mezclas bituminosas con polvo de neumático sobre las características funcionales de un pavimento*. Tesina especialidad ETSCCPB. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. 2009.

Kennedy, Thomas W. (1977). Characterization of asphalt pavement materials using the indirect test. En *Proceedings Association of Asphalt Paving Technical Sessions*, pp. 133-150. San Antonio, Texas: The Association of Asphalt Paving Technologists.1977.

Kraemer, C. "Et al". (2004). *Ingeniería de Carreteras, Volumen II*. Madrid: Mc Graw Hill. 2004.

Lorenzo, A. (2002). *Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo BTD. Efecto del tipo y contenido de betún*. Tesina especialidad ETSCCPB. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. 2002.

Martínez, A. (2000). *Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución*. Tesis doctoral ETSCCPB. Barcelona. 2000.

McDaniel, R., "Et al". (2000). *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method*. Obtenido de NCHRP Web Document 30 (Project D9-12): Contractor's Final Report. 2000.

Miró, R. (2006). *Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad*. Cátedra Mariano López Navarro, pp. 1-38. Zaragoza. 2006.

Mucinis D. et al., (2008). The possibility of using reclaimed asphalt pavement (RAP) in hot mix asphalt Lithuania. *7th International Conference, Faculty of Environmental Engineering, Vilnius Geminas Technical University*. Lithuania. 2008.

National Asphalt Pavement Association. (2007). *Recycling Hot Mix Asphalt Pavements*. Lanham: National Asphalt Pavement Association. 2007.

Newcomb, D. E, E.R. Brown, and J.A. Epps. (2007). Designing HMA Mixtures with High RAP Content. A Practical Guide. *Quality Improvement Series, 124 National Asphalt Pavement Association*, vol. 36. 2007.

Pérez, F. "Et al". (2004). Design and performance of hot mix asphalt with high percentages of reclaimed asphalt: approach followed in the paramix project. En *3º Eurasphalt and Eurobitume Congress*, pp. 447-459. Vienna. 2004.

Pérez, F. "Et al". (2009). Evaluación de la Resistencia a la fisuración en mezclas bituminosas mediante la utilización del ensayo Fénix. *Jornada Nacional, Comunicación 23*, pp. 333-342. ASEFMA. 2009

Pérez, F. "Et al". (2008). Variability Study of Hot-Mix Asphalt with High Rates of Reclaimed Asphalt Pavement. *Revista de la Construcción*, Vol.7, pp. 60-71. 2008.

Pérez, F., Martínez, A., Rubio, B., Jiménez, R. (2009). Assessment of moisture effect on open graded mixes using water sensitivity and Cántabro after immersion tests. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*. 2009.

Pérez, F., Miró, R; Martínez, A. (2004). *Proyecto Paramix. Investigación sobre reciclado de pavimentos*. 2004.

PG-3. (2008). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes*. Madrid. 2008.

PG-4. (2001). Reciclado en Central en Caliente de Capas Bituminosas. En D. G. Carreteras, *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4)*. 2001.

### **OTRA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

Torrentó Serra, L. (2009). *Disseny i Caracterització mecànica de mesclades bituminoses semicalentes*. Tesina d'especialitat, ETSCCPB, UPC, Barcelona. 2009.

Normas Europeas UNE-EN. Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.

## **ANEJO 1**

### ***DENSIDADES Y CONTENIDO DE HUECOS***

En el presente anejo se presentan los valores de las alturas, densidades y huecos de cada una de las probetas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB.

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

### Proyecto OASIS II

Mezcla: FTP-0% RAP

Betún: 4,75 % S.M.

Nº Probeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Altura 1	67,1	67,5	66,7	67,5	66,0	67,6	66,4	66,8	66,8	66,9	66,9	67,3	67,2	66,9	66,2	66,9	66,9	
Altura 2	68,9	66,8	67,3	67,5	66,2	67,6	66,5	67,0	66,9	67,3	67,1	67,3	67,3	67,1	66,0	67,0	66,7	
Altura 3	66,8	67,1	67,0	67,2	65,9	67,8	66,5	66,6	66,6	66,9	66,9	67,2	66,9	67,2	66,3	66,7	66,5	
Altura media	67,6	67,1	67,0	67,4	66,0	67,7	66,5	66,8	66,8	67,0	67,0	67,3	67,1	67,1	66,2	66,9	66,7	
Volumen	548,06	544,27	543,19	546,43	535,35	548,60	538,87	541,57	541,30	543,46	542,92	545,35	544,27	543,73	536,44	542,11	540,76	
Peso	1133,6	1139,3	1144,7	1128,9	1113,5	1163,7	1135,5	1130,5	1133,3	1156,4	1144,2	1140,5	1135,7	1175,5	1138,9	1142,8	1144,1	
Densidad	<b>2,068</b>	<b>2,093</b>	<b>2,107</b>	<b>2,066</b>	<b>2,080</b>	<b>2,121</b>	<b>2,107</b>	<b>2,087</b>	<b>2,094</b>	<b>2,128</b>	<b>2,107</b>	<b>2,091</b>	<b>2,087</b>	<b>2,162</b>	<b>2,123</b>	<b>2,108</b>	<b>2,116</b>	
%PM	Betún (b)	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	
	Aridos (r=100-b)	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	95,25	
D	Aparente (f)	2,068	2,093	2,107	2,066	2,080	2,121	2,107	2,087	2,094	2,128	2,107	2,091	2,087	2,162	2,123	2,108	2,116
	P.e.áridos	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33
	b/P.e.betún (q)	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117
	v+q (s)	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942	39,942
	100/s (g)	2,504	2,504	2,5036	2,5036	2,5036	2,5036	2,5036	2,5036	2,504	2,504	2,5036	2,5036	2,5036	2,5036	2,5036	2,5036	2,5036
V	100*f/g (z)	82,62	83,61	84,172	82,517	83,076	84,726	84,165	83,376	83,625	84,99	84,177	83,53	83,344	86,351	84,8	84,2	84,506
%H	Mezcla (100-z)	<b>17,4</b>	<b>16,4</b>	<b>15,8</b>	<b>17,5</b>	<b>16,9</b>	<b>15,3</b>	<b>15,8</b>	<b>16,6</b>	<b>16,4</b>	<b>15,0</b>	<b>15,8</b>	<b>16,5</b>	<b>16,7</b>	<b>13,6</b>	<b>15,2</b>	<b>15,8</b>	<b>15,5</b>
Promedio Densidad (g/cm3)																	<b>2,103</b>	
Promedio % huecos																	<b>16,0</b>	

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

### Proyecto OASIS II

Mezcla: FTP-0% RAP

Betún: 5,25 % S.M.

Nº Probeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Altura 1	67,2	66,9	67,2	67,1	66,6	67,6	67,6	66,7	67,3	67,2	66,6	66,9	67,8	67,4	66,3	65,4	66,3	
Altura 2	67,0	66,6	67,2	67,0	66,6	67,6	67,2	66,7	67,3	67,5	66,7	67,3	67,6	67,7	66,5	65,9	66,2	
Altura 3	67,2	66,8	67,3	67,2	66,9	67,8	67,3	66,9	67,2	67,5	66,7	67,3	68,0	67,7	66,5	65,8	66,3	
Altura media	67,1	66,8	67,2	67,1	66,7	67,7	67,4	66,8	67,3	67,4	66,7	67,2	67,8	67,6	66,4	65,7	66,3	
Volumen	544,27	541,30	545,08	544,00	540,76	548,60	546,16	541,30	545,35	546,43	540,49	544,54	549,68	548,06	538,60	532,65	537,25	
Peso	1132,2	1138,6	1156,0	1150,7	1144,2	1152,1	1160,1	1145,8	1143,6	1144,7	1137,8	1157,4	1156,1	1152,1	1144,6	1157,4	1146,4	
Densidad	<b>2,080</b>	<b>2,103</b>	<b>2,121</b>	<b>2,115</b>	<b>2,116</b>	<b>2,100</b>	<b>2,124</b>	<b>2,117</b>	<b>2,097</b>	<b>2,095</b>	<b>2,105</b>	<b>2,125</b>	<b>2,103</b>	<b>2,102</b>	<b>2,125</b>	<b>2,173</b>	<b>2,134</b>	
%PM	Betún (b)	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	
	Aridos (r=100-b)	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	94,75	
D	Aparente (f)	2,080	2,103	2,121	2,115	2,116	2,100	2,124	2,117	2,097	2,095	2,105	2,125	2,103	2,102	2,125	2,173	2,134
	P.e.áridos	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145	35,145
	b/P.e.betún (q)	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971
	v+q (s)	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242	40,242
	100/s (g)	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485	2,485
V	100*f/g (z)	83,71	84,65	85,344	85,121	85,148	84,511	85,477	85,182	84,386	84,301	84,714	85,532	84,638	84,594	85,52	87,441	85,87
%H	Mezcla (100-z)	<b>16,3</b>	<b>15,4</b>	<b>14,656</b>	<b>14,879</b>	<b>14,852</b>	<b>15,489</b>	<b>14,5</b>	<b>14,8</b>	<b>15,614</b>	<b>15,699</b>	<b>15,286</b>	<b>14,468</b>	<b>15,362</b>	<b>15,406</b>	<b>14,5</b>	<b>12,6</b>	<b>14,1</b>
Promedio Densidad (g/cm3)																	<b>2,114</b>	
Promedio % huecos																	<b>14,9</b>	

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

### Proyecto OASIS II

Mezcla: FTP-0% RAP

Betún: 5,75 % S.M.

Nº Probeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Altura 1	67,0	66,4	66,4	66,8	66,2	66,6	66,8	66,8	67,1	67,5	67,5	67,2	67,5	66,6	66,1	66,3	66,6	
Altura 2	66,6	66,6	66,7	66,6	66,6	66,8	66,8	66,8	67,4	67,7	67,8	66,8	67,2	66,8	66,3	66,2	66,6	
Altura 3	66,4	66,9	66,6	66,7	66,7	66,5	67,2	67,1	67,1	67,9	67,9	67,3	67,2	66,7	66,8	66,8	66,3	
Altura media	66,7	66,6	66,6	66,7	66,5	66,6	66,9	66,9	67,2	67,7	67,7	67,1	67,3	66,7	66,4	66,4	66,5	
Volumen	540,49	540,22	539,68	540,76	539,14	540,22	542,65	542,38	544,8	548,9	549,1	544,0	545,6	540,8	538,33	538,60	539,14	
Peso	1135,4	1140,5	1143,8	1152,4	1142,0	1142,3	1151,2	1159,2	1136,7	1152,3	1156,4	1157,5	1160,6	1151,8	1140,0	1145,4	1144,5	
Densidad	<b>2,101</b>	<b>2,111</b>	<b>2,119</b>	<b>2,131</b>	<b>2,118</b>	<b>2,115</b>	<b>2,121</b>	<b>2,137</b>	<b>2,086</b>	<b>2,099</b>	<b>2,106</b>	<b>2,128</b>	<b>2,127</b>	<b>2,130</b>	<b>2,118</b>	<b>2,127</b>	<b>2,123</b>	
%PM	Betún (b)	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	
	Aridos (r=100-b)	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	94,25	
D	Aparente (f)	2,101	2,111	2,119	2,131	2,118	2,115	2,121	2,137	2,086	2,099	2,106	2,128	2,127	2,130	2,118	2,127	2,123
	P.e.áridos	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696	2,696
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959	34,959
	b/P.e.betún (q)	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825
	v+q (s)	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542	40,542
	100/s (g)	2,467	2,467	2,4666	2,4666	2,4666	2,4666	2,4666	2,4666	2,467	2,467	2,4666	2,4666	2,4666	2,4666	2,4666	2,4666	2,4666
V	100*f/g (z)	85,166	85,591	85,925	86,398	85,875	85,726	86,007	86,648	84,586	85,114	85,375	86,263	86,237	86,353	85,854	86,217	86,063
%H	Mezcla (100-z)	<b>14,834</b>	<b>14,409</b>	<b>14,075</b>	<b>13,602</b>	<b>14,125</b>	<b>14,274</b>	<b>14,0</b>	<b>13,4</b>	<b>15,414</b>	<b>14,886</b>	<b>14,625</b>	<b>13,737</b>	<b>13,763</b>	<b>13,647</b>	<b>14,1</b>	<b>13,8</b>	<b>13,9</b>
Promedio Densidad (g/cm3)																	<b>2,117</b>	
Promedio % huecos																	<b>14,2</b>	

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

## Proyecto Oasis II

Mezcla: FT1-10%RAP

Betún: 4,75 % S.M.

NºProbeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Altura 1	65,3	65,8	65,5	65,5	65,0	65,6	65,4	65,4	65,8	65,3	66,5	65,7	65,8	65,6	
Altura 2	64,7	65,6	65,9	65,8	65,6	65,8	65,8	65,6	65,9	65,4	66,0	66,1	65,9	65,9	
Altura 3	65,2	66,0	65,5	65,7	65,4	66,1	65,4	65,3	66,1	65,1	66,3	65,6	65,8	65,6	
Altura media	65,1	65,8	65,6	65,7	65,3	65,8	65,5	65,4	65,9	65,3	66,3	65,8	65,8	65,7	
Volumen	527,52	533,46	532,11	532,38	529,68	533,73	531,30	530,49	534,54	529,14	537,25	533,46	533,73	532,65	
Peso	1122,8	1137,5	1143,8	1139,0	1142,1	1140,6	1134,9	1128,9	1147,8	1143,1	1149,4	1134,0	1144,7	1131,0	
Densidad	<b>2,128</b>	<b>2,132</b>	<b>2,150</b>	<b>2,139</b>	<b>2,156</b>	<b>2,137</b>	<b>2,136</b>	<b>2,128</b>	<b>2,147</b>	<b>2,160</b>	<b>2,139</b>	<b>2,126</b>	<b>2,145</b>	<b>2,123</b>	
%PM	Betún (b)	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	
	Aridos ( $r=100-b$ )*0,90	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	85,725	
	RAP ( $rap=100-b$ )*0,10	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	
D	Aparente (f)	2,128	2,132	2,150	2,139	2,156	2,137	2,136	2,128	2,147	2,160	2,139	2,126	2,145	2,123
	P.e.áridos	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	
	P e RAP	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
	r/P.e.áridos (v)	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	31,844	
	rap/P e RAP(k)	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	3,5278	
	b/P.e.betún (q)	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	
	v+q+k (s)	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	39,984	
	100/s (g)	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	2,501	
V	100*f/g (z)	85,10	85,26	85,947	85,543	86,213	85,446	85,408	85,087	85,855	86,377	85,542	84,995	85,753	84,899
%H	Mezcla (100-z)	<b>14,9</b>	<b>14,7</b>	<b>14,1</b>	<b>14,5</b>	<b>13,8</b>	<b>14,6</b>	<b>14,6</b>	<b>14,9</b>	<b>14,1</b>	<b>13,6</b>	<b>14,5</b>	<b>15,0</b>	<b>14,2</b>	<b>15,1</b>
Promedio Densidad (g/cm <sub>3</sub> )														<b>2,139</b>	
Promedio % huecos														<b>14,5</b>	

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

## Proyecto Oasis II

Mezcla: FT1-10%RAP

Betún: 5,25 % S.M.

Nº Probeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Altura 1	65,1	65,3	65,7	64,9	64,7	65,0	66,8	65,6	65,1	65,2	65,6	65,0	65,8	66,0
Altura 2	65,0	65,6	65,1	65,4	65,1	65,7	66,5	65,0	64,8	65,1	65,9	65,0	66,0	65,9
Altura 3	65,3	65,1	64,7	65,0	64,7	64,9	66,1	65,3	65,2	65,2	65,6	65,3	66,2	66,4
Altura media	65,1	65,3	65,2	65,1	64,8	65,2	66,5	65,3	65,0	65,2	65,7	65,1	66,0	66,1
Volumen	528,06	529,68	528,33	527,79	525,63	528,60	538,87	529,41	527,25	528,33	532,65	527,79	535,08	535,90
Peso	1136,4	1142,1	1142,0	1139,9	1143,6	1136,0	1161,5	1144,3	1137,5	1144,4	1143,5	1141,7	1140,6	1157,8
Densidad	<b>2,152</b>	<b>2,156</b>	<b>2,162</b>	<b>2,160</b>	<b>2,176</b>	<b>2,149</b>	<b>2,155</b>	<b>2,161</b>	<b>2,157</b>	<b>2,166</b>	<b>2,147</b>	<b>2,163</b>	<b>2,132</b>	<b>2,160</b>
<b>%PM</b>	<b>Betún (b)</b>	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
	<b>Aridos (r=100-b)*0,9</b>	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275	85,275
	<b>RAP (rap=100-b)*0,1</b>	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475	9,475
<b>D</b>	<b>Aparente (f)</b>	2,152	2,156	2,162	2,160	2,176	2,149	2,155	2,161	2,157	2,166	2,147	2,163	2,132
	<b>P.e.áridos</b>	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692
	<b>P e RAP</b>	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
	<b>P.e.betún</b>	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	<b>r/P.e.áridos (v)</b>	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677	31,677
	<b>rap/P e RAP(k)</b>	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093	3,5093
	<b>b/P.e.betún (q)</b>	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971
	<b>v+q+k (s)</b>	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284	40,284
	<b>100/s (g)</b>	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824	2,4824
<b>V</b>	<b>100*f/g (z)</b>	86,69	86,86	87,074	87,003	87,645	86,573	86,829	87,071	86,909	87,257	86,481	87,141	85,869
<b>%H</b>	<b>Mezcla (100-z)</b>	<b>13,3</b>	<b>13,1</b>	<b>12,9</b>	<b>13,0</b>	<b>12,4</b>	<b>13,4</b>	<b>13,2</b>	<b>12,9</b>	<b>13,1</b>	<b>12,7</b>	<b>13,5</b>	<b>12,9</b>	<b>14,1</b>
	<b>Promedio Densidad (g/cm<sub>3</sub>)</b>													<b>2,157</b>
	<b>Promedio % huecos</b>													<b>13,1</b>

**CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS**

**Proyecto Oasis II**

**Mezcla:** FT1-10%RAP    **Betún:** 5,75 % S.M.

Nº Probeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Altura 1	65,6	65,7	65,4	66,4	65,5	65,6	65,6	65,3	65,7	66,1	66,3	66,1	65,7	65,4
Altura 2	65,4	65,9	65,5	66,1	65,4	65,9	65,7	65,2	65,6	65,7	66,1	65,8	65,7	65,8
Altura 3	65,7	65,7	65,8	66,3	65,3	65,9	65,9	65,5	65,6	65,9	66,1	65,8	65,9	65,7
Altura media	65,6	65,8	65,6	66,3	65,4	65,8	65,7	65,3	65,6	65,9	66,2	65,9	65,8	65,6
Volumen	531,57	533,19	531,57	537,25	530,22	533,46	532,92	529,68	532,11	534,27	536,44	534,27	533,19	532,11
Peso	1137,5	1149,1	1137,5	1147,4	1157,9	1153,3	1155,5	1138,6	1155,7	1136,8	1169,6	1153,5	1161,3	1144,8
Densidad	<b>2,140</b>	<b>2,155</b>	<b>2,140</b>	<b>2,136</b>	<b>2,184</b>	<b>2,162</b>	<b>2,168</b>	<b>2,150</b>	<b>2,172</b>	<b>2,128</b>	<b>2,180</b>	<b>2,159</b>	<b>2,178</b>	<b>2,151</b>
<b>%PM</b>														
Betún (b)	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75
Aridos ( $r=100-b$ )*0,9	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825	84,825
RAP ( $rap=100-b$ )*0,1	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425	9,425
<b>D</b>														
Aparente (f)	2,140	2,155	2,140	2,136	2,184	2,162	2,168	2,150	2,172	2,128	2,180	2,159	2,178	2,151
P.e.áridos	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692	2,692
P e RAP	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
r/P.e.áridos (v)	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51
rap/P e RAP(k)	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907	3,4907
b/P.e.betún (q)	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825
v+q+k (s)	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583	40,583
100/s (g)	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641	2,4641
<b>V</b>														
100*f/g (z)	86,84	87,46	86,843	86,674	88,626	87,738	87,994	87,238	88,143	86,351	88,484	87,62	88,391	87,312
<b>%H</b>														
Mezcla (100-z)	<b>13,2</b>	<b>12,5</b>	<b>13,2</b>	<b>13,3</b>	<b>11,4</b>	<b>12,3</b>	<b>12,0</b>	<b>12,8</b>	<b>11,9</b>	<b>13,6</b>	<b>11,5</b>	<b>12,4</b>	<b>11,6</b>	<b>12,7</b>
Promedio Densidad (g/cm <sub>3</sub> )														<b>2,157</b>
Promedio % huecos														<b>12,4</b>

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

## Proyecto Oasis II

Mezcla: FT1-20%RAP

Betún: 4,75 % S.M.

Nº Probeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Altura 1	65,4	65,2	65,2	64,8	65,3	66,3	65,4	66,9	65,2	66,3	65,6	66,0	66,1	65,6	
Altura 2	65,9	65,6	65,6	65,2	65,4	65,9	65,4	66,7	65,6	66,3	65,8	66,4	66,7	66,0	
Altura 3	65,4	65,3	65,6	64,9	65,5	66,1	65,4	66,4	65,4	66,0	65,5	66,1	66,4	65,6	
Altura media	65,6	65,4	65,5	65,0	65,4	66,1	65,4	66,7	65,4	66,2	65,6	66,2	66,4	65,7	
Volumen	531,57	529,95	530,76	526,71	530,22	535,90	530,22	540,49	530,22	536,71	532,11	536,44	538,33	532,92	
Peso	1122,8	1134,2	1132,2	1135,3	1120,0	1135,2	1133,9	1148,2	1127,9	1154,2	1131,3	1131,0	1131,4	1120,4	
Densidad	<b>2,112</b>	<b>2,140</b>	<b>2,133</b>	<b>2,155</b>	<b>2,112</b>	<b>2,118</b>	<b>2,139</b>	<b>2,124</b>	<b>2,127</b>	<b>2,151</b>	<b>2,126</b>	<b>2,108</b>	<b>2,102</b>	<b>2,102</b>	
%PM	Betún (b)	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	
	Aridos ( $r=100-b$ )*0,8	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	
	RAP ( $rap=100-b$ )*0,2	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	
D	Aparente (f)	2,112	2,140	2,133	2,155	2,112	2,118	2,139	2,124	2,127	2,151	2,126	2,108	2,102	2,102
	P.e.áridos	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	
	P e RAP	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
	r/P.e.áridos (v)	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	28,369	
	rap/P e RAP(k)	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	7,0556	
	b/P.e.betún (q)	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	
	v+q+k (s)	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	40,037	
	100/s (g)	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	2,4977	
V	100*f/g (z)	84,57	85,69	85,405	86,297	84,57	84,81	85,62	85,052	85,167	86,1	85,12	84,411	84,145	84,172
%H	Mezcla (100-z)	<b>15,4</b>	<b>14,3</b>	<b>14,6</b>	<b>13,7</b>	<b>15,4</b>	<b>15,2</b>	<b>14,4</b>	<b>14,9</b>	<b>14,8</b>	<b>13,9</b>	<b>14,9</b>	<b>15,6</b>	<b>15,9</b>	<b>15,8</b>
Promedio Densidad (g/cm <sub>3</sub> )													<b>2,125</b>		
Promedio % huecos													<b>14,9</b>		

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

## Proyecto Oasis II

Mezcla: FT1-20%RAP

Betún: 5,25 % S.M.

