

# Capítulo

# 4

## ESTUDIOS EXPERIMENTALES

### 4.1. Introducción

En el capítulo anterior se analizó la metodología utilizada por diferentes países para el diseño, fabricación y control de calidad de las mezclas bituminosas recicladas en planta en caliente y se pudo observar que, en términos generales, las especificaciones exigidas a este tipo de mezclas son las mismas que se aplican a las mezclas convencionales del mismo tipo.

Por otra parte, pocas veces se toman en cuenta en el diseño de las mezclas, factores que pueden ser muy importantes para su comportamiento, tales como, la vida a fatiga de la mezcla, el posible envejecimiento prematuro del ligante debido a la utilización de betunes blandos o de rejuvenecedores, la excesiva rigidización de la mezcla que se puede presentar debido al endurecimiento del betún contenido en el MBR, entre otros.

Tomando en cuenta todo lo anterior, la escasa experiencia española en el reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente, y que la normativa específica para la fabricación de este tipo de mezclas se encontraba en desarrollo en este país, se decidió en el Laboratorio de Caminos de la U.P.C. llevar a cabo una serie de estudios para analizar el comportamiento de dichas mezclas y poder compararlas con mezclas convencionales equivalentes, a fin de asegurar que su calidad y características son adecuados para su utilización en la construcción y rehabilitación de firmes de carreteras.

En este capítulo se describen los trabajos realizados en este laboratorio para el análisis del comportamiento de mezclas bituminosas utilizadas habitualmente en España, incorporando en su composición diferentes porcentajes de MBR y variando el contenido y tipo de ligante de aportación.

Se han empleado ensayos de laboratorio de aplicación general para mezclas convencionales, tales como el Marshall, Tracción Indirecta, Flexotracción, y algunos de uso no tan frecuente pero que brindan información muy valiosa sobre las características de las mezclas, tales como el Barcelona Tracción Directa, y el UCL, también se han utilizado ensayos para la extracción y caracterización de ligantes y para el estudio de las características de los áridos.

Este estudio pretende comprobar si las mezclas recicladas en planta en caliente pueden lograr características similares a las mezclas convencionales del mismo tipo, así como, analizar si los ensayos y procedimientos convencionales de diseño y control de calidad empleados en España, son suficientes para garantizar el buen comportamiento de este tipo de mezclas.