Nº Probeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Altura 1	64,9	64,9	65,5	65,9	65,5	65,2	65,4	65,2	65,8	65,1	65,4	65,6	65,6	65,1	
Altura 2	65,0	64,9	65,6	66,1	65,4	65,1	65,5	65,4	66,0	65,1	65,1	65,6	65,2	64,8	
Altura 3	64,8	64,8	65,3	65,6	65,1	64,8	65,0	65,0	65,7	65,0	64,9	65,4	65,1	64,7	
Altura media	64,9	64,9	65,5	65,9	65,3	65,0	65,3	65,2	65,8	65,1	65,1	65,5	65,3	64,9	
Volumen	526,17	525,90	530,76	534,00	529,68	527,25	529,41	528,60	533,73	527,52	528,06	531,30	529,41	525,90	
Peso	1127,2	1128,2	1148,4	1143,3	1136,0	1146,9	1131,5	1140,3	1138,9	1140,3	1128,9	1151,9	1139,1	1140,6	
Densidad	<b>2,142</b>	<b>2,145</b>	<b>2,164</b>	<b>2,141</b>	<b>2,145</b>	<b>2,175</b>	<b>2,137</b>	<b>2,157</b>	<b>2,134</b>	<b>2,162</b>	<b>2,138</b>	<b>2,168</b>	<b>2,152</b>	<b>2,169</b>	
<b>%PM</b>	<b>Betún (b)</b>	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	
	<b>Aridos (r=100-b)*0,8</b>	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	75,8	
	<b>RAP (rap=100-b)*0,2</b>	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	18,95	
<b>D</b>	<b>Aparente (f)</b>	2,142	2,145	2,164	2,141	2,145	2,175	2,137	2,157	2,134	2,162	2,138	2,168	2,152	2,169
	<b>P.e.áridos</b>	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	
	<b>P e RAP</b>	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	
	<b>P.e.betún</b>	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
	<b>r/P.e.áridos (v)</b>	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	28,22	
	<b>rap/P e RAP(k)</b>	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	7,0185	
	<b>b/P.e.betún (q)</b>	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	
	<b>v+q+k (s)</b>	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	40,336	
	<b>100/s (g)</b>	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	2,4792	
<b>V</b>	<b>100*f/g (z)</b>	86,41	86,53	87,275	86,359	86,508	87,741	86,21	87,013	86,071	87,192	86,232	87,451	86,789	87,484
<b>%H</b>	<b>Mezcla (100-z)</b>	<b>13,6</b>	<b>13,5</b>	<b>12,7</b>	<b>13,6</b>	<b>13,5</b>	<b>12,3</b>	<b>13,8</b>	<b>13,0</b>	<b>13,9</b>	<b>12,8</b>	<b>13,8</b>	<b>12,5</b>	<b>13,2</b>	<b>12,5</b>
	<b>Promedio Densidad (g/cm<sub>3</sub>)</b>													<b>2,152</b>	
	<b>Promedio % huecos</b>													<b>13,2</b>	

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

## Proyecto Oasis II

Mezcla: FT1-20%RAP

Betún: 5,75 % S.M.

REFERENCIA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Altura 1		64,8	65,0	65,1	65,3	65,9	65,6	64,9	65,1	65,7	65,1	65,7	65,8	65,3	65,6
Altura 2		64,5	65,5	65,4	65,6	66,1	65,9	65,3	65,6	65,7	65,1	65,9	65,4	65,3	65,5
Altura 3		64,7	65,1	65,5	65,5	65,9	65,8	65,5	65,5	65,4	64,8	65,5	65,9	65,2	65,5
Altura media		64,7	65,2	65,3	65,5	66,0	65,8	65,2	65,4	65,6	65,0	65,7	65,7	65,3	65,5
Volumen		524,27	528,60	529,68	530,76	534,81	533,19	528,87	530,22	531,84	526,98	532,65	532,65	529,14	531,30
Peso		1126,7	1144,7	1147,9	1145,1	1145,8	1144,7	1135,4	1144,3	1146,6	1145,7	1142,7	1129,3	1146,6	1145,6
Densidad		<b>2,149</b>	<b>2,166</b>	<b>2,167</b>	<b>2,158</b>	<b>2,142</b>	<b>2,147</b>	<b>2,147</b>	<b>2,158</b>	<b>2,156</b>	<b>2,174</b>	<b>2,145</b>	<b>2,120</b>	<b>2,167</b>	<b>2,156</b>
%PM	Betún (b)	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75
	Aridos ( $r=100-b$ )*0,8	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4
	RAP ( $rap=100-b$ )*0,2	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85	18,85
D	Aparente (f)	2,149	2,166	2,167	2,158	2,142	2,147	2,147	2,158	2,156	2,174	2,145	2,120	2,167	2,156
	P.e.áridos	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686
	P e RAP	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071	28,071
	rap/P e RAP(k)	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815	6,9815
	b/P.e.betún (q)	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825
	v+q+k (s)	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635	40,635
	100/s (g)	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609	2,4609
V	100*f/g (z)	87,33	88,00	88,064	87,673	87,059	87,239	87,238	87,698	87,606	88,346	87,175	86,153	88,054	87,619
%H	Mezcla (100-z)	12,7	12,0	11,9	12,3	12,9	12,8	12,8	12,3	12,4	11,7	12,8	13,8	11,9	12,4
Promedio Densidad (g/cm <sub>3</sub> )															2,154
Promedio % huecos															12,5

**CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS**

**Proyecto Oasis II**

**Mezcla: FT1-40%RAP**

**Betún: 4,75 % S.M.**

		Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta					
NºProbeta		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Altura 1	63,5	63,2	63,3	63,5	64,1	63,3	63,2	63,3	64,2	63,9	63,8	64,3	63,9	63,2
	Altura 2	63,3	63,3	63,3	63,3	64,3	63,5	63,4	63,7	63,7	63,9	63,9	63,8	63,7	63,5
	Altura 3	63,5	63,1	63,2	63,0	63,8	63,8	63,0	63,7	63,9	63,4	63,2	63,8	63,5	63,1
	Altura media	63,4	63,2	63,3	63,3	64,1	63,5	63,2	63,6	63,9	63,7	63,6	64,0	63,7	63,3
	Volumen	514,28	512,38	512,92	512,92	519,41	515,09	512,38	515,36	518,33	516,71	515,90	518,60	516,44	512,92
	Peso	1117,5	1125,7	1128,3	1132,1	1132,6	1122,5	1130,2	1130,9	1130,4	1132,8	1127,2	1130,8	1125,3	1123,5
	Densidad	<b>2,173</b>	<b>2,197</b>	<b>2,200</b>	<b>2,207</b>	<b>2,181</b>	<b>2,179</b>	<b>2,206</b>	<b>2,194</b>	<b>2,181</b>	<b>2,192</b>	<b>2,185</b>	<b>2,180</b>	<b>2,179</b>	<b>2,190</b>
<b>%PM</b>	Betún (b)	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
	Aridos ( $r=100-b$ )*0,6	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15	57,15
	RAP ( $rap=100-b$ )*0,4	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1
<b>D</b>	Aparente (f)	2,173	2,197	2,200	2,207	2,181	2,179	2,206	2,194	2,181	2,192	2,185	2,180	2,179	2,190
	P.e.áridos	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676
	P e RAP	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357	21,357
	rap/P e RAP(k)	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111	14,111
	b/P.e.betún (q)	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117	4,6117
	v+q+k (s)	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079	40,079
	100/s (g)	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951	2,4951
	<b>V</b>	100*f/g (z)	87,09	88,05	88,164	88,461	87,395	87,343	88,406	87,95	87,407	87,867	87,57	87,392	87,331
<b>%H</b>															
	Mezcla (100-z)	<b>12,9</b>	<b>11,9</b>	<b>11,8</b>	<b>11,5</b>	<b>12,6</b>	<b>12,7</b>	<b>11,6</b>	<b>12,0</b>	<b>12,6</b>	<b>12,1</b>	<b>12,4</b>	<b>12,6</b>	<b>12,7</b>	<b>12,2</b>
	Promedio Densidad (g/cm <sub>3</sub> )														<b>2,189</b>
	Promedio % huecos														<b>12,3</b>

**CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS**

**Proyecto Oasis II**

**Mezcla: FT1-40%RAP**

**Betún: 5,25 % S.M.**

NºProbeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Altura 1	62,9	63,9	64,2	63,1	63,3	63,9	62,7	62,8	63,1	63,5	64,4	63,3	63,1	63,6	
Altura 2	62,9	63,7	63,7	63,4	63,2	63,9	62,7	62,6	62,9	63,7	64,3	62,9	63,3	63,6	
Altura 3	62,9	63,9	64,1	63,1	63,5	63,8	62,9	62,9	63,2	63,9	64,1	62,9	63,3	63,6	
Altura media	62,9	63,8	64,0	63,2	63,3	63,9	62,8	62,8	63,1	63,7	64,3	63,0	63,2	63,6	
Volumen	509,95	517,52	518,87	512,38	513,46	517,79	508,87	508,87	511,30	516,44	521,03	511,03	512,65	515,63	
Peso	1106,1	1141,2	1135,2	1131,4	1131,7	1135,5	1126,4	1136,9	1124,7	1123,1	1141,0	1132,2	1132,2	1136,3	
Densidad	<b>2,169</b>	<b>2,205</b>	<b>2,188</b>	<b>2,208</b>	<b>2,204</b>	<b>2,193</b>	<b>2,214</b>	<b>2,234</b>	<b>2,200</b>	<b>2,175</b>	<b>2,190</b>	<b>2,216</b>	<b>2,209</b>	<b>2,204</b>	
%PM	Betún (b)	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	
	Aridos ( $r=100-b$ )*0,6	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	56,85	
	RAP ( $rap=100-b$ )*0,4	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9	
D	Aparente (f)	2,169	2,205	2,188	2,208	2,204	2,193	2,214	2,234	2,200	2,175	2,190	2,216	2,209	2,204
	P.e.áridos	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676
	P e RAP	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244	21,244
	rap/P e RAP(k)	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037	14,037
	b/P.e.betún (q)	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971	5,0971
	v+q+k (s)	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379	40,379
	100/s (g)	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766	2,4766
V	100*f/g (z)	87,58	89,04	88,341	89,16	88,996	88,549	89,379	90,212	88,82	87,811	88,424	89,459	89,176	88,983
%H	Mezcla (100-z)	<b>12,4</b>	<b>11,0</b>	<b>11,7</b>	<b>10,8</b>	<b>11,0</b>	<b>11,5</b>	<b>10,6</b>	<b>9,8</b>	<b>11,2</b>	<b>12,2</b>	<b>11,6</b>	<b>10,5</b>	<b>10,8</b>	<b>11,0</b>
Promedio Densidad (g/cm <sub>3</sub> )														<b>2,200</b>	
Promedio % huecos														<b>11,1</b>	

**CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS**

**Proyecto Oasis II**

**Mezcla: FT1-40%RAP**

**Betún: 5,75 % S.M.**

NºProbeta	Cántabro						Fénix		Tracción Indirecta						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Altura 1	63,8	63,6	63,9	63,9	64,0	64,4	63,7	64,3	63,9	63,8	64,4	63,8	63,6	64,7	
Altura 2	63,6	63,4	63,9	64,1	64,1	64,2	63,9	64,0	63,8	64,1	64,4	63,9	63,7	64,8	
Altura 3	64,0	63,6	63,9	64,1	64,2	64,2	63,7	63,6	63,6	63,7	64,7	63,6	63,2	64,9	
Altura media	63,8	63,5	63,9	64,0	64,1	64,3	63,8	64,0	63,8	63,9	64,5	63,8	63,5	64,8	
Volumen	517,25	515,09	518,06	519,14	519,68	521,03	516,98	518,60	516,98	517,79	522,92	516,98	514,82	525,36	
Peso	1124,1	1130,3	1135,4	1133,2	1135,7	1139,8	1130,4	1136,3	1126,4	1128,4	1151,0	1122,0	1117,2	1165,7	
Densidad	<b>2,173</b>	<b>2,194</b>	<b>2,192</b>	<b>2,183</b>	<b>2,185</b>	<b>2,188</b>	<b>2,187</b>	<b>2,191</b>	<b>2,179</b>	<b>2,179</b>	<b>2,201</b>	<b>2,170</b>	<b>2,170</b>	<b>2,219</b>	
%PM	Betún (b)	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	
	Aridos (r=100-b)*0,6	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	56,55	
	RAP (rap=100-b)*0,4	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	
D	Aparente (f)	2,173	2,194	2,192	2,183	2,185	2,188	2,187	2,191	2,179	2,179	2,201	2,170	2,219	
	P.e.áridos	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	
	P e RAP	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
	r/P.e.áridos (v)	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	21,132	
	rap/P e RAP(k)	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	13,963	
	b/P.e.betún (q)	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	5,5825	
	v+q+k (s)	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	40,678	
	100/s (g)	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	2,4583	
	V	100*f/g (z)	88,40	89,26	89,151	88,793	88,896	88,986	88,944	89,129	88,629	88,648	89,535	88,283	88,275
%H	Mezcla (100-z)	<b>11,6</b>	<b>10,7</b>	<b>10,8</b>	<b>11,2</b>	<b>11,1</b>	<b>11,0</b>	<b>11,1</b>	<b>10,9</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>10,5</b>	<b>11,7</b>	<b>11,7</b>	<b>9,7</b>
Promedio Densidad (g/cm <sub>3</sub> )														<b>2,187</b>	
Promedio % huecos														<b>11,1</b>	

## **ANEJO 2**

### ***ENSAYO CÁNTABRO***

En el presente anejo se presentan los resultados del ensayo Cántabro de cada una de las probetas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB.

## ENSAYO CÁNTABRO

Mezcla: FTP-0%RAP

Betún	Temperatura	Referencia	Peso inicial	Peso final	Huecos	Densidad	Pérdidas	Promedio Pérdidas
%	°C	Probeta	(g)	(g)	%	(g/cm <sup>3</sup> )	%	%
4,75	25 Seco	1	1133,4	1090,1	17,3	2,068	3,8	4,0
		3	1144,5	1100,3	15,7	2,107	3,9	
		5	1113,4	1066,1	16,8	2,080	4,2	
	60 húmedo	2	1146,9	1048,5	16,3	2,093	8,6	8,4
		4	1136	1034,8	17,4	2,066	8,9	
		6	1169,2	1079,1	15,2	2,121	7,7	
5,25	25 Seco	1	1132,1	1082,3	16,2	2,080	4,4	3,5
		3	1155,8	1116,1	14,6	2,121	3,4	
		5	1144	1113,1	14,8	2,116	2,7	
	60 húmedo	2	1144,6	1087,2	15,3	2,103	5,0	5,4
		4	1155,2	1101	14,8	2,115	4,7	
		6	1156,3	1080,5	15,4	2,100	6,6	
5,75	25 Seco	1	1135,2	1105,1	14,8	2,101	2,7	2,7
		3	1143,5	1112,9	14,0	2,119	2,7	
		5	1141,7	1111,1	14,0	2,118	2,7	
	60 húmedo	2	1144,1	1096	14,3	2,111	4,2	3,9
		4	1155,6	1123,1	13,5	2,131	2,8	
		6	1147	1094,8	14,2	2,115	4,6	

## ENSAYO CÁNTABRO

Mezcla: FT1-10%RAP

Betún	Temperatura	Referencia	Peso inicial	Peso final	Huecos	Densidad	Pérdidas	Promedio Pérdidas
	°C	Probeta	(g)	(g)	%	(g/cm <sup>3</sup> )	%	%
4,75	25 Seco	1	1123,1	1080	14,9	2,128	3,8	3,7
		3	1144	1108,2	14,1	2,150	3,1	
		5	1142,3	1096,3	13,8	2,156	4,0	
	60 húmedo	2	1142,5	1077,1	14,7	2,132	5,7	5,9
		4	1143,9	1062,3	14,5	2,139	7,1	
		6	1147,2	1091	14,6	2,137	4,9	
5,25	25 Seco	1	1136,4	1098,8	13,3	2,152	3,3	3,5
		3	1142,1	1106,1	12,9	2,162	3,2	
		5	1143,7	1098,6	12,4	2,176	3,9	
	60 húmedo	2	1146,8	1085	13,1	2,156	5,4	4,7
		4	1144,4	1095,9	13,0	2,160	4,2	
		6	1140,8	1090,5	13,4	2,149	4,4	
5,75	25 Seco	1	1137,2	1106,1	13,2	2,140	2,7	2,5
		3	1137,6	1110,2	13,2	2,140	2,4	
		5	1157,8	1131,9	11,4	2,184	2,2	
	60 húmedo	2	1153,4	1120,4	12,5	2,155	2,9	2,9
		4	1151,9	1114,8	13,3	2,136	3,2	
		6	1156,4	1126,5	12,3	2,162	2,6	

## ENSAYO CÁNTABRO

Mezcla: FT1-20%RAP

Betún	Temperatura	Referencia	Peso inicial	Peso final	Huecos	Densidad	Pérdidas	Promedio Pérdidas
%	°C	Probeta	(g)	(g)	%	(g/cm <sup>3</sup> )	%	%
4,75	25 Seco	1	1123	1060,9	15,4	2,112	5,5	5,2
		3	1132,6	1078,4	14,6	2,133	4,8	
		5	1120,2	1060,2	15,4	2,112	5,4	
	60 húmedo	2	1140,2	1024,6	14,3	2,140	10,1	6,9
		4	1141,8	1085,5	13,7	2,155	4,9	
		6	1142,8	1076,9	15,2	2,118	5,8	
5,25	25 Seco	1	1127,5	1080,8	13,6	2,142	4,1	3,8
		3	1148,8	1110,3	12,7	2,164	3,4	
		5	1136,3	1093,4	13,5	2,145	3,8	
	60 húmedo	2	1133,9	1068,4	13,5	2,145	5,8	5,2
		4	1147,9	1084,7	13,6	2,141	5,5	
		6	1151,3	1101,1	12,3	2,175	4,4	
5,75	25 Seco	1	1126,7	1094,6	12,7	2,149	2,8	2,6
		3	1147,9	1120,2	11,9	2,167	2,4	
		5	1145,8	1118,3	12,9	2,142	2,4	
	60 húmedo	2	1148,6	1107,8	12,0	2,166	3,6	3,2
		4	1149,1	1111,5	12,3	2,158	3,3	
		6	1148,7	1117,8	12,8	2,147	2,7	

## ENSAYO CÁNTABRO

Mezcla: FT1-40%RAP

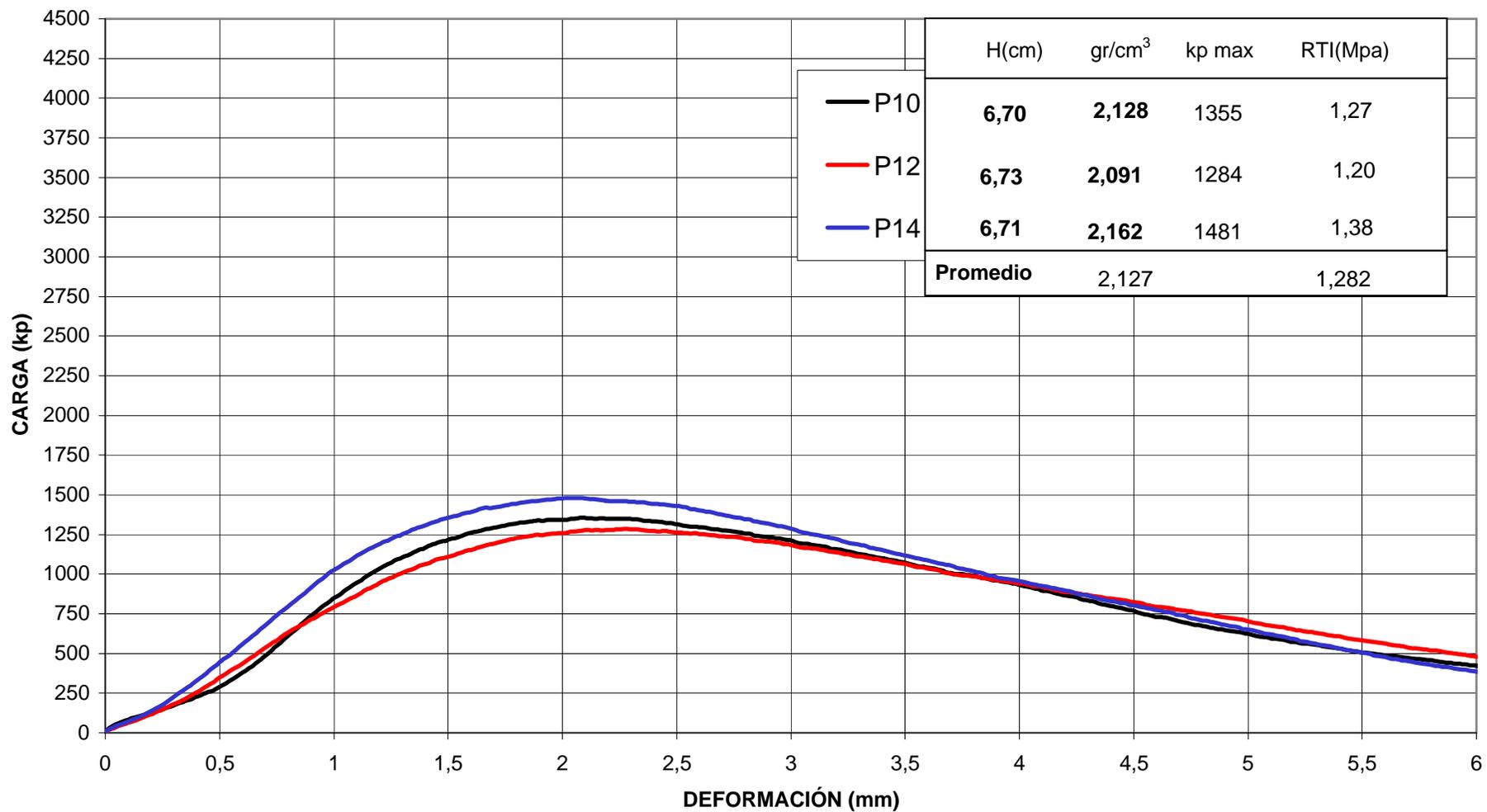
Bétun	Temperatura	Referencia	Peso inicial	Peso final	Huecos	Densidad	Pérdidas	Promedio Pérdidas
%	°C	Probeta	(g)	(g)	%	(g/cm3)	%	%
4,75	25 Seco	1	1117,6	1041,7	12,9	2,173	6,8	6,2
		3	1128,4	1062,8	11,8	2,200	5,8	
		5	1133,3	1066,2	12,6	2,181	5,9	
	60 húmedo	2	1130,2	1038,7	11,9	2,197	8,1	7,7
		4	1137,1	1048,6	11,5	2,207	7,8	
		6	1128,7	1046,5	12,7	2,179	7,3	
5,25	25 Seco	1	1106,2	1048,3	12,4	2,169	5,2	4,5
		3	1135,6	1093,7	11,7	2,188	3,7	
		5	1132	1081,4	11,0	2,204	4,5	
	60 húmedo	2	1144,5	1063,8	11,0	2,205	7,1	6,9
		4	1134,8	1057,3	10,8	2,208	6,8	
		6	1139,7	1062,9	11,5	2,193	6,7	
5,75	25 Seco	1	1124,4	1063,3	11,6	2,173	5,4	4,6
		3	1135,8	1098,4	10,8	2,192	3,3	
		5	1136,1	1079,4	11,1	2,185	5,0	
	60 húmedo	2	1134	1068,7	10,7	2,194	5,8	6,6
		4	1138,1	1041,6	11,2	2,183	8,5	
		6	1144,2	1079,8	11,0	2,188	5,6	

## **ANEJO 3**

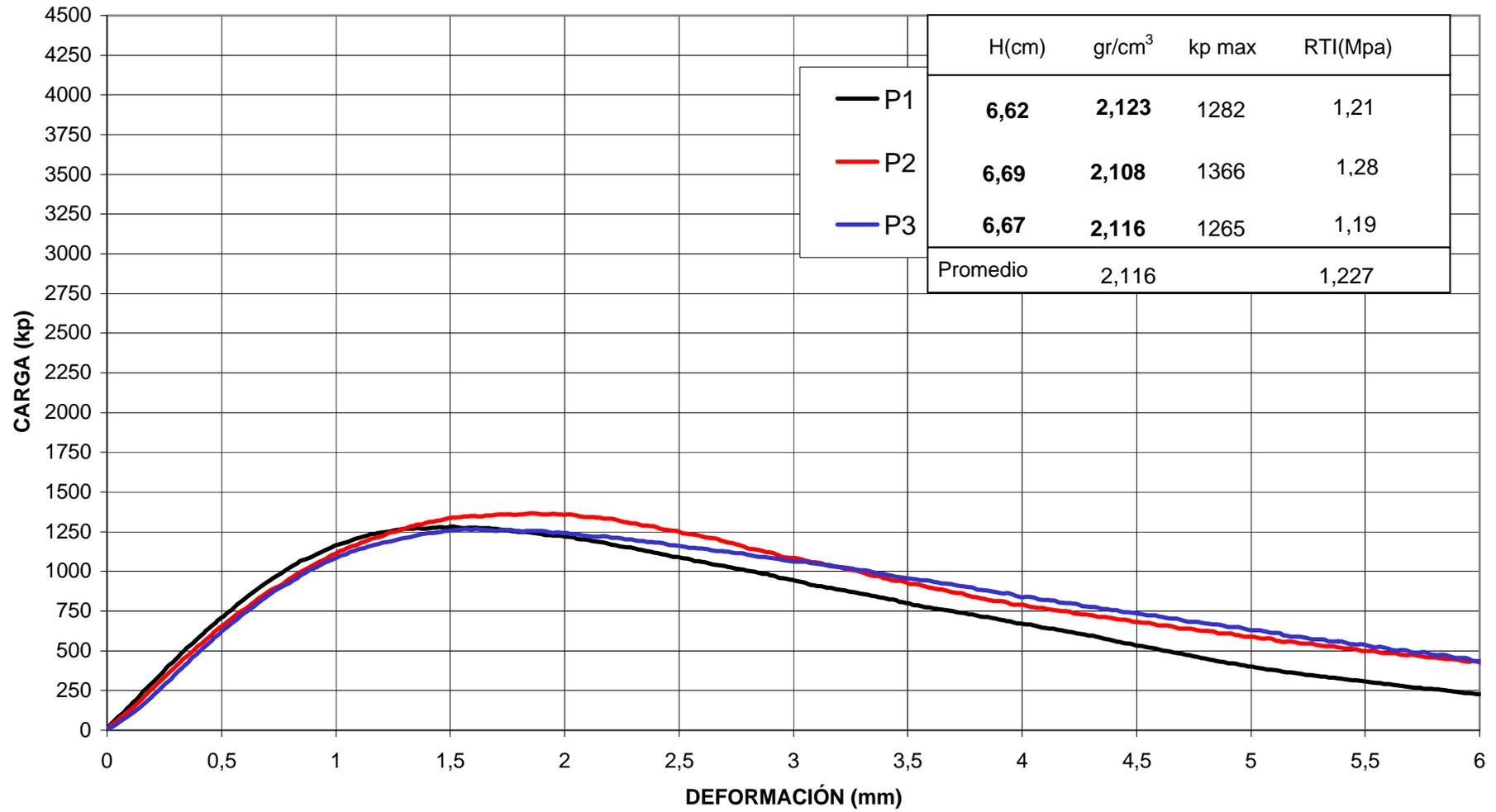
### ***ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA***

En el presente anejo se presentan los resultados del ensayo Tracción Indirecta de cada una de las probetas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB.

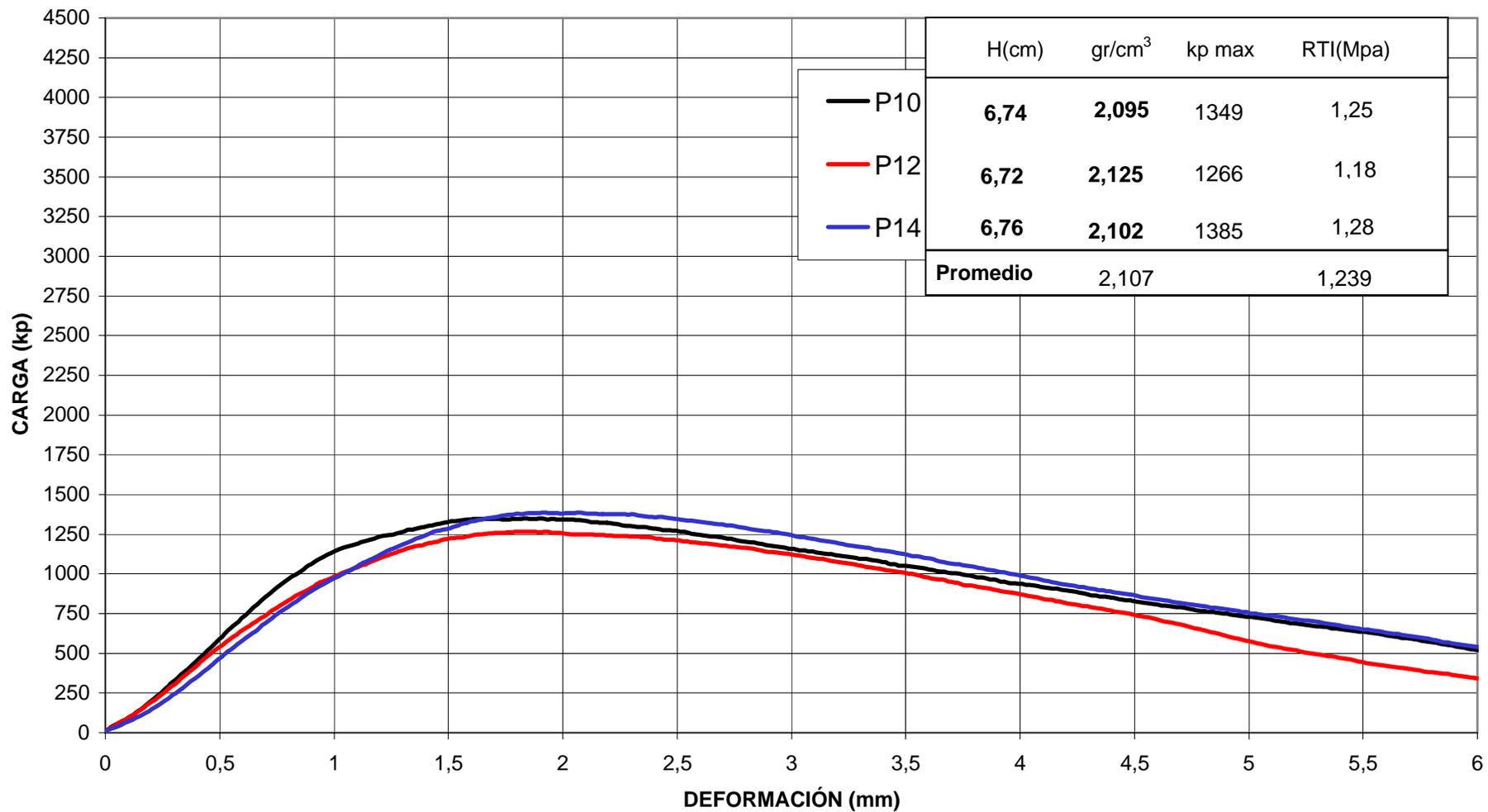
BBTM 11B - 0%RAP- TI SECO 15°C - 4,75% BM3C



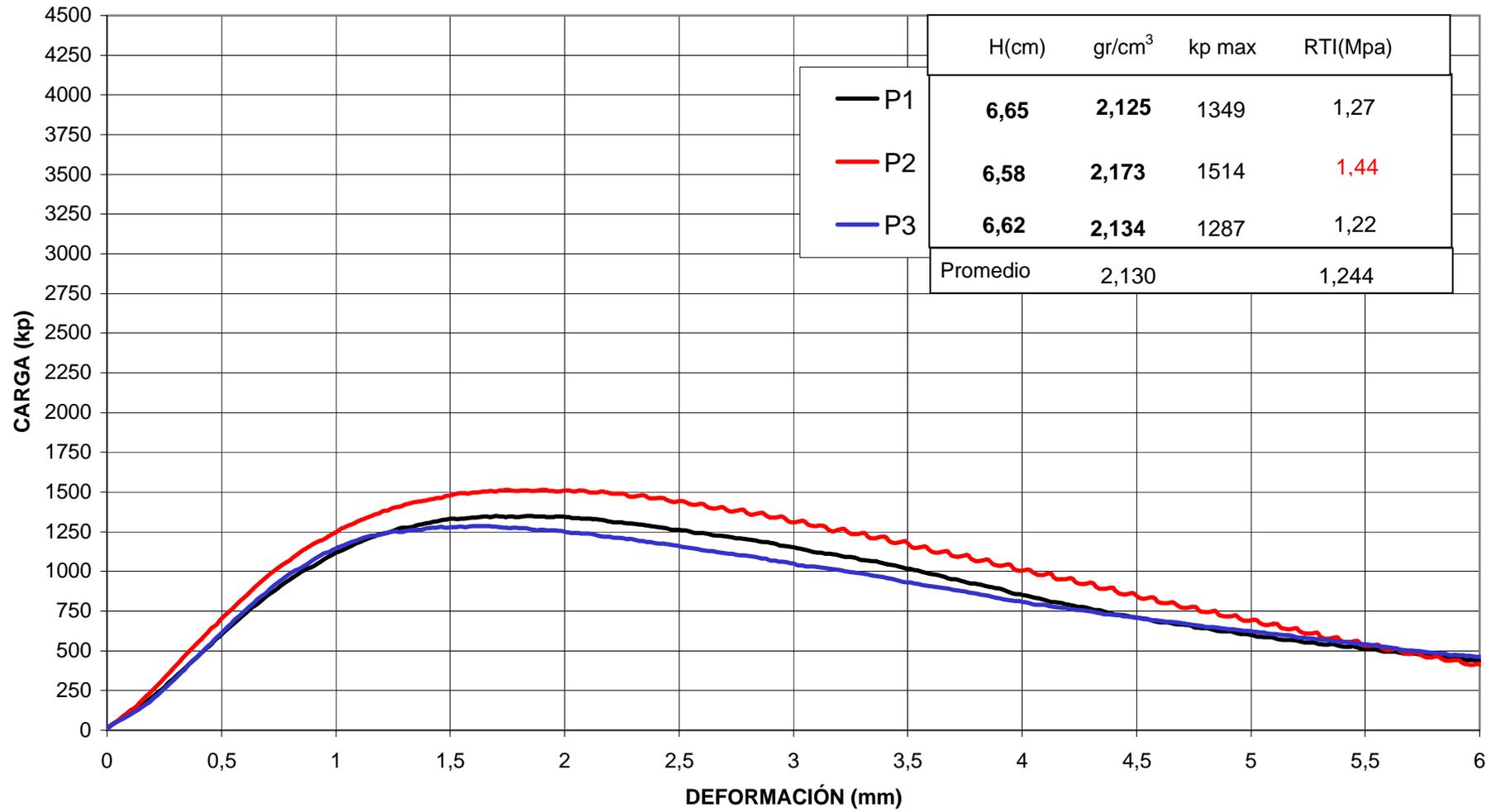
**BBTM 11B - 0%RAP-TI HÚMEDO 15°C - 4,75% BM3C**



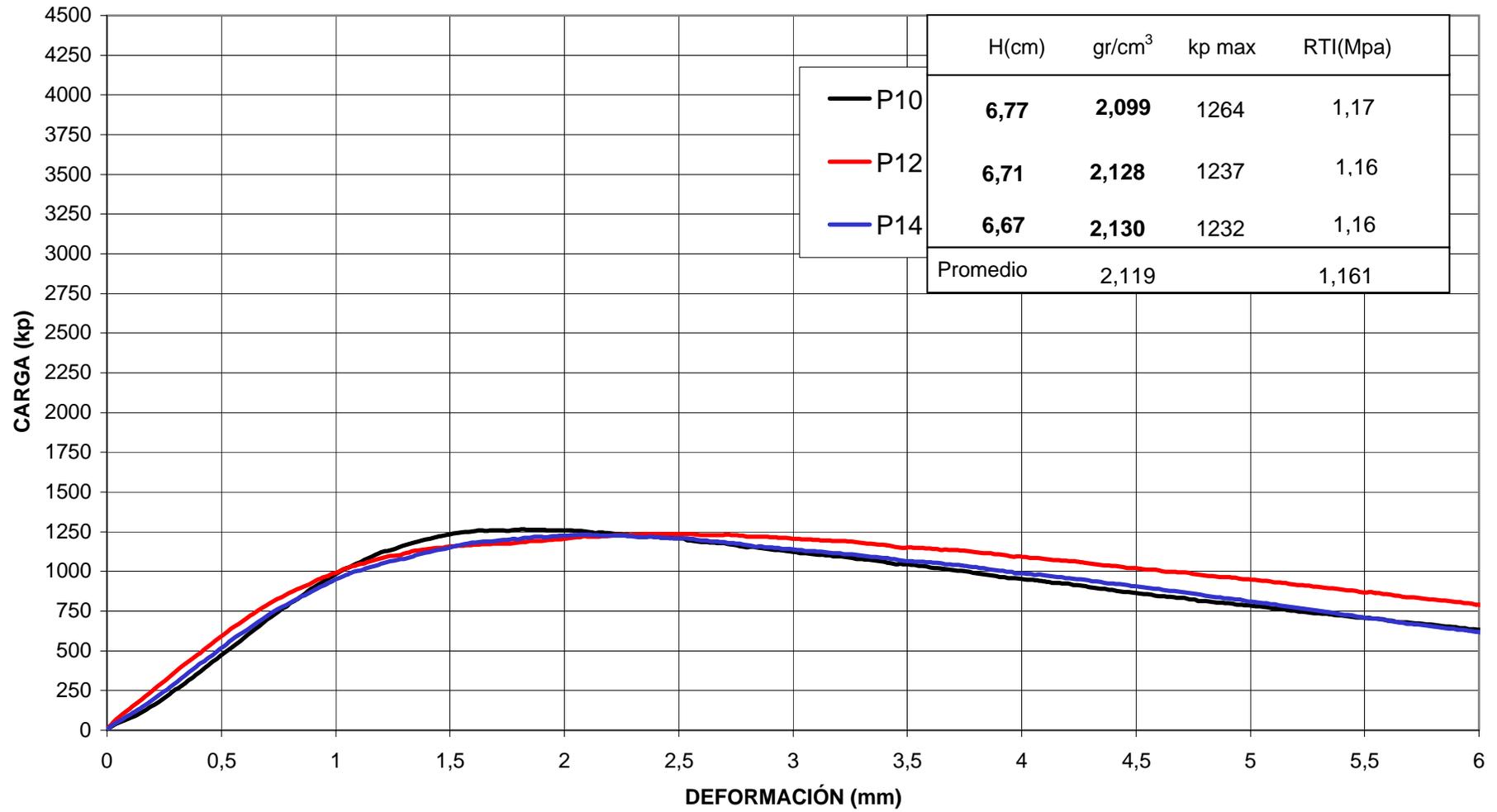
BBTM 11B - 0%RAP- TI SECO 15°C - 5,25% BM3C



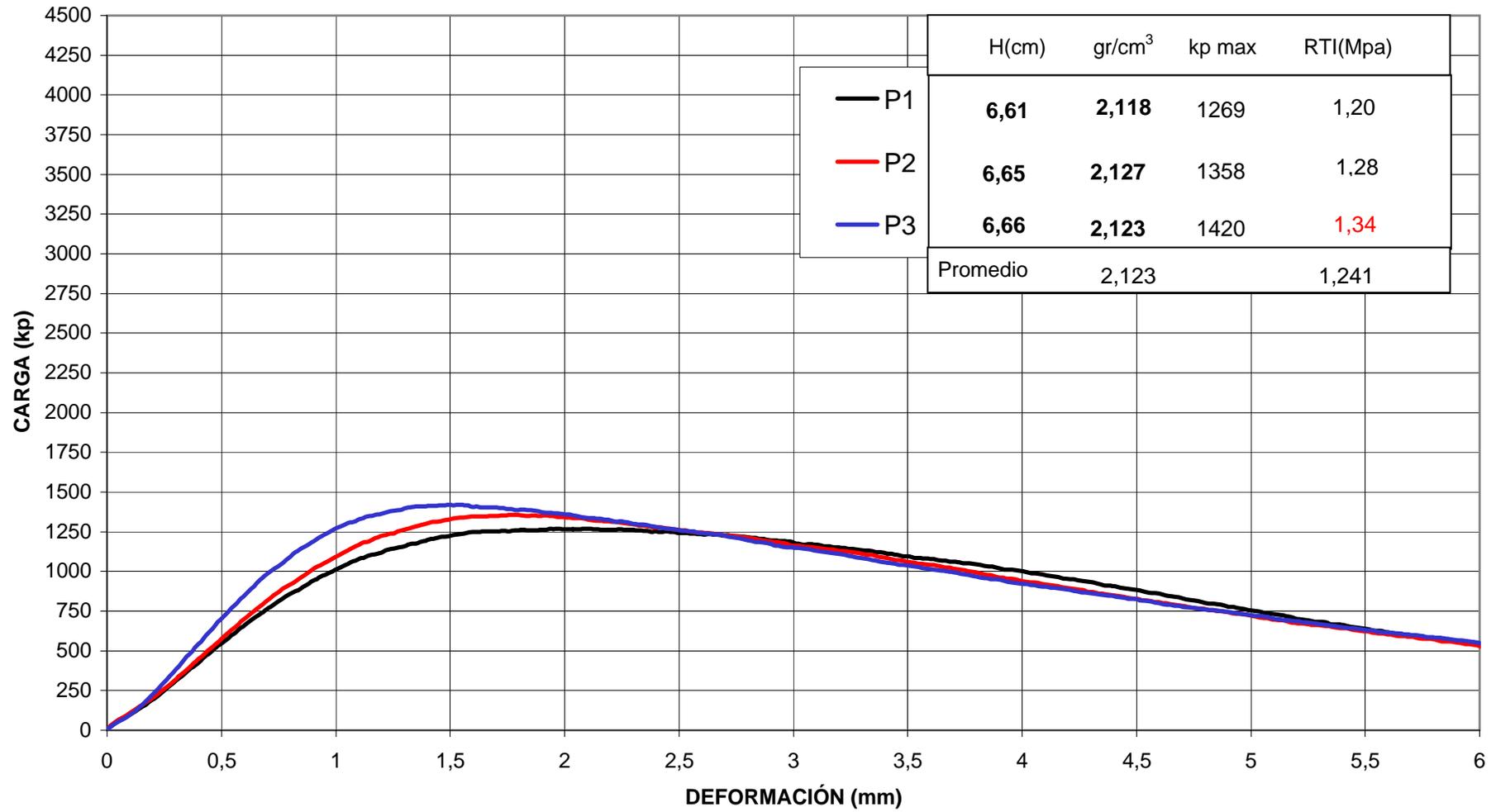
BBTM 11B - 0%RAP - TI HÚMEDO 15°C - 5,25% BM3C



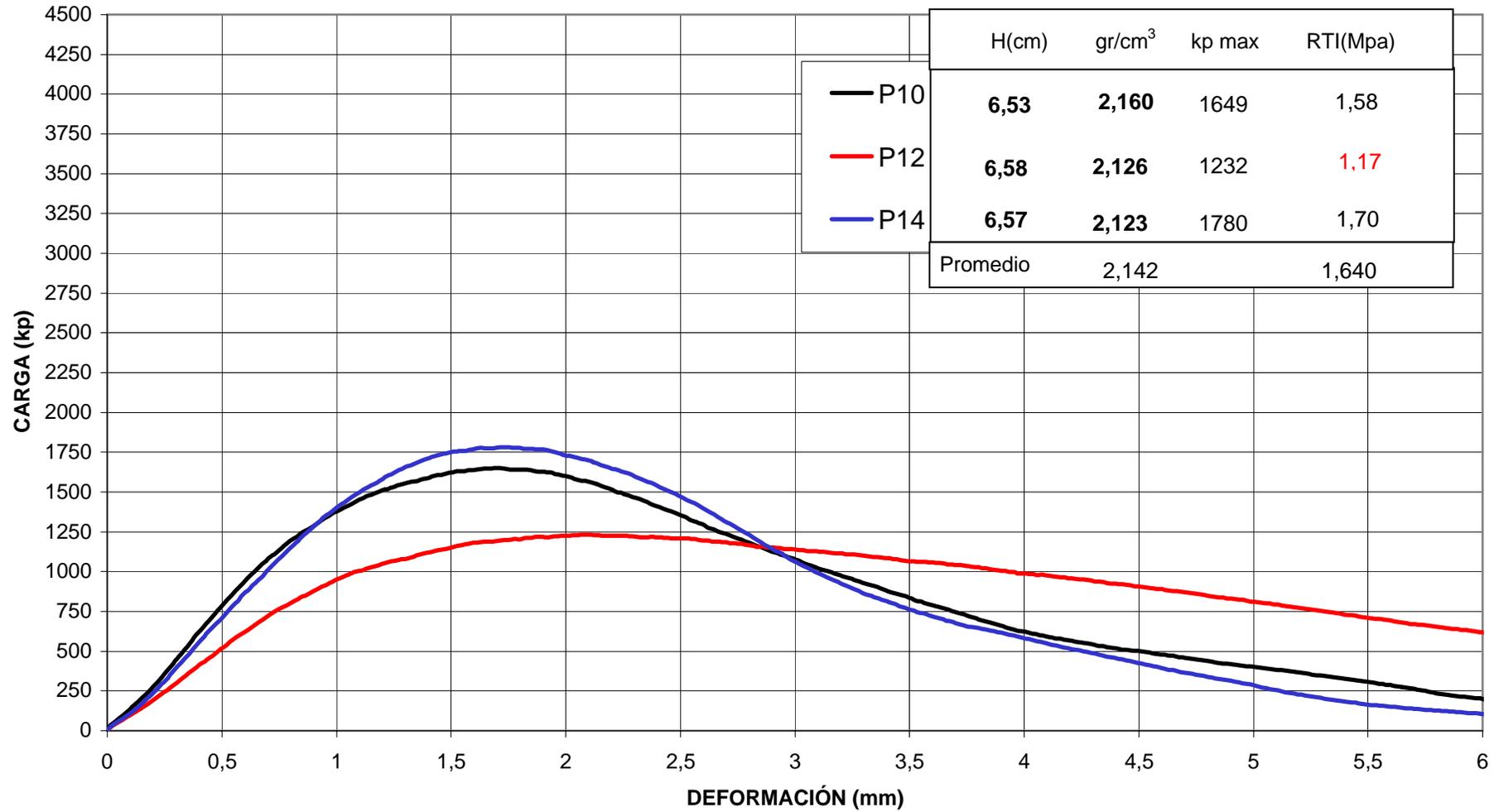
BBTM 11B - 0%RAP - TI SECO 15°C - 5,75% BM3C



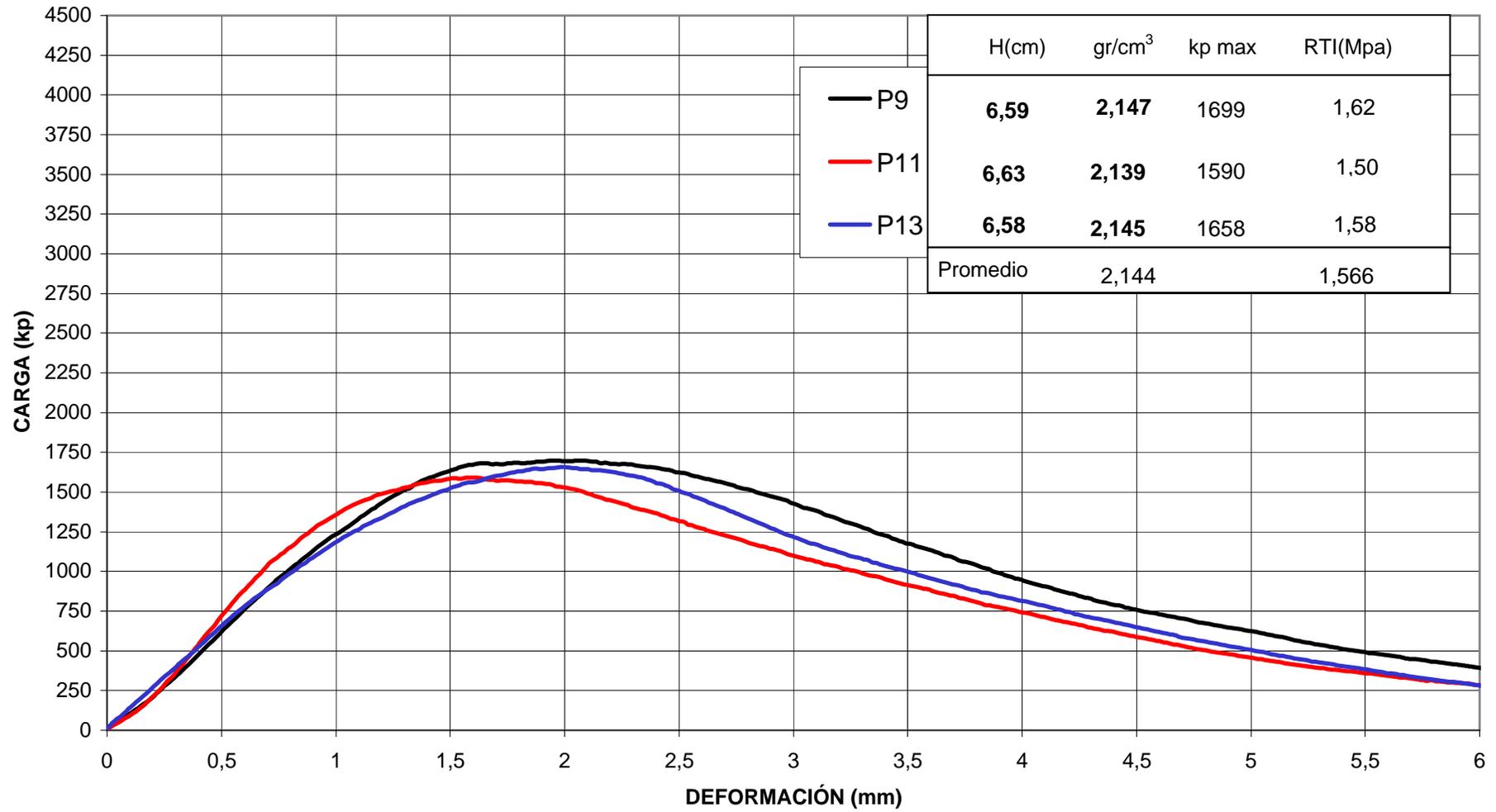
BBTM 11B - 0%RAP - TI HÚMEDO 15°C - 5,75% BM3C



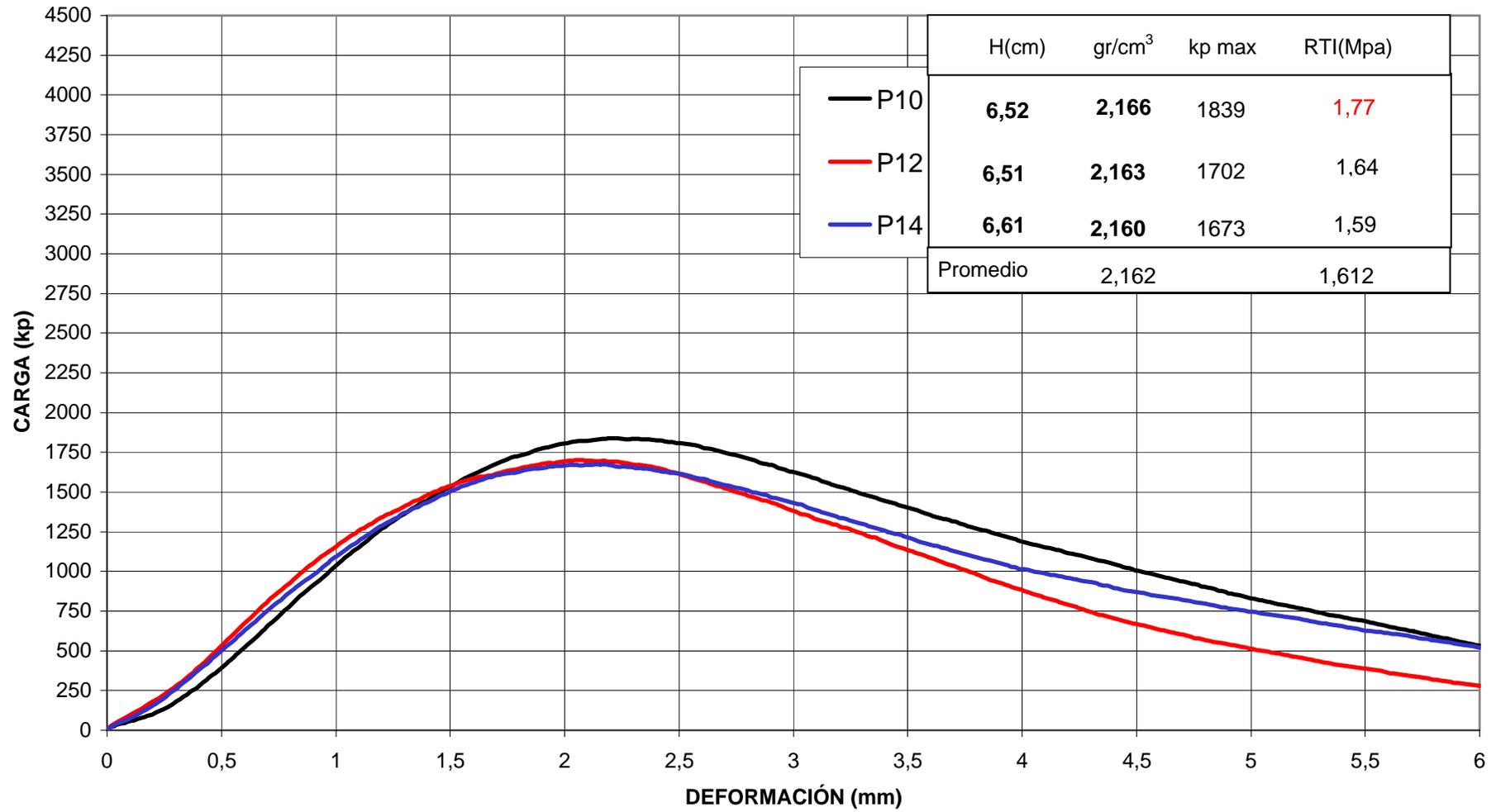
BBTM 11B - 10%RAP - TI SECO 15°C - 4,75% BM3C



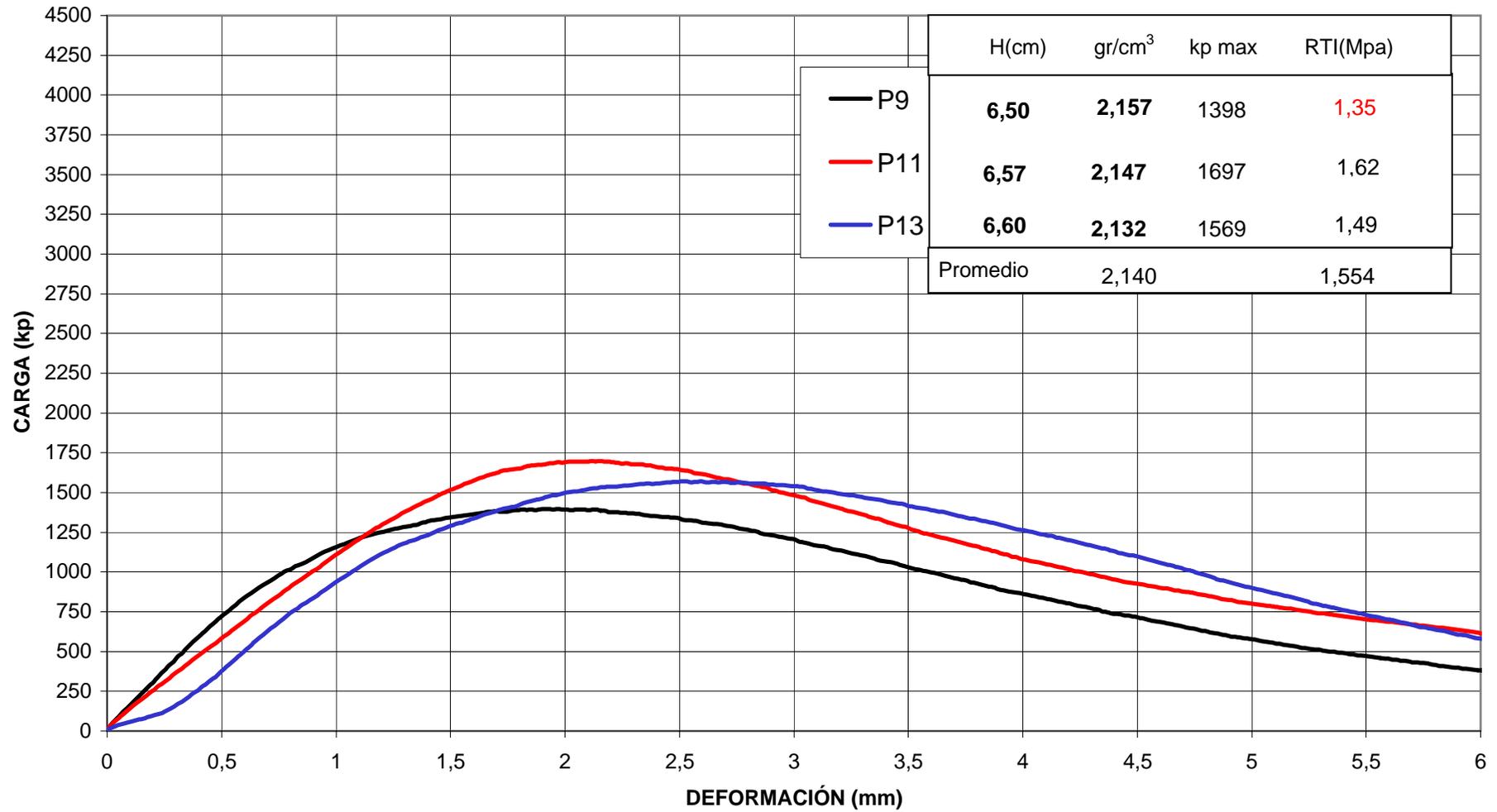
**BBTM 11B - 10% RAP- TI HÚMEDO 15°C - 4,75% BM3C**



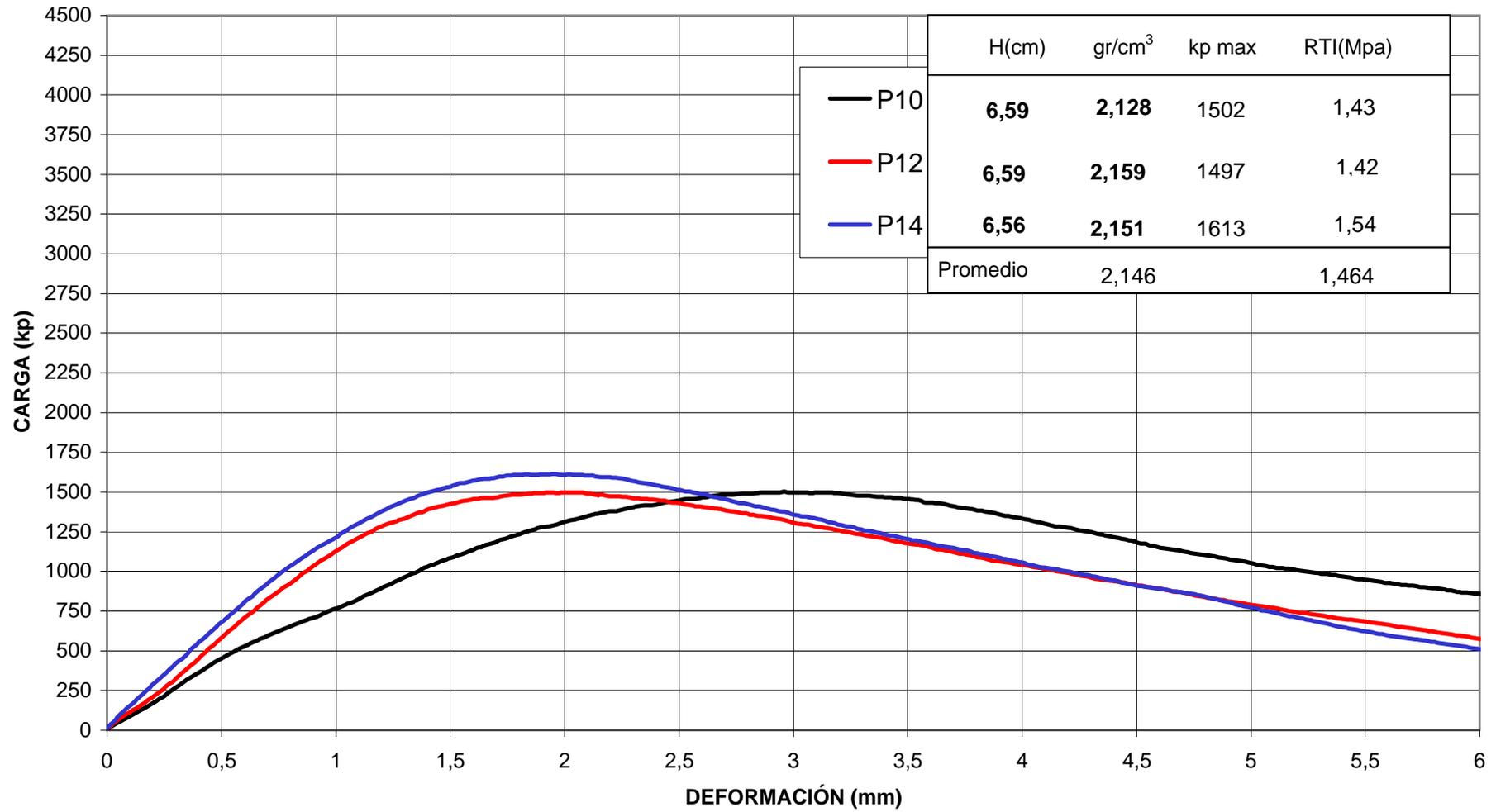
BBTM 11B - 10% RAP- TI SECO 15°C - 5,25% BM3C



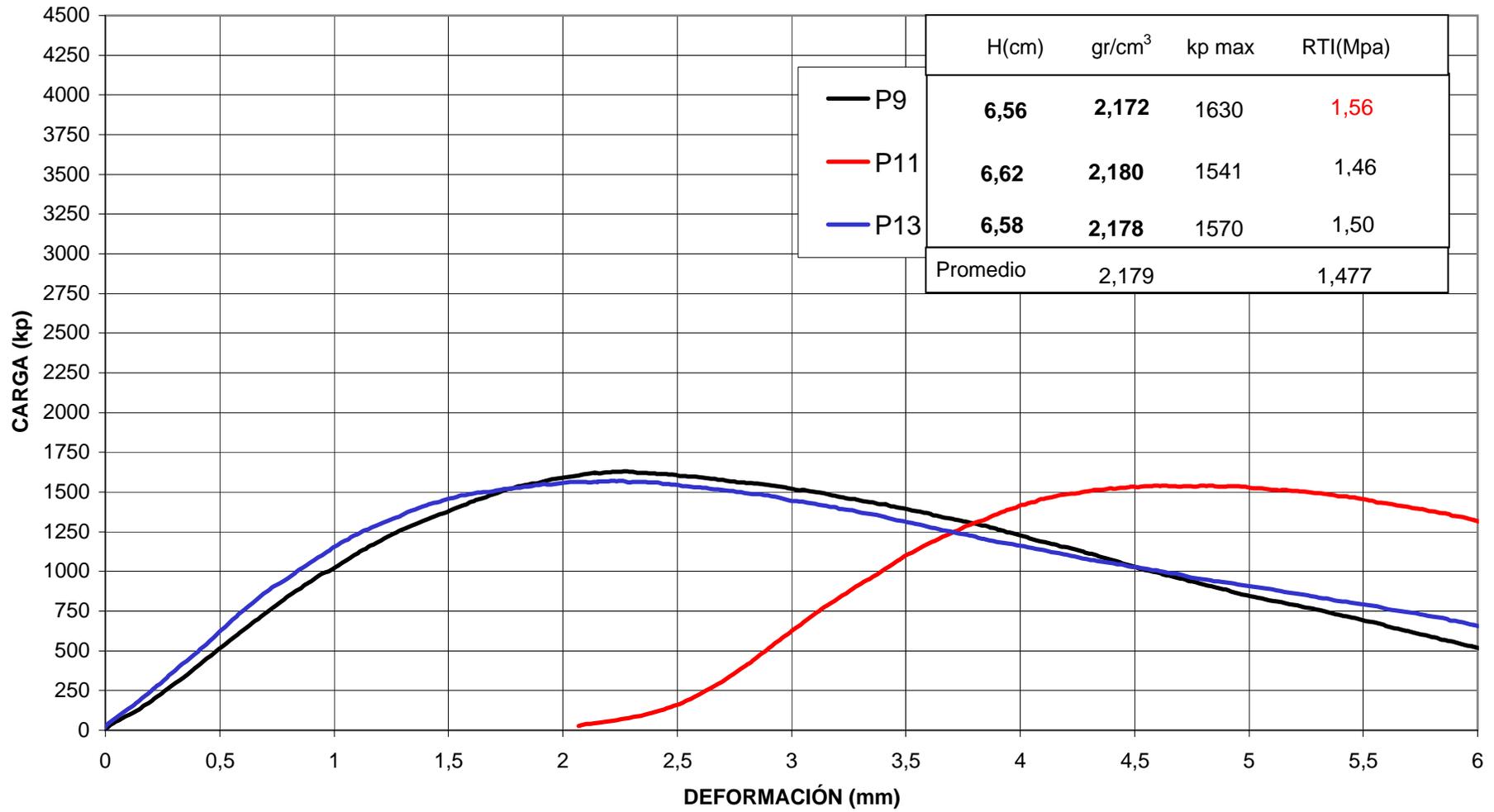
BBTM 11B - 10% RAP- TI HÚMEDO 15°C - 5,25% BM3C



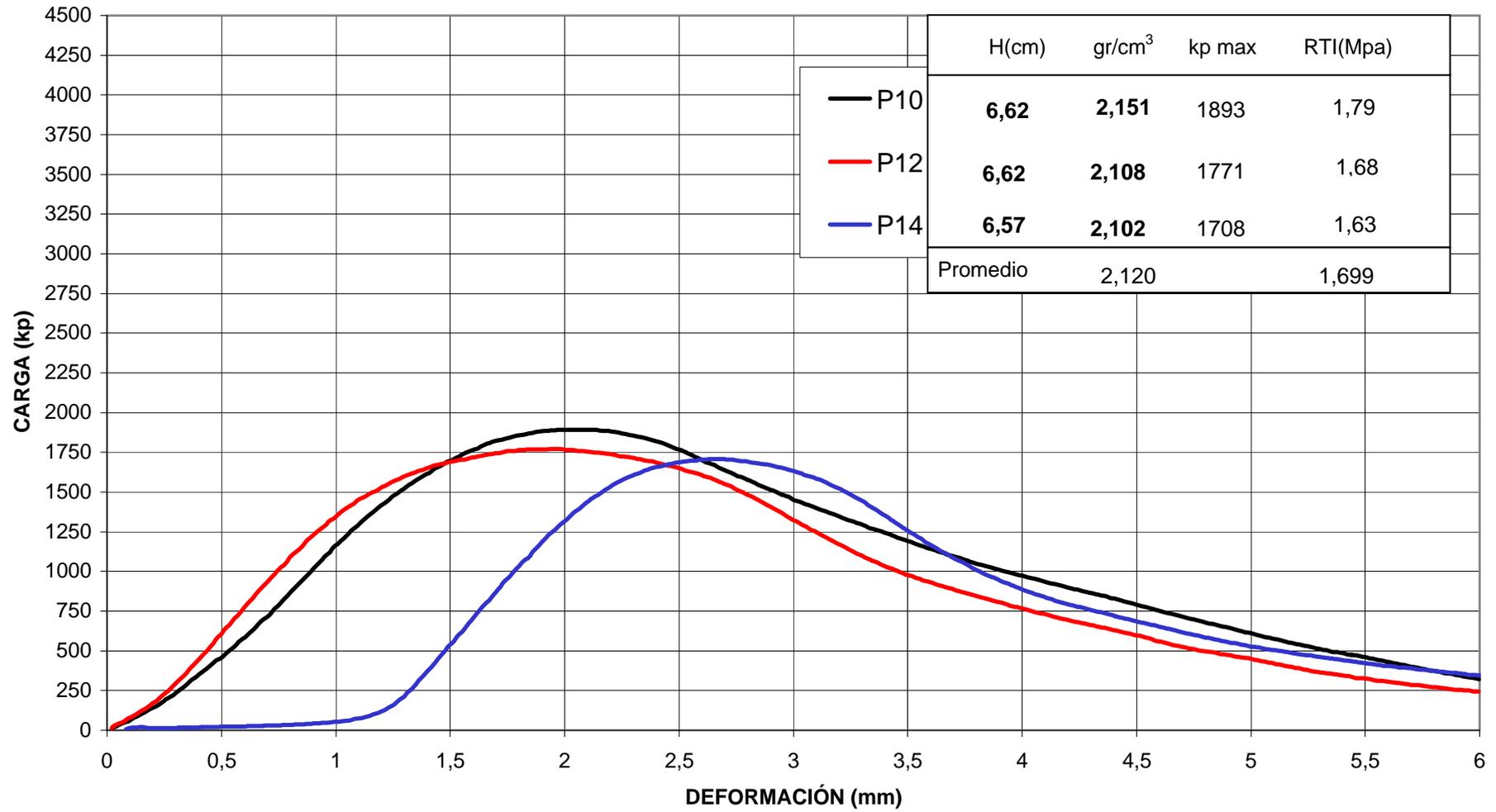
**BBTM 11B - 10%RAP - TI SECO 15°C - 5,75% BM3C**



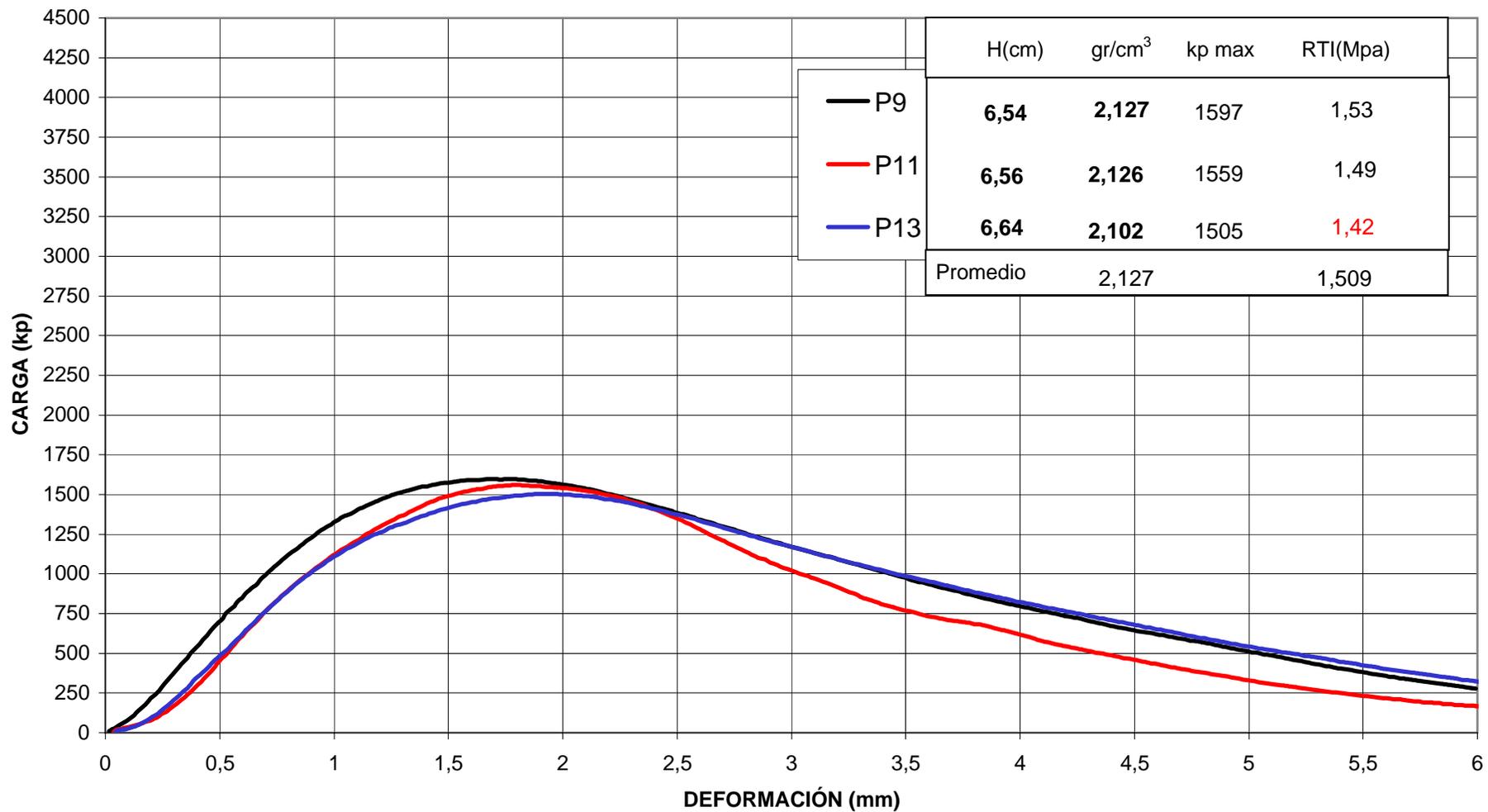
BBTM 11B - TI HÚMEDO 15°C - 5,75% BM3C



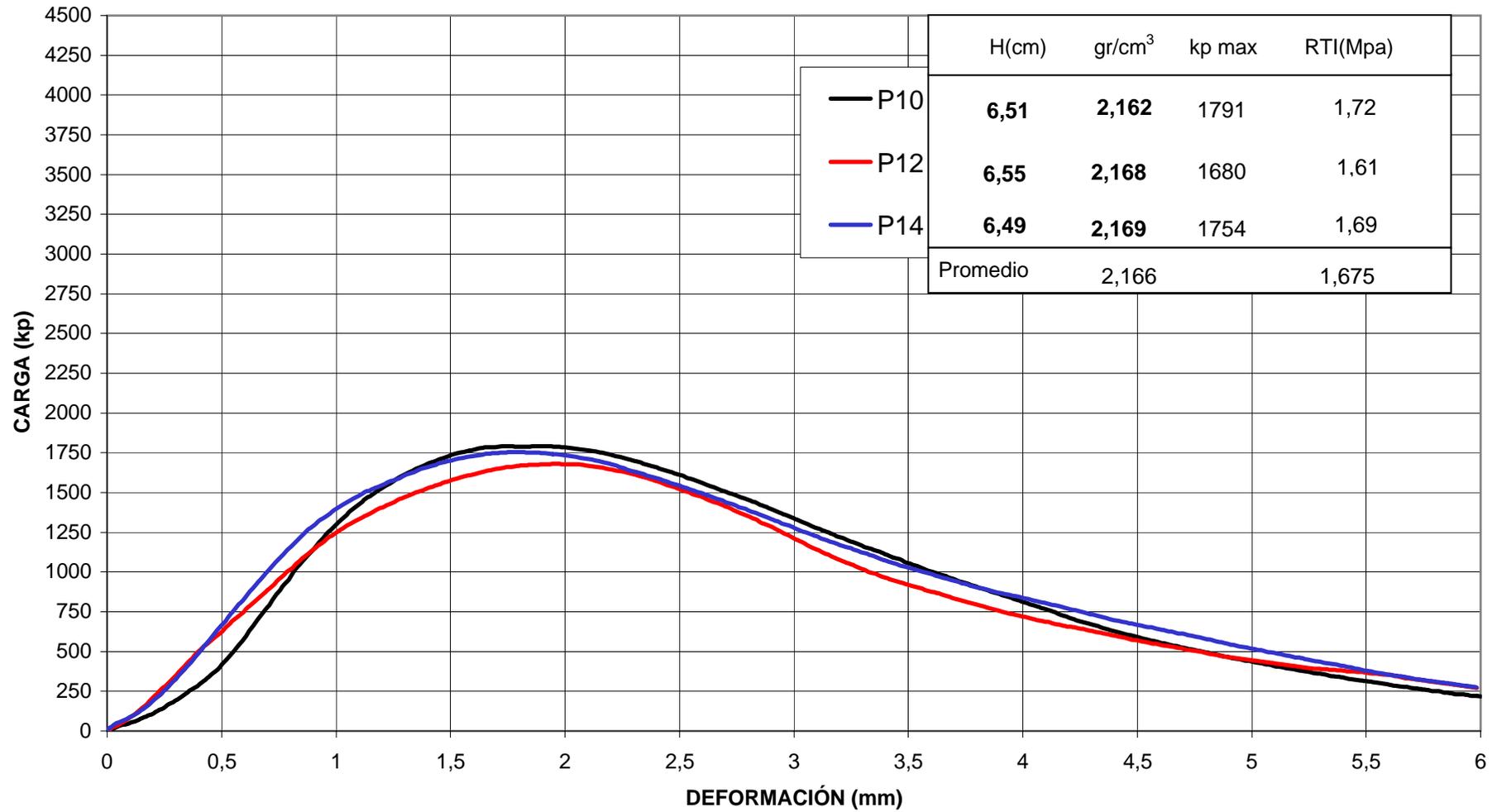
**BBTM 11B - 20% RAP- TI SECO 15°C - 4,75% BM3C**



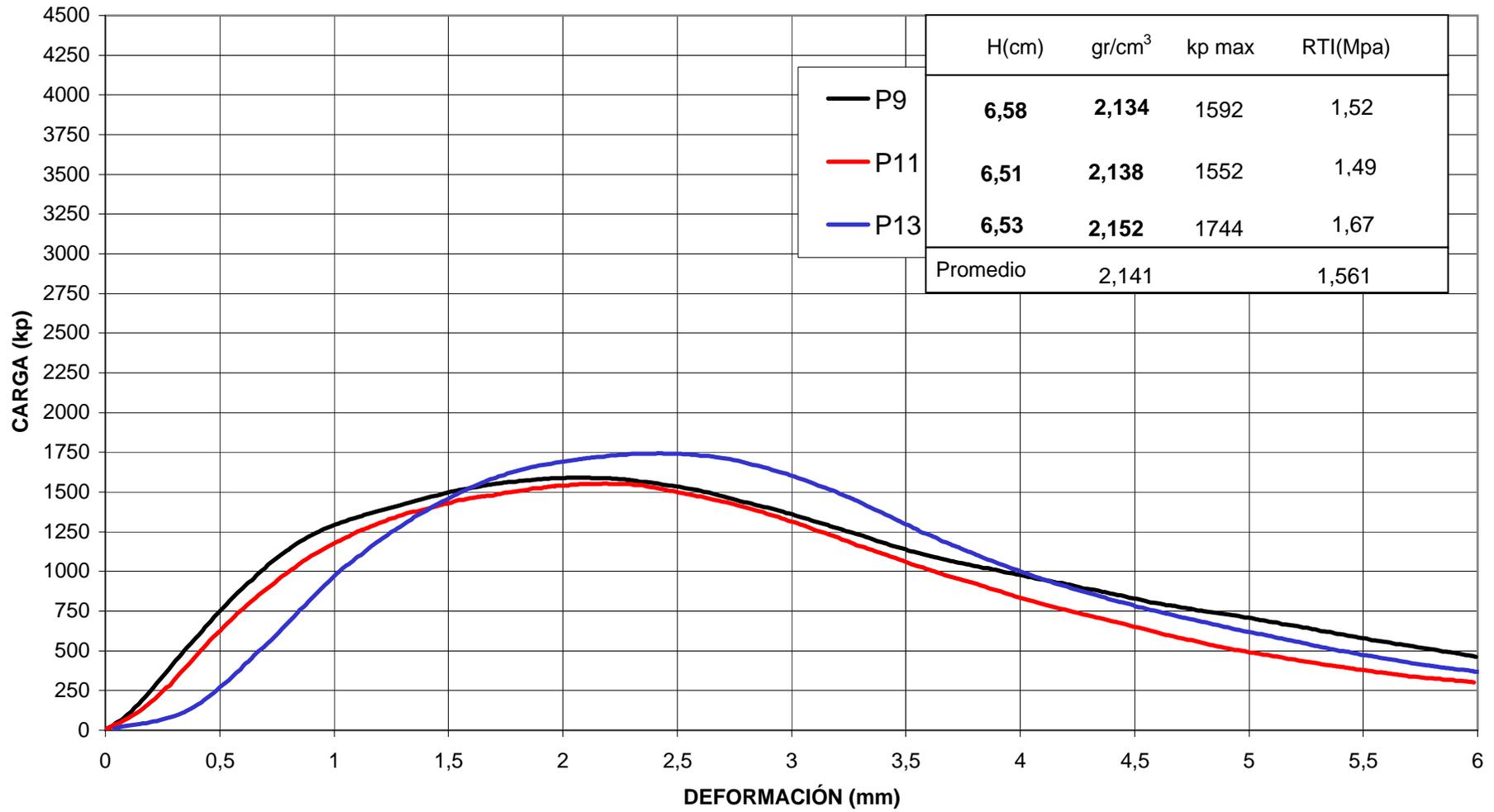
BBTM 11B - 20%RAP- TI HÚMEDO - 4,75% BM3C



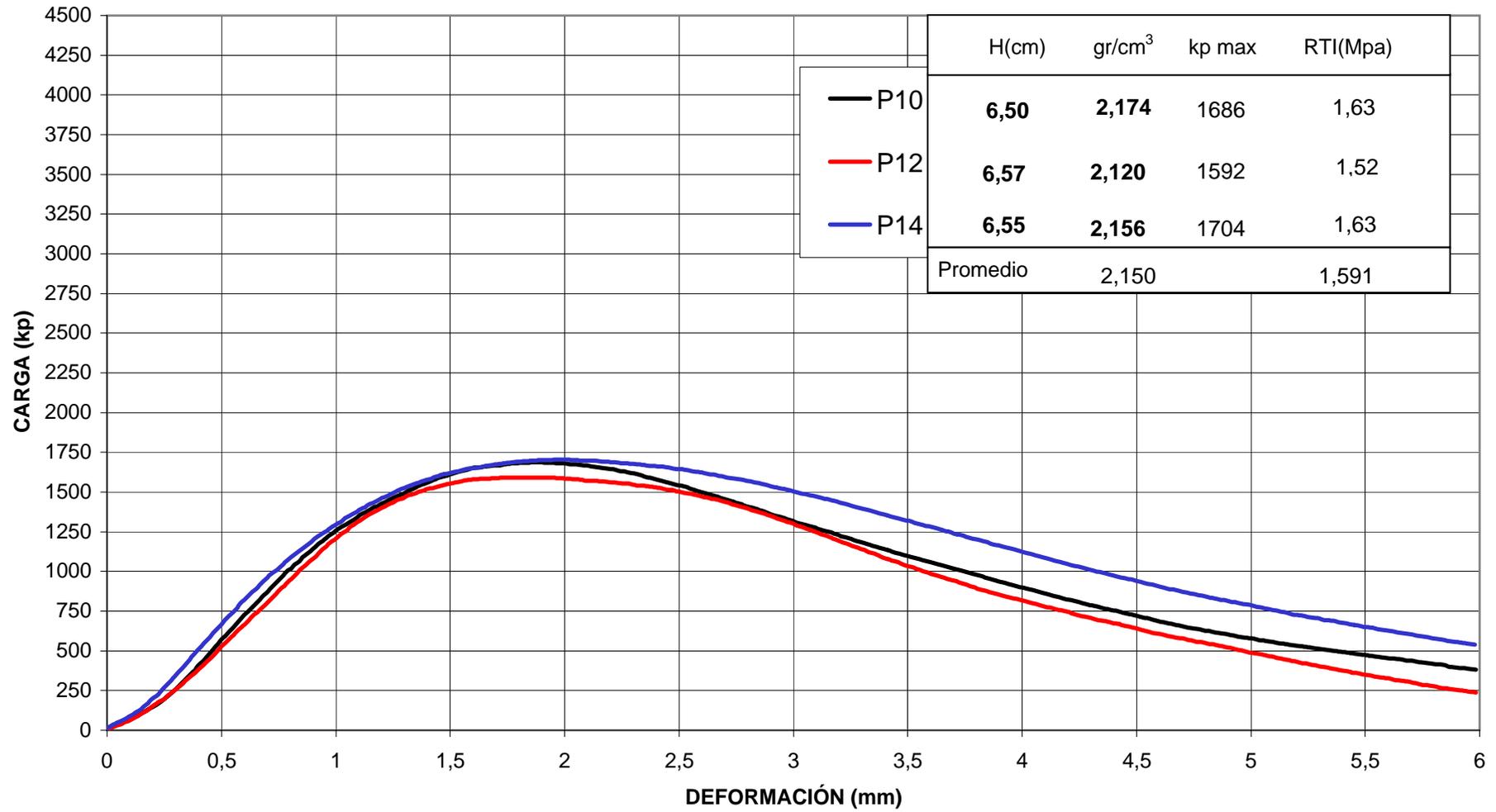
BBTM 11B - 20%RAP- TI SECO 15°C - 5,25% BM3C



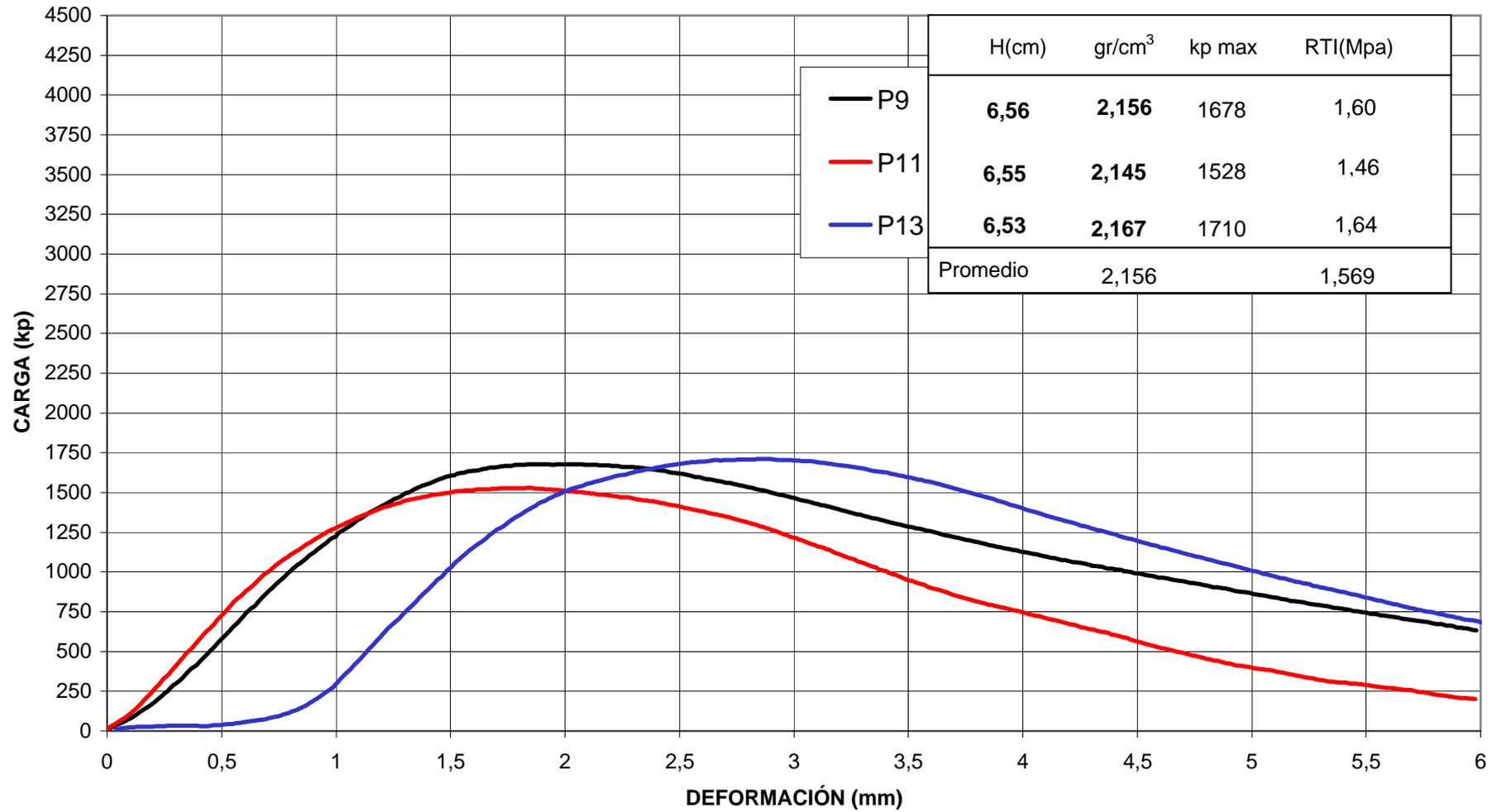
**BBTM 11B - 20%RAP- TI HÚMEDO - 5,25% BM3C**



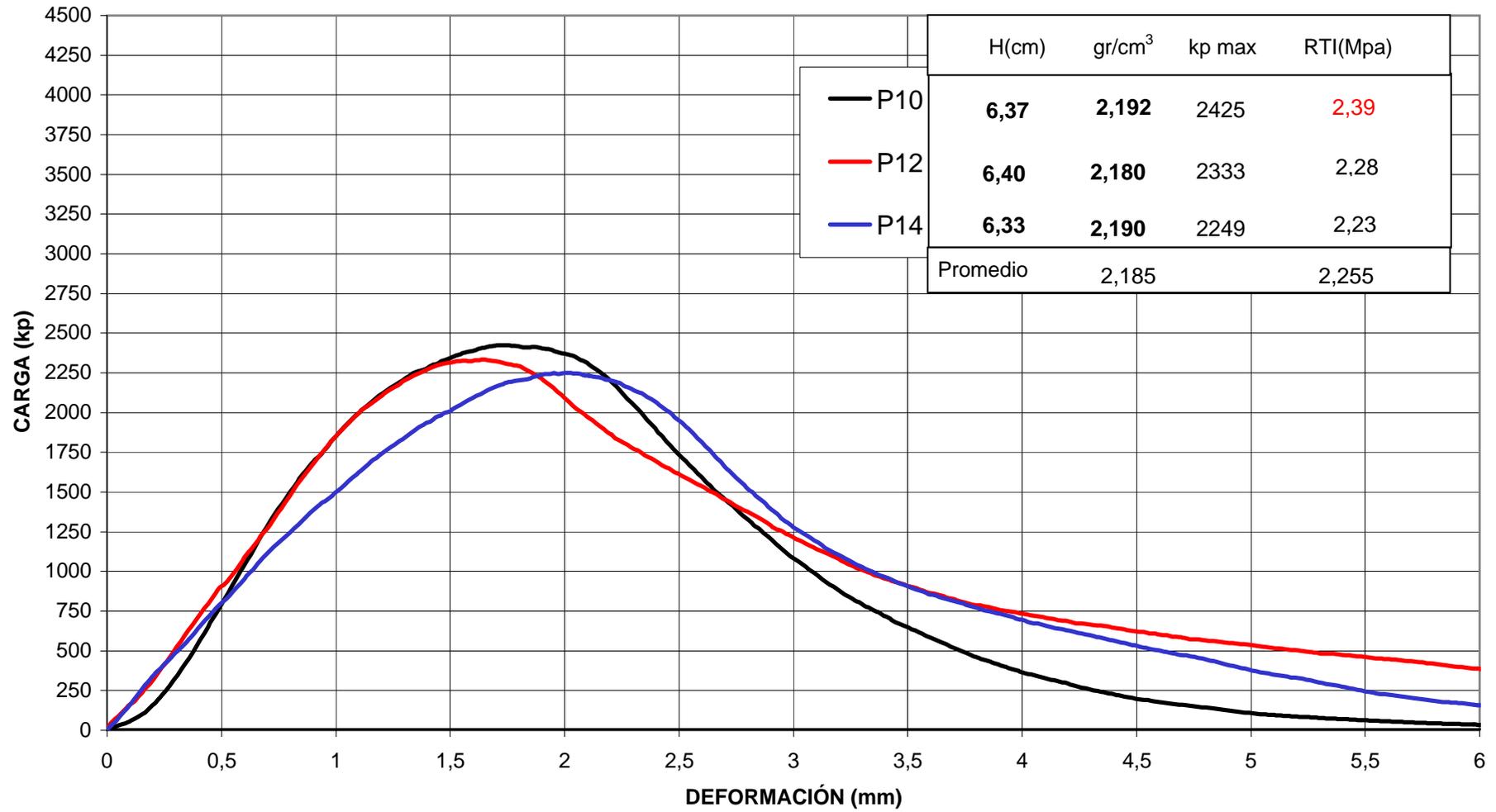
BBTM 11B - 20%RAP- TI SECO 15°C - 5,75% BM3C



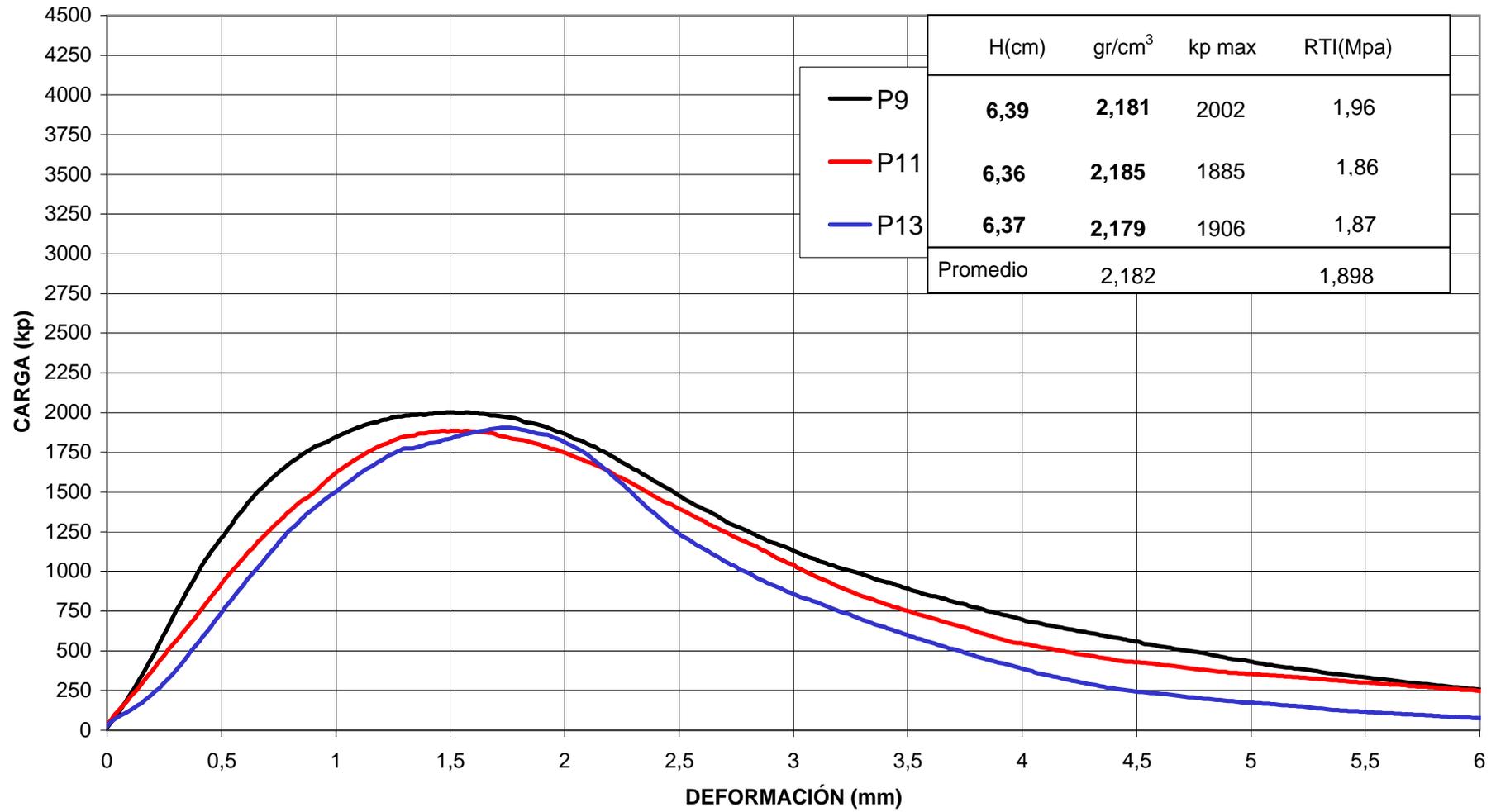
**BBTM 11B - 20%RAP-TI HÚMEDO - 5,75% BM3C**



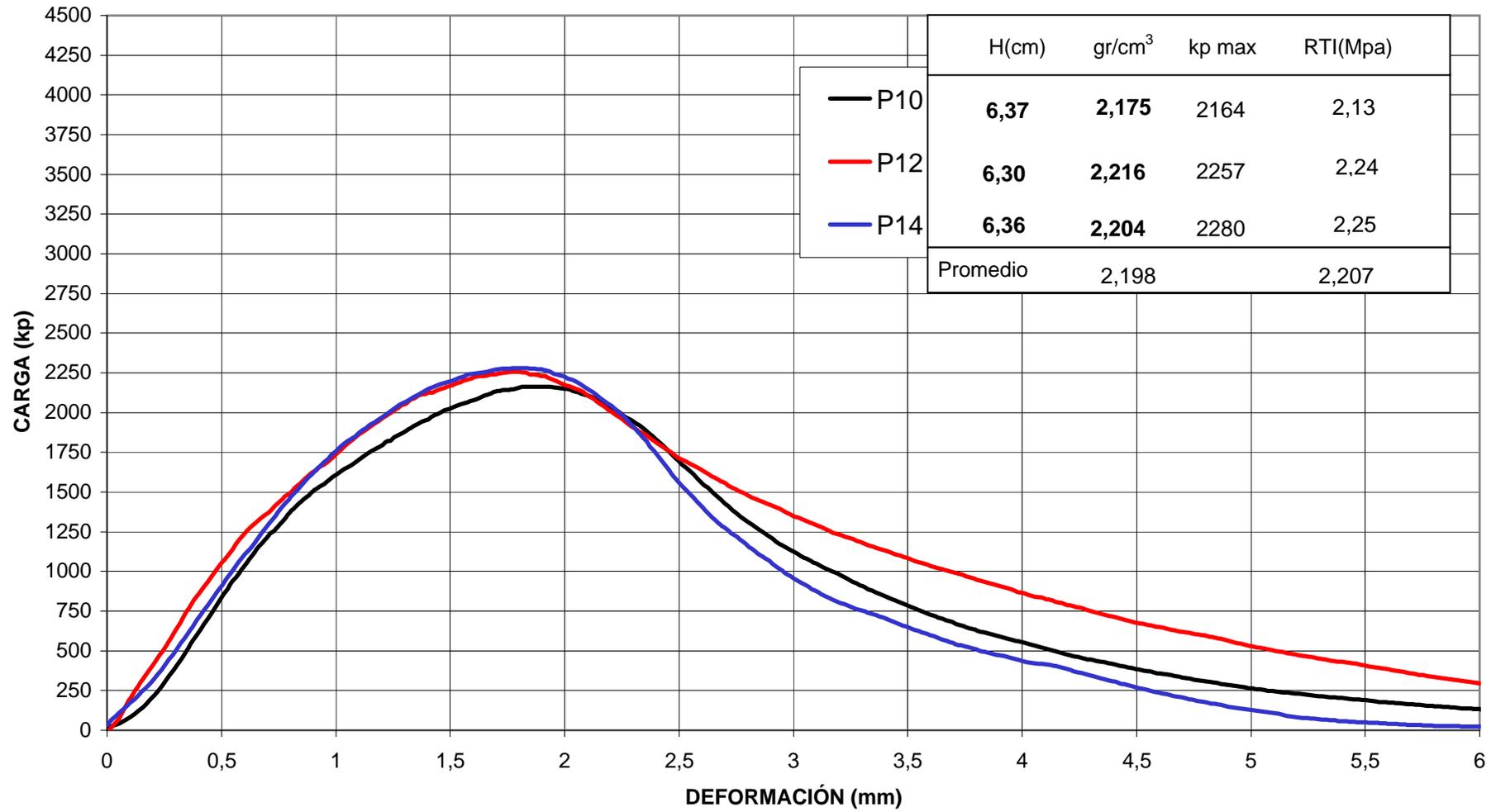
BBTM 11B - 40% RAP- TI SECO 15°C - 4,75% BM3C



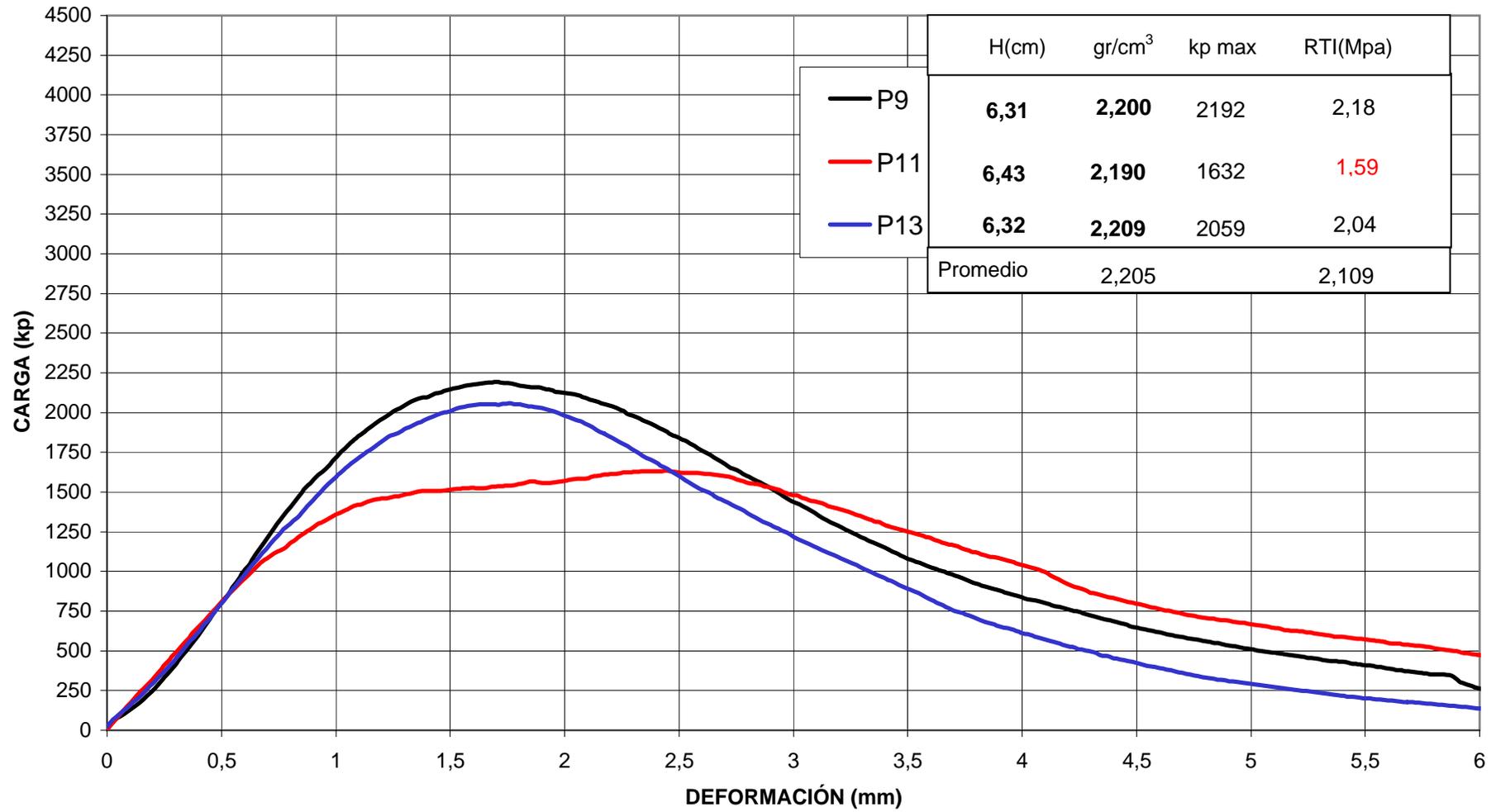
BBTM 11B - 40% RAP- TI HÚMEDO 15°C - 4,75% BM3C



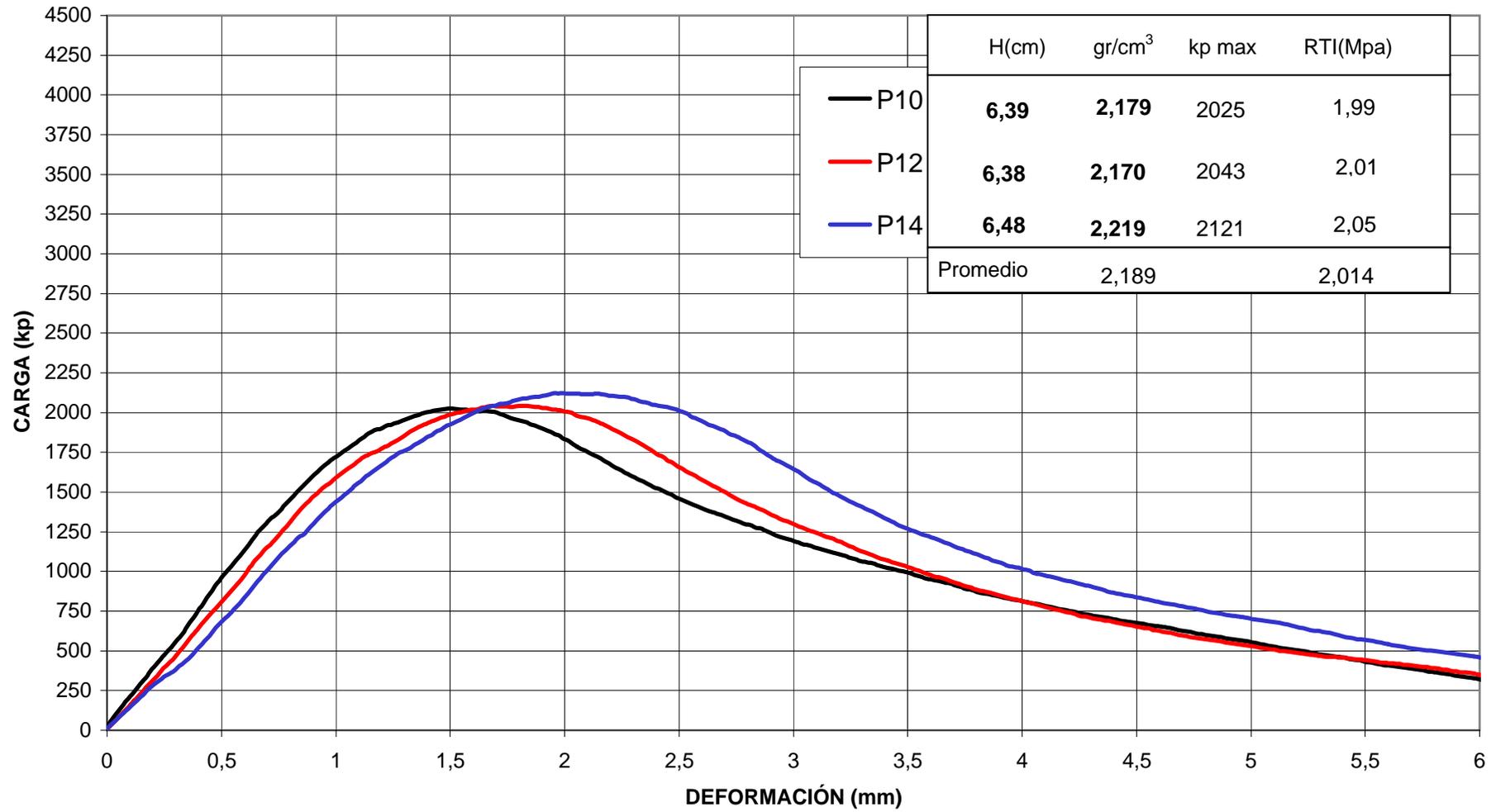
**BBTM 11B - 40% RAP- TI SECO 15°C - 5,25% BM3C**



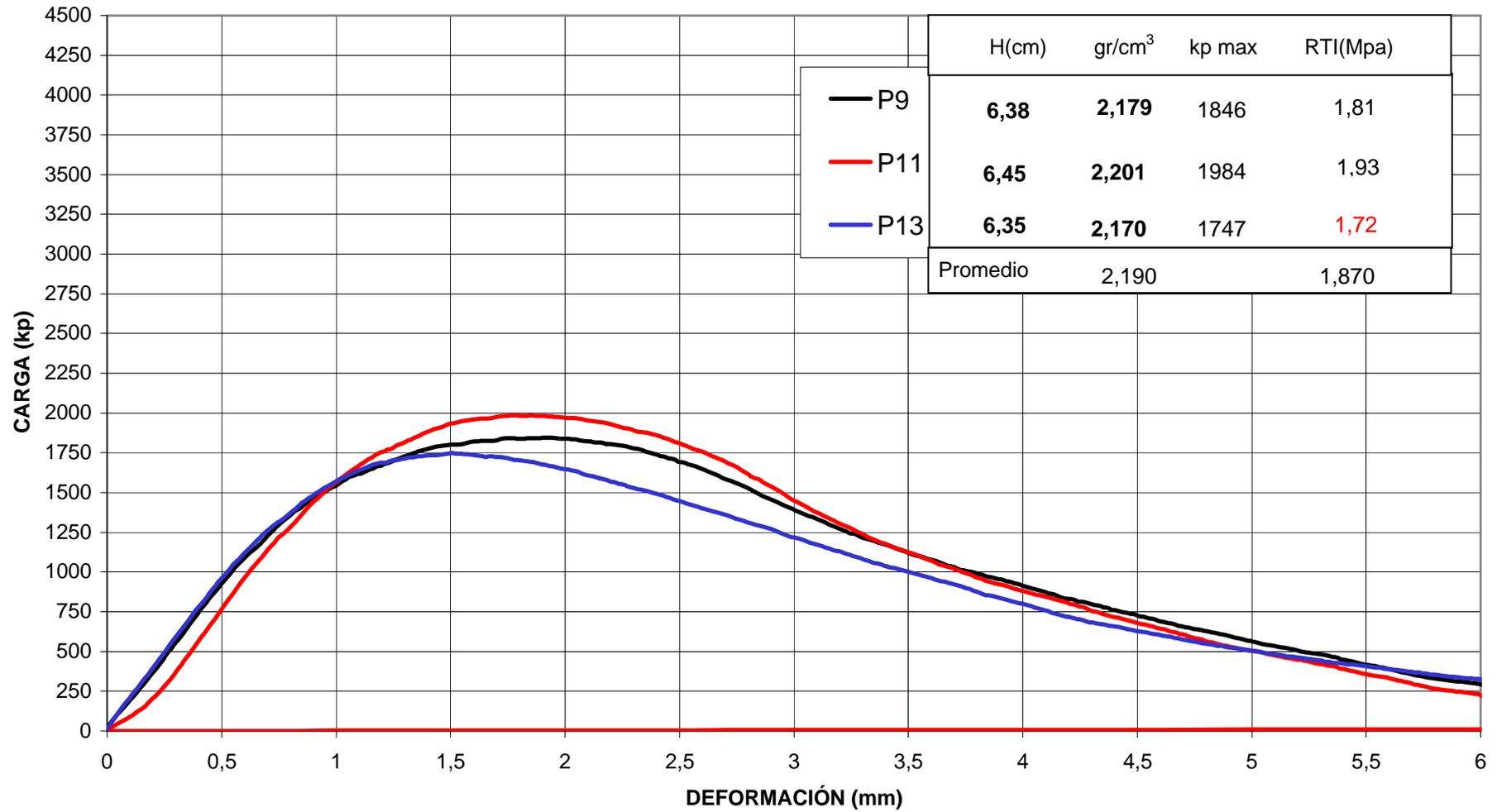
BBTM 11B - 40%RAP- TI HÚMEDO 15°C - 5,25% BM3C



**BBTM 11B - 40% RAP-TI SECO 15°C - 5,75% BM3C**



BBTM 11B - 40%RAP- TI HÚMEDO 15°C - 5,75% BM3C

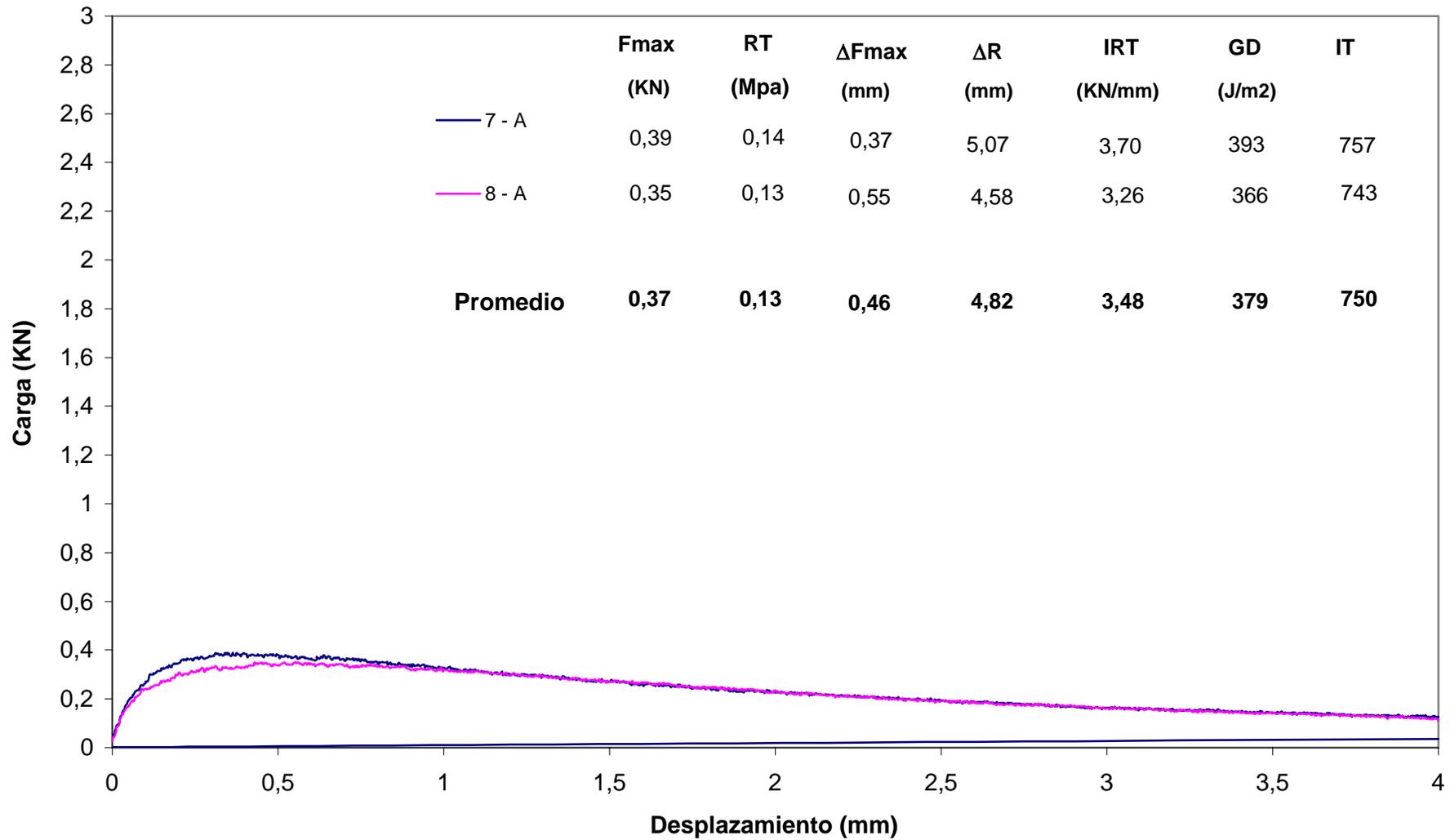


## **ANEJO 4**

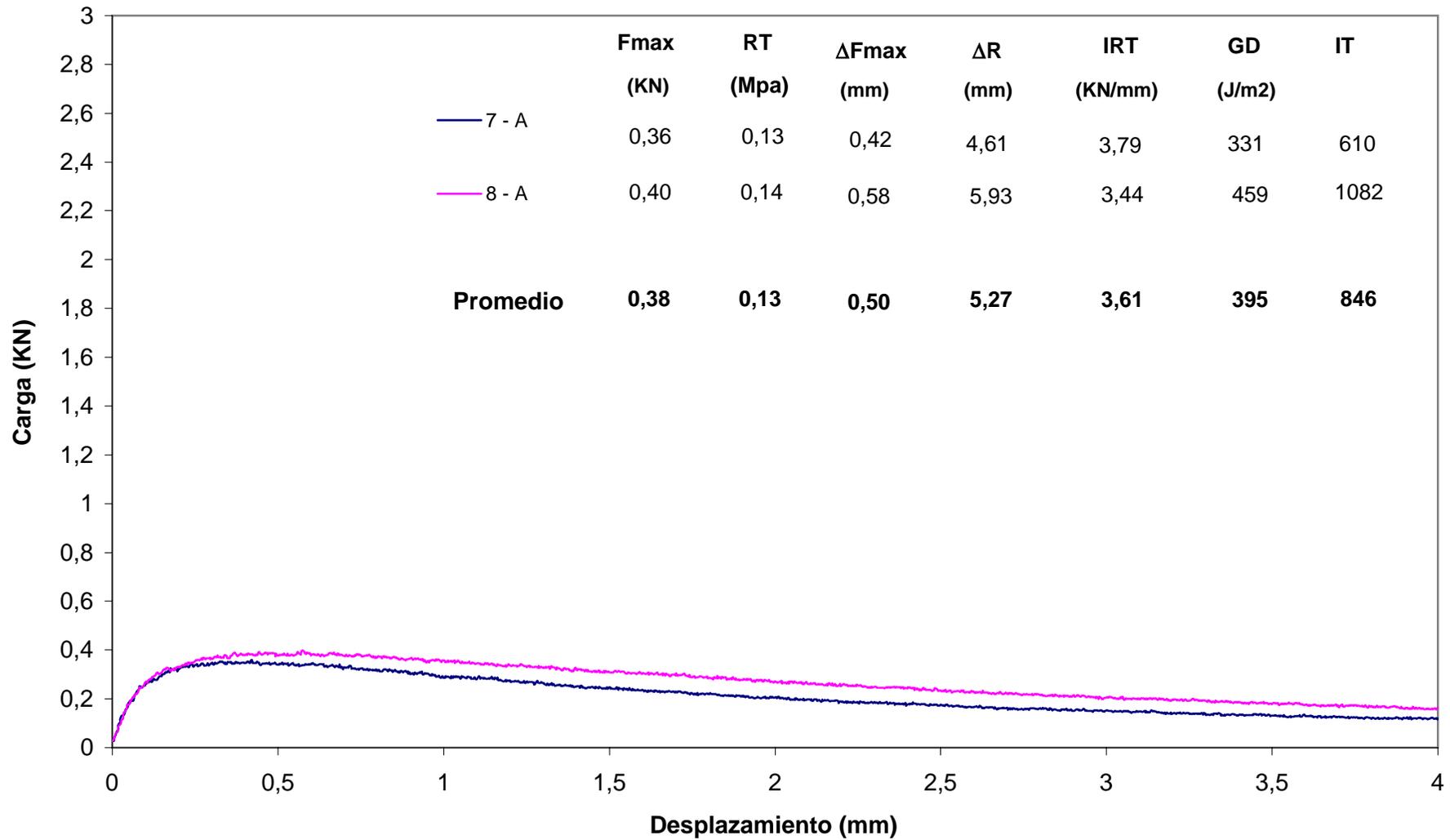
### ***ENSAYO FÉNIX***

En el presente anejo se presentan los resultados del ensayo Fénix de cada una de las probetas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB.

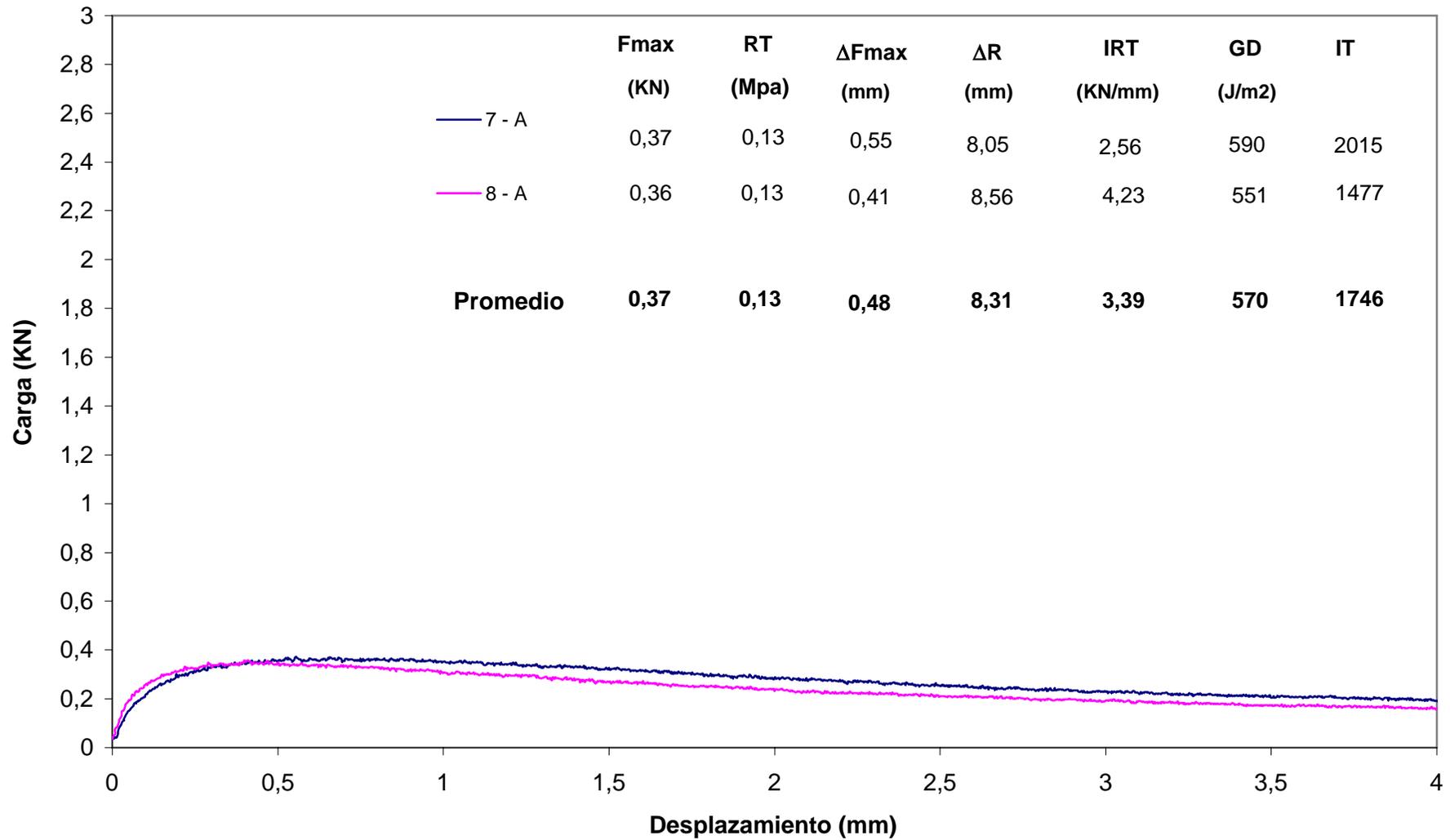
### Mezcla BBTM 11B- 0% RAP - 4,75% B sm



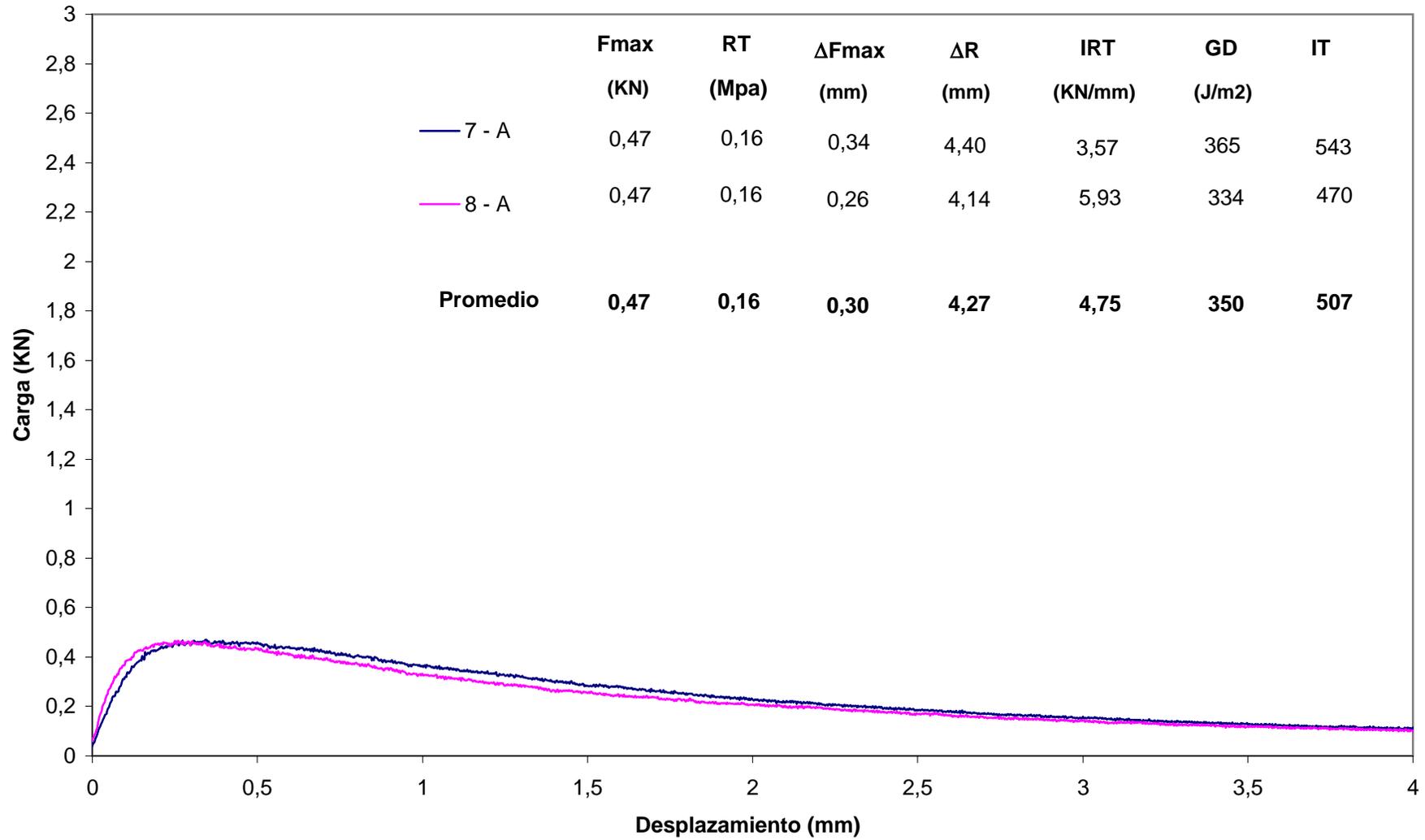
### Mezcla BBTM 11B- 0% RAP - 5,25% B sm



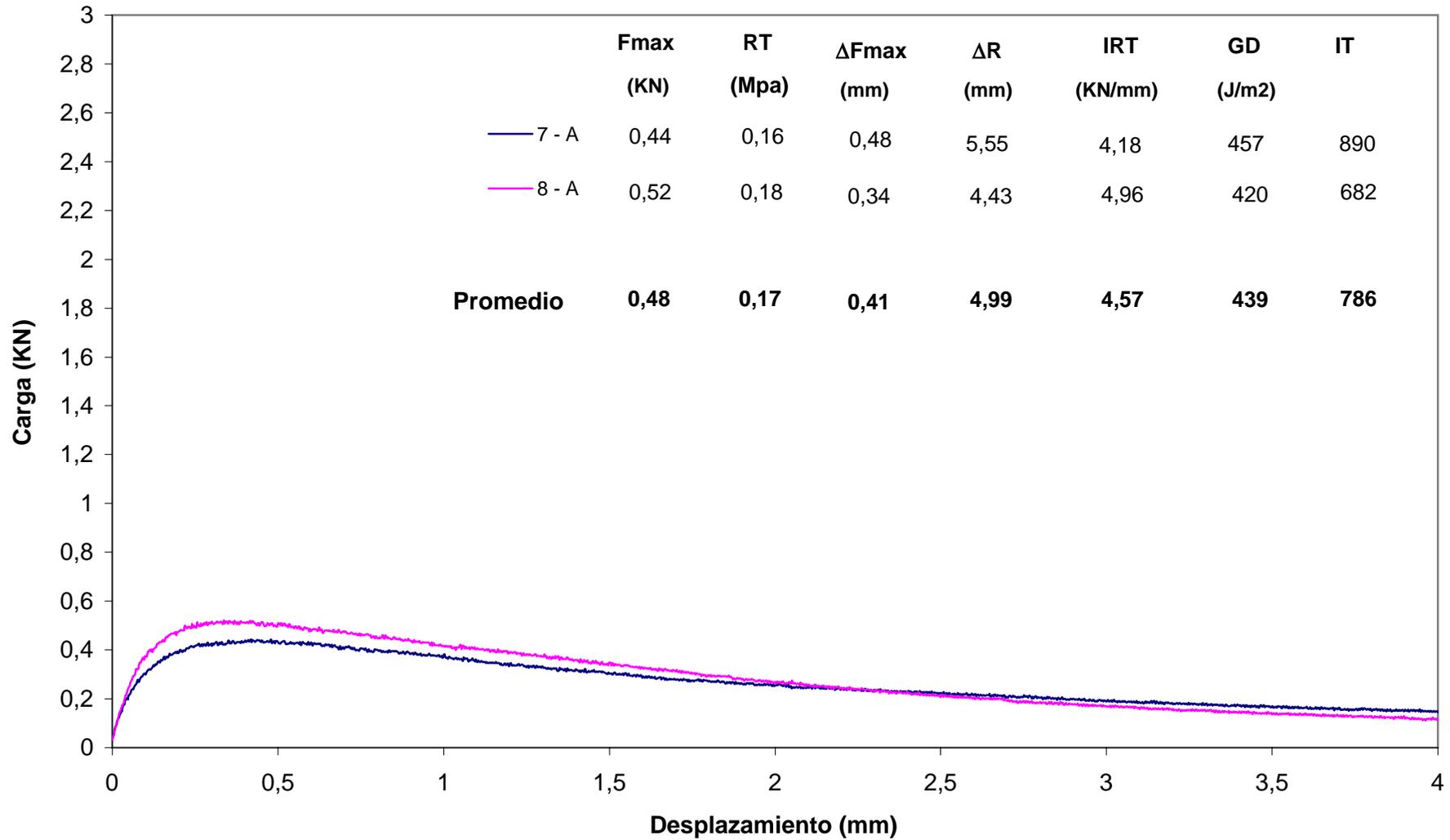
### Mezcla BBTM 11B- 0% RAP - 5,75% B sm



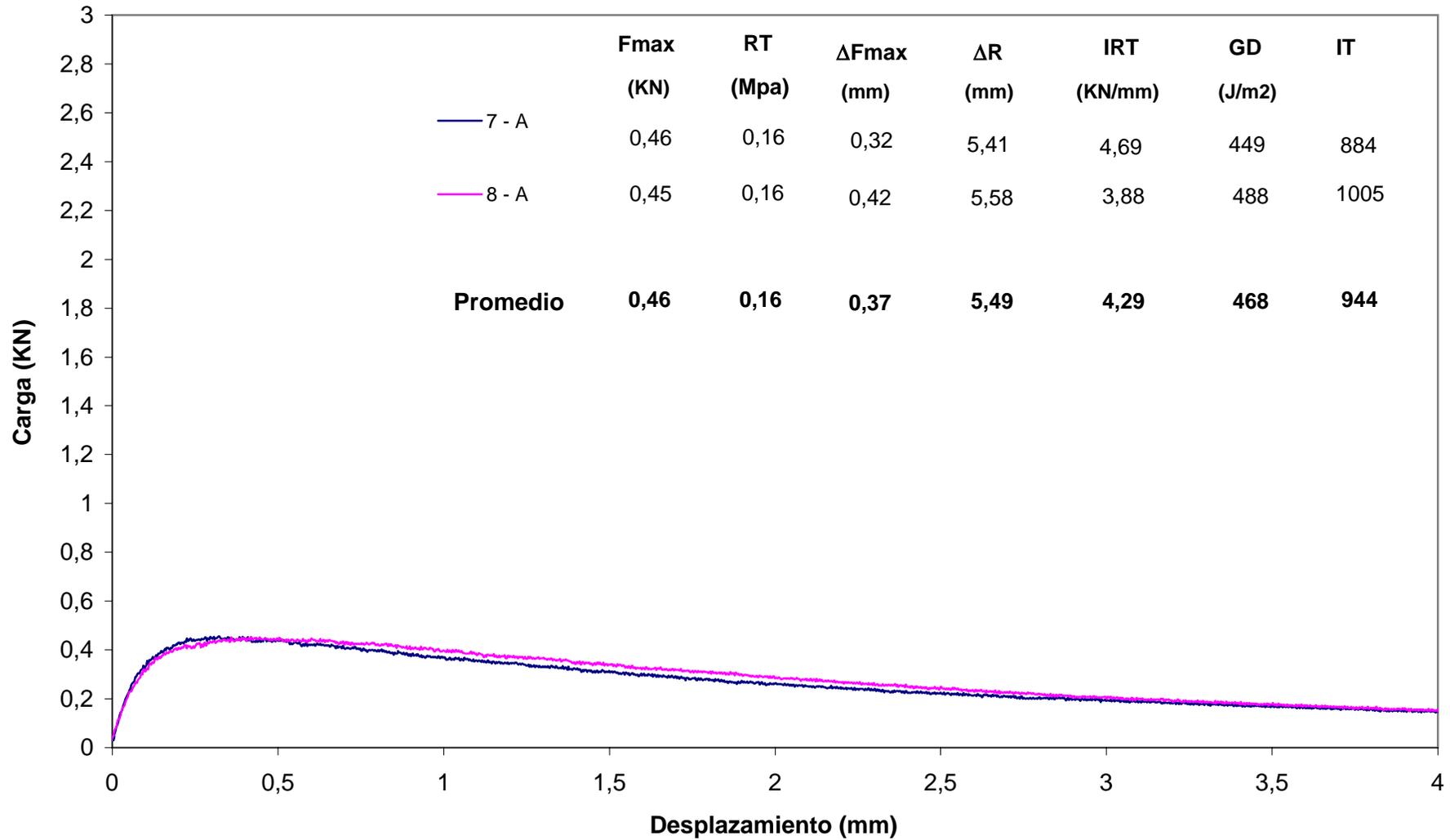
### Mezcla BBTM 11B- 10%RAP - 4,75% B sm



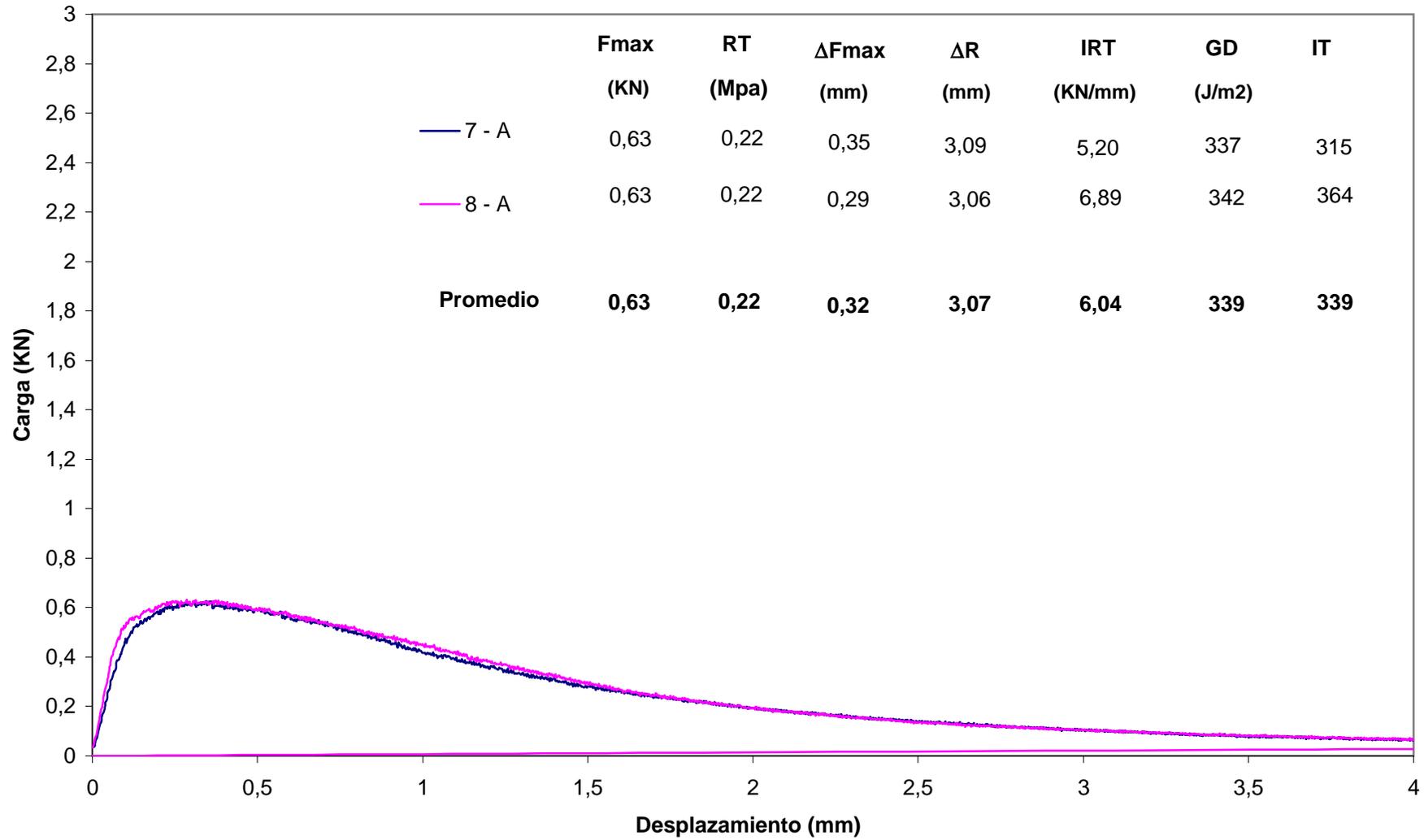
### Mezcla BBTM 11B- 10%RAP - 5,25% B sm



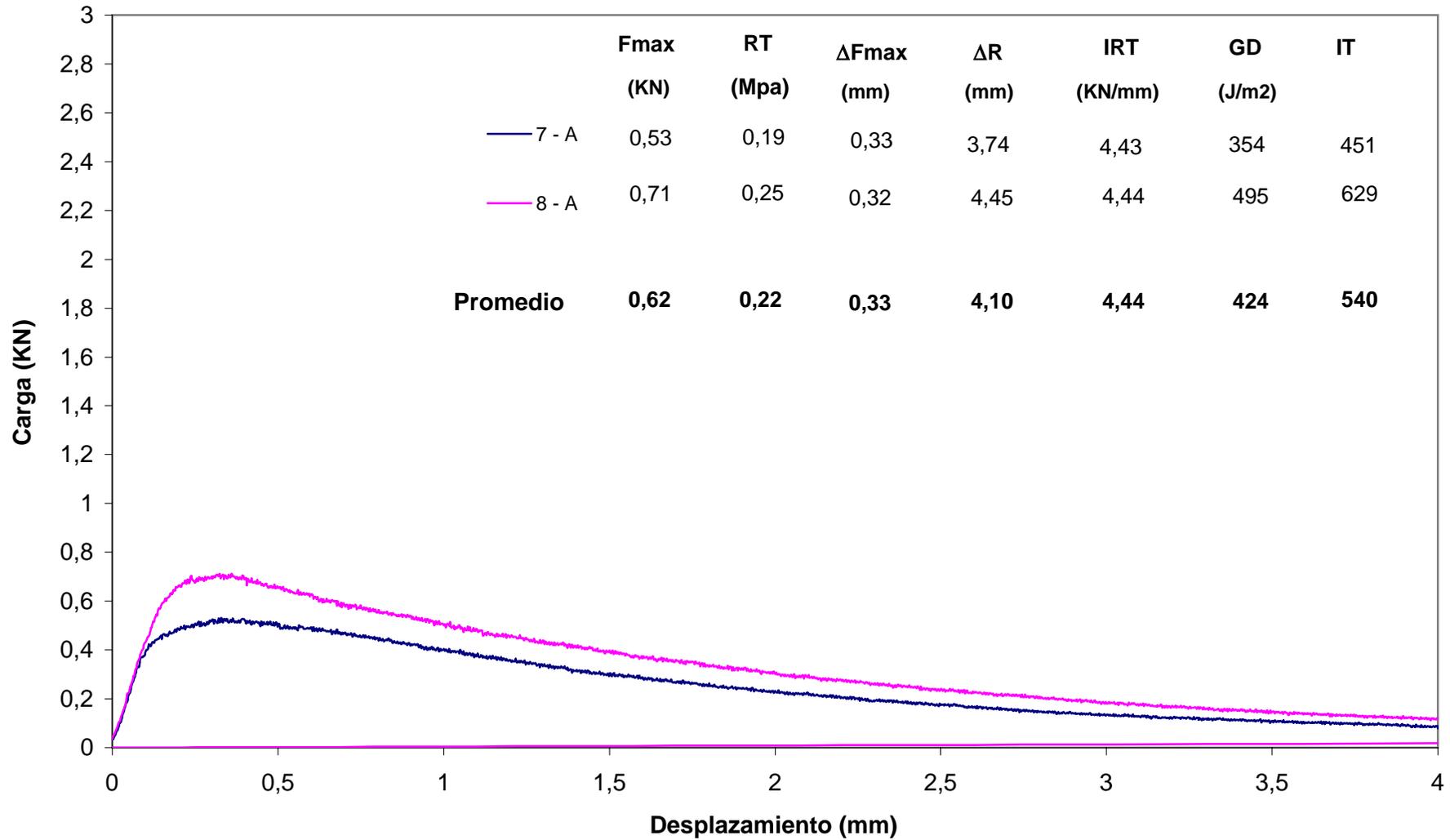
### Mezcla BBTM 11B- 10 %RAP - 5,75% B sm



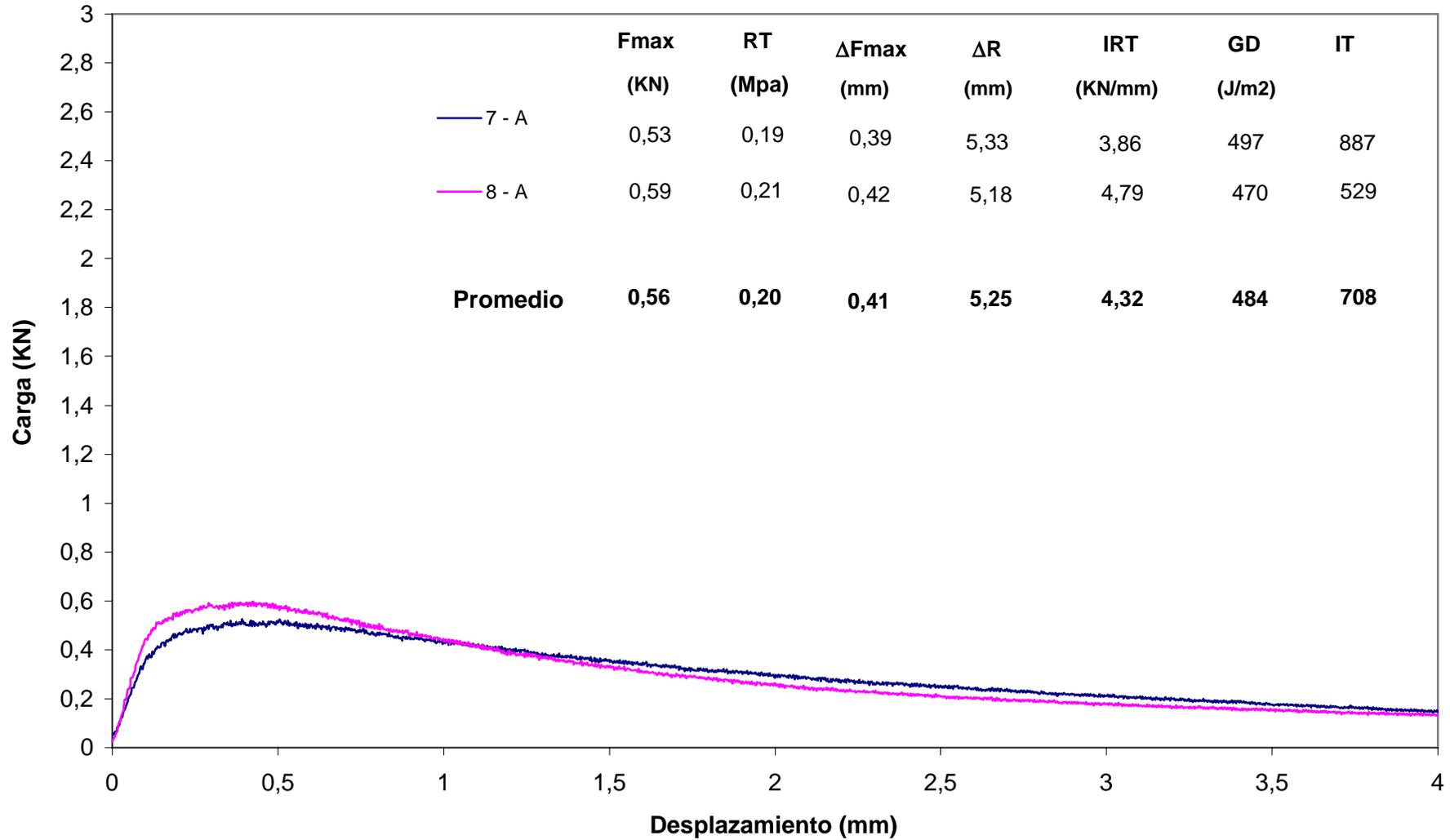
### Mezcla BBTM 11B- 20%RAP - 4,75% B sm



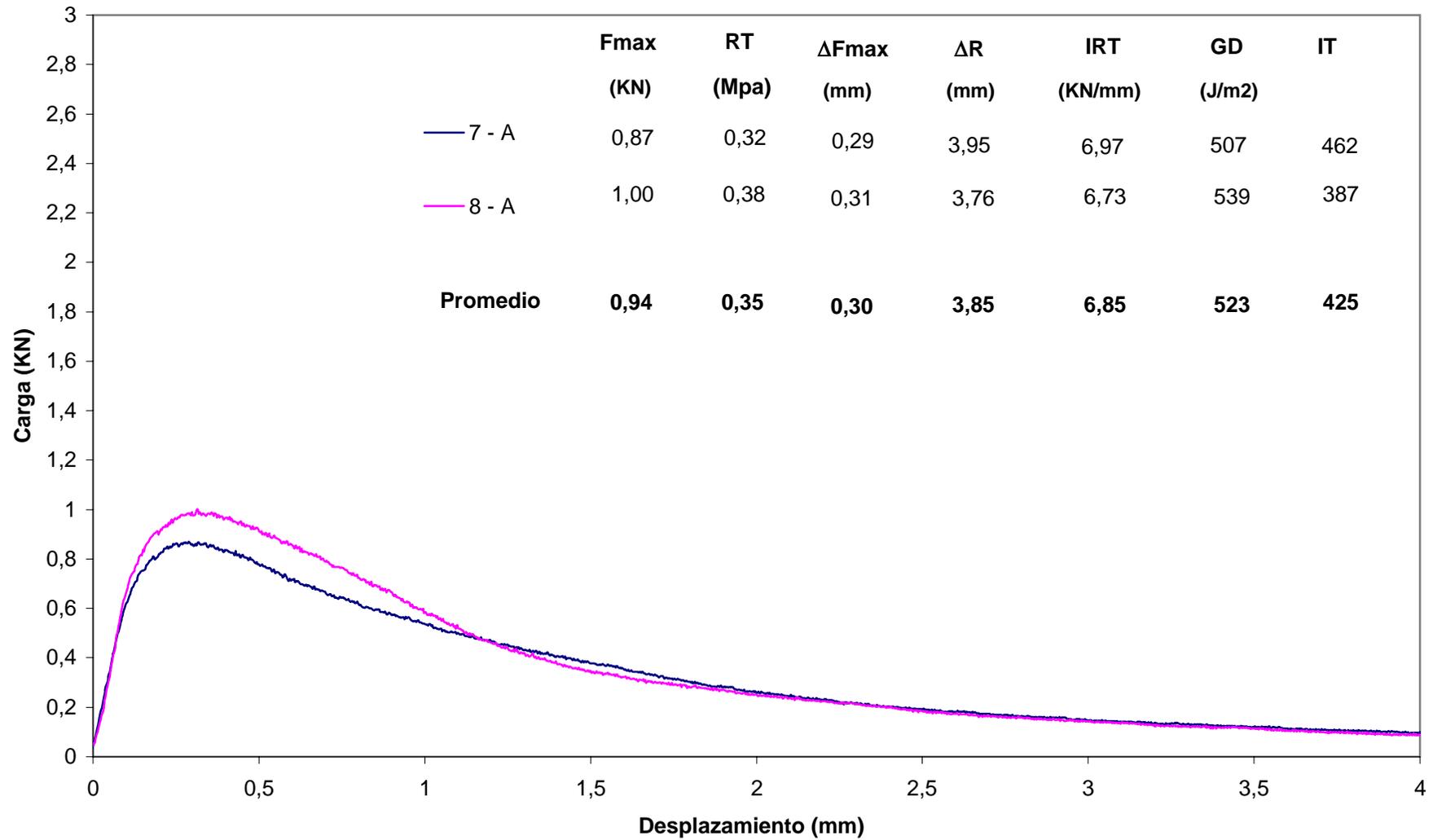
### Mezcla BBTM 11B- 20%RAP - 5,25% B sm



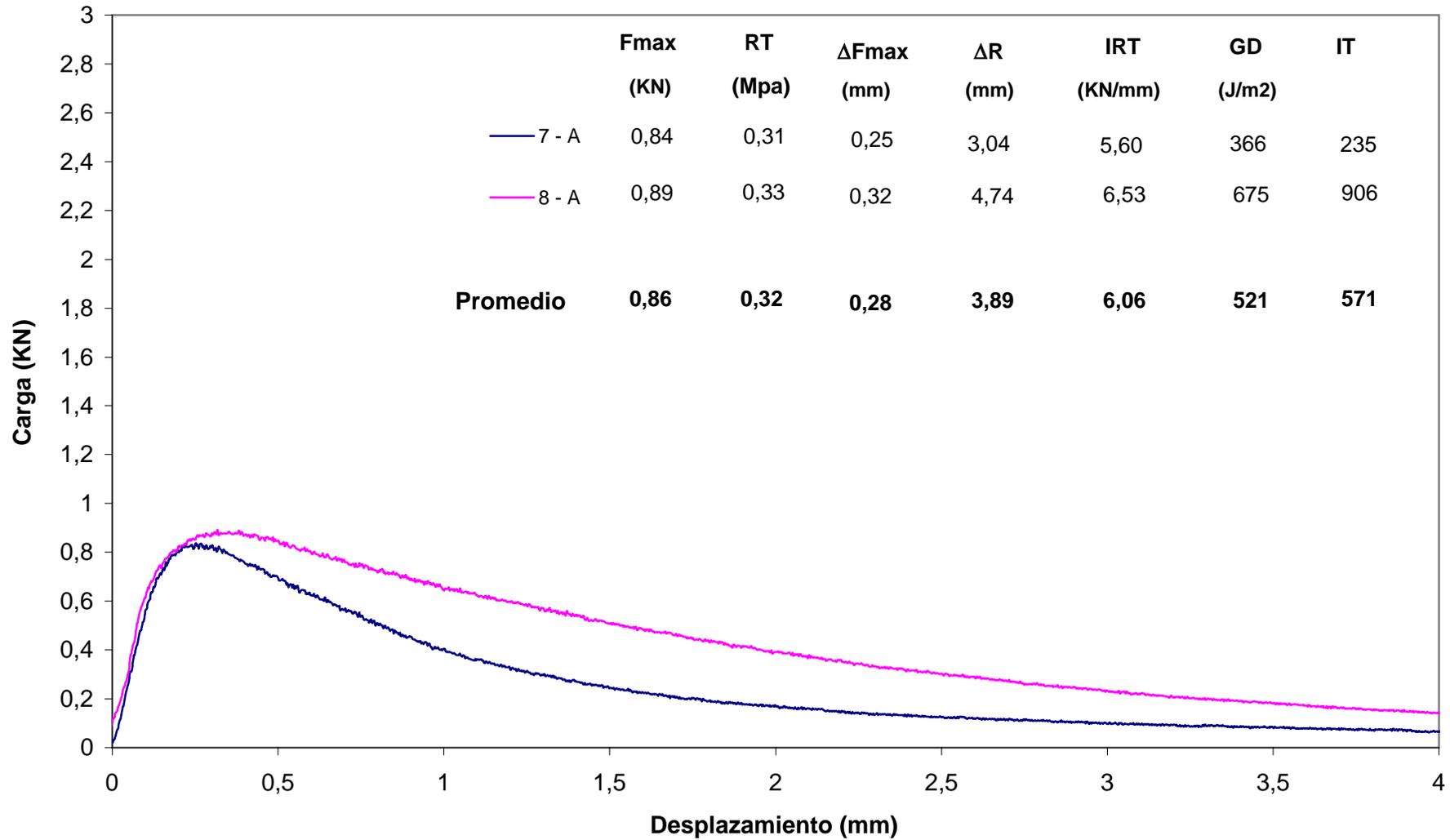
### Mezcla BBTM 11B- 20 %RAP - 5,75% B sm



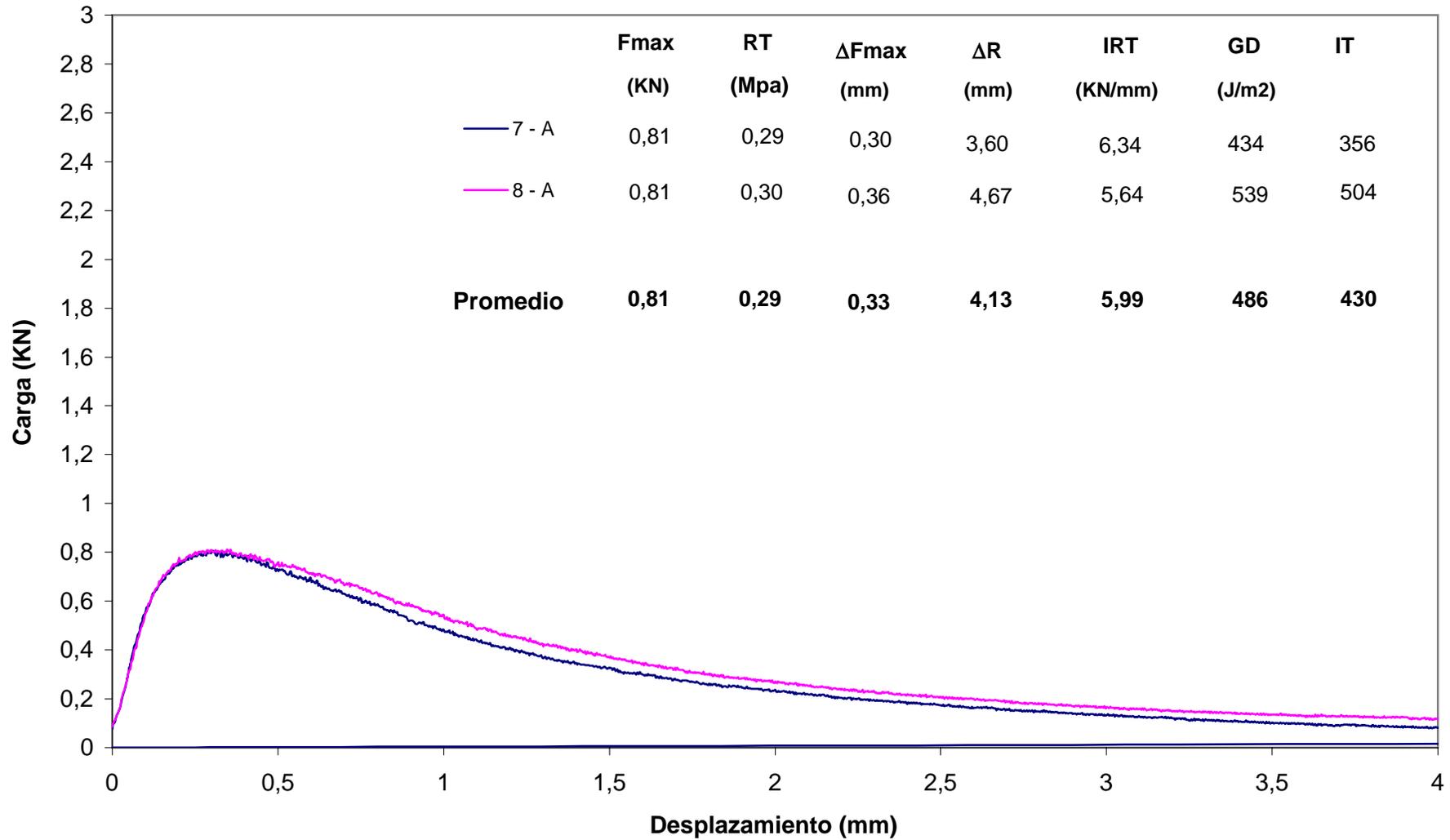
### Mezcla BBTM 11B- 40%RAP - 4,75% B sm



### Mezcla BBTM 11B- 40%RAP - 5,25% B sm



### Mezcla BBTM 11B- 40 %RAP - 5,75% B sm



## **ANEJO 5**

### **GRANULOMETRIAS DE LAS MEZCLAS FABRICADAS EN PLANTA**

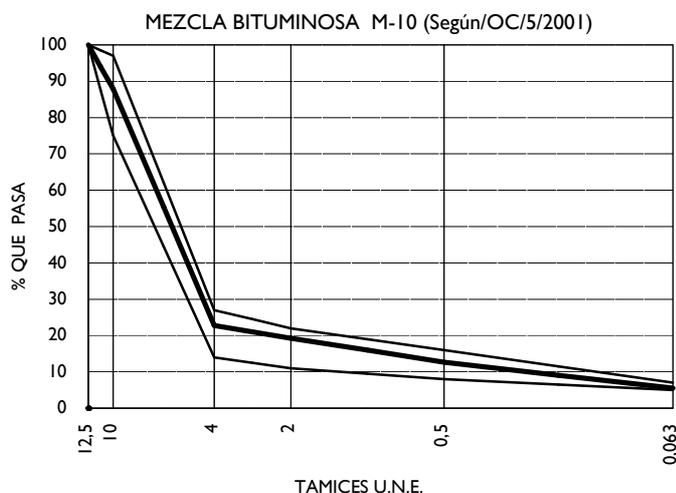
En el presente anejo se presentan los resultados de las granulometrías de las tres mezclas fabricadas en planta ( 0, 10, 20 %RAP) realizadas por el laboratorio EPTISA

OT/ **EP101053-003**

 REGISTRO **IBAM12068**

 FECHA DE TOMA **23/10/10**
**TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE**

PETICIONARIO	<b>ASFALTOS AUGUSTA, S.L</b>	NIF: B64455835															
DOMICILIO	<b>PLAZA DE LA TERRASSA INDUSTRIAL, 4 2º 4ª</b>																
OBRA	<b>Control Interno Planta 2010</b>																
LOCALIZACIÓN	<b>Muestra tomada en planta Ordal.</b>																
SUMINISTRADOR	<b>ASFALTOS AUGUSTA, S.L</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS</th> <th>VALORES OBTENIDOS</th> <th>PG-3/2001</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3"><b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b></td> </tr> <tr> <td>BETÚN SOBRE ARIDO (%)</td> <td><b>5,11</b></td> <td>≥ 5</td> </tr> <tr> <td>BETÚN SOBRE MEZCLA (%)</td> <td><b>4,86</b></td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>RELACIÓN FILLER-BETÚN</td> <td><b>1,1</b></td> <td>1,3</td> </tr> </tbody> </table>	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS	VALORES OBTENIDOS	PG-3/2001	<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>			BETÚN SOBRE ARIDO (%)	<b>5,11</b>	≥ 5	BETÚN SOBRE MEZCLA (%)	<b>4,86</b>	-	RELACIÓN FILLER-BETÚN	<b>1,1</b>	1,3
PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS	VALORES OBTENIDOS		PG-3/2001														
<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>																	
BETÚN SOBRE ARIDO (%)	<b>5,11</b>		≥ 5														
BETÚN SOBRE MEZCLA (%)	<b>4,86</b>		-														
RELACIÓN FILLER-BETÚN	<b>1,1</b>		1,3														
PLANTA	<b>Asphalt Solutions (Ordal)</b>																
USO QUE SE DESTINA	<b>CAPA DE RODADURA</b>																
ÁRIDO GRUESO	<b>Granítico</b>																
ÁRIDO FINO	<b>Calizo</b>																
CATEGORÍA DE TRÁFICO	<b>NO SE CONOCE</b>																
SALIDA DE PLANTA	-																
LLEGADA AL TAJO	-																
COMIENZO EXTENDIDO	-																
TOMA DE LA MUESTRA	-																
TEMPERATURA MUESTRA (Cº)	-																
ALBARÁN Nº	-																
MATRÍCULA CAMIÓN	-																


**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS**

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4,0	2	0,500	0,063
% QUE PASA	<b>100</b>	<b>88</b>	<b>23</b>	<b>19</b>	<b>13</b>	<b>5,5</b>

**NORMAS**

 NLT-348/90 Toma de muestras de mezclas bituminosas para pavimentación  
 UNE-EN 933-1:98 UNE-EN 933-1:98/A1:06 Análisis granulométrico de los áridos recuperad  
 NLT-164/90 Contenido de ligante en mezclas bituminosas

**OBSERVACIONES:**
*Mezcla Patron.*

 MUESTRA TOMADA POR: *J. Ibáñez*

 MUESTRA ENSAYADA POR: *Juan Pedro Luna*
*Vº Bº*

 Josep Mª Torruella Martínez  
 DIRECTOR DE LABORATORIO

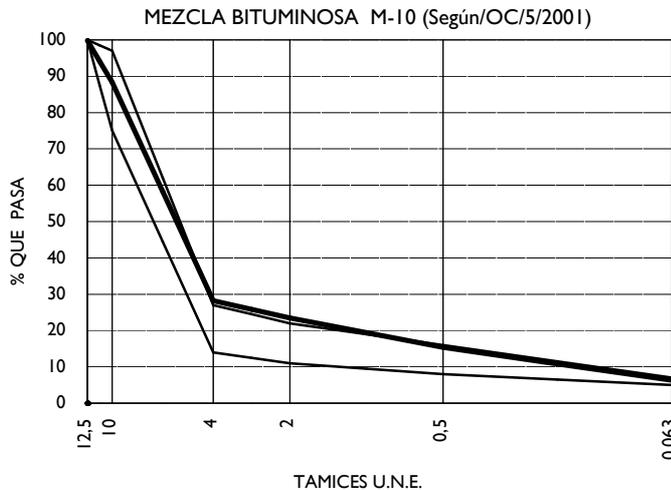
 Albert Subirats Tortosa  
 JEFE DE ÁREA

OT/ **EP101053-003**

 REGISTRO **IBAM12069**

 FECHA DE TOMA **23/10/10**
**TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE**

PETICIONARIO	<b>ASFALTOS AUGUSTA, S.L</b>	NIF: B64455835															
DOMICILIO	<b>PLAZA DE LA TERRASSA INDUSTRIAL, 4 2º 4ª</b>																
OBRA	<b>Control Interno Planta 2010</b>																
LOCALIZACIÓN	<b>Muestra tomada en planta Ordal.</b>																
SUMINISTRADOR	<b>ASFALTOS AUGUSTA, S.L</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS</th> <th>VALORES OBTENIDOS</th> <th>PG-3/2001</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3"><b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b></td> </tr> <tr> <td>BETÚN SOBRE ARIDO (%)</td> <td><b>5,23</b></td> <td>≥ 5</td> </tr> <tr> <td>BETÚN SOBRE MEZCLA (%)</td> <td><b>4,97</b></td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>RELACIÓN FILLER-BETÚN</td> <td><b>1,2</b></td> <td>1,3</td> </tr> </tbody> </table>	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS	VALORES OBTENIDOS	PG-3/2001	<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>			BETÚN SOBRE ARIDO (%)	<b>5,23</b>	≥ 5	BETÚN SOBRE MEZCLA (%)	<b>4,97</b>	-	RELACIÓN FILLER-BETÚN	<b>1,2</b>	1,3
PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS	VALORES OBTENIDOS		PG-3/2001														
<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>																	
BETÚN SOBRE ARIDO (%)	<b>5,23</b>		≥ 5														
BETÚN SOBRE MEZCLA (%)	<b>4,97</b>		-														
RELACIÓN FILLER-BETÚN	<b>1,2</b>		1,3														
PLANTA	<b>Asphalt Solutions (Ordal)</b>																
USO QUE SE DESTINA	<b>CAPA DE RODADURA</b>																
ÁRIDO GRUESO	<b>Granítico</b>																
ÁRIDO FINO	<b>Calizo</b>																
CATEGORÍA DE TRÁFICO	<b>NO SE CONOCE</b>																
SALIDA DE PLANTA	-																
LLEGADA AL TAJO	-																
COMIENZO EXTENDIDO	-																
TOMA DE LA MUESTRA	-																
TEMPERATURA MUESTRA (Cº)	-																
ALBARÁN Nº	-																
MATRÍCULA CAMIÓN	-																


**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS**

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4,0	2	0,500	0,063
% QUE PASA	<b>100</b>	<b>88</b>	<b>28</b>	<b>23</b>	<b>15</b>	<b>6,3</b>

**NORMAS**

 NLT-348/90 Toma de muestras de mezclas bituminosas para pavimentación  
 UNE-EN 933-1:98 UNE-EN 933-1:98/A1:06 Análisis granulométrico de los áridos recuperad  
 NLT-164/90 Contenido de ligante en mezclas bituminosas

**OBSERVACIONES:**
*La mezcla contiene un 10% de material reciclado.*

 MUESTRA TOMADA POR: *J. Ibáñez*

 MUESTRA ENSAYADA POR: *Juan Pedro Luna*
*Vº Bº*

 Josep Mª Torruella Martínez  
 DIRECTOR DE LABORATORIO

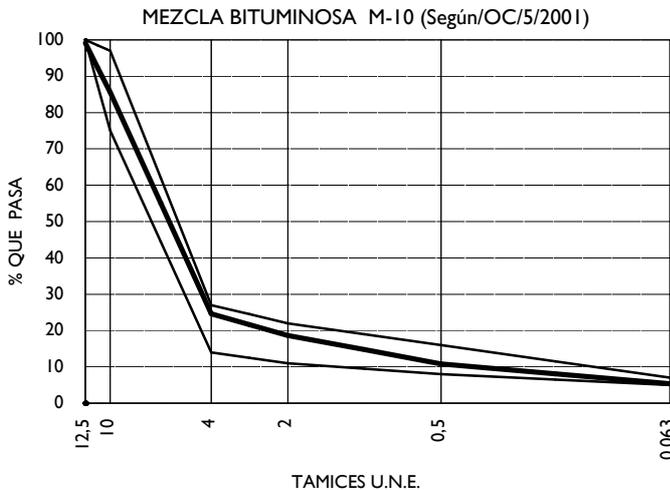
 Albert Subirats Tortosa  
 JEFE DE ÁREA

OT/ **EP101053-003**

 REGISTRO **IBAM12070**

 FECHA DE TOMA **23/10/10**
**TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE**

PETICIONARIO	<b>ASFALTOS AUGUSTA, S.L</b>	NIF: B64455835															
DOMICILIO	<b>PLAZA DE LA TERRASSA INDUSTRIAL, 4 2º 4ª</b>																
OBRA	<b>Control Interno Planta 2010</b>																
LOCALIZACIÓN	<b>Muestra tomada en planta Ordal.</b>																
SUMINISTRADOR	<b>ASFALTOS AUGUSTA, S.L</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS</th> <th>VALORES OBTENIDOS</th> <th>PG-3/2001</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3"><b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b></td> </tr> <tr> <td>BETÚN SOBRE ARIDO (%)</td> <td><b>5,04</b></td> <td>≥ 5</td> </tr> <tr> <td>BETÚN SOBRE MEZCLA (%)</td> <td><b>4,80</b></td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>RELACIÓN FILLER-BETÚN</td> <td><b>1,1</b></td> <td>1,3</td> </tr> </tbody> </table>	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS	VALORES OBTENIDOS	PG-3/2001	<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>			BETÚN SOBRE ARIDO (%)	<b>5,04</b>	≥ 5	BETÚN SOBRE MEZCLA (%)	<b>4,80</b>	-	RELACIÓN FILLER-BETÚN	<b>1,1</b>	1,3
PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS	VALORES OBTENIDOS		PG-3/2001														
<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>																	
BETÚN SOBRE ARIDO (%)	<b>5,04</b>		≥ 5														
BETÚN SOBRE MEZCLA (%)	<b>4,80</b>		-														
RELACIÓN FILLER-BETÚN	<b>1,1</b>		1,3														
PLANTA	<b>Asphalt Solutions (Ordal)</b>																
USO QUE SE DESTINA	<b>CAPA DE RODADURA</b>																
ÁRIDO GRUESO	<b>Granítico</b>																
ÁRIDO FINO	<b>Calizo</b>																
CATEGORÍA DE TRÁFICO	<b>NO SE CONOCE</b>																
SALIDA DE PLANTA	-																
LLEGADA AL TAJO	-																
COMIENZO EXTENDIDO	-																
TOMA DE LA MUESTRA	-																
TEMPERATURA MUESTRA (Cº)	-																
ALBARÁN Nº	-																
MATRÍCULA CAMIÓN	-																


**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS**

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4,0	2	0,500	0,063
% QUE PASA	<b>99</b>	<b>86</b>	<b>25</b>	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>5,4</b>

**NORMAS**

 NLT-348/90 Toma de muestras de mezclas bituminosas para pavimentación  
 UNE-EN 933-1:98 UNE-EN 933-1:98/A1:06 Análisis granulométrico de los áridos recuperad  
 NLT-164/90 Contenido de ligante en mezclas bituminosas

**OBSERVACIONES:**
*La mezcla contiene un 20% de material reciclado.*

 MUESTRA TOMADA POR: *J. Ibáñez*

 MUESTRA ENSAYADA POR: *Juan Pedro Luna*
*Vº Bº*

 Josep Mª Torruella Martínez  
 DIRECTOR DE LABORATORIO

 Albert Subirats Tortosa  
 JEFE DE ÁREA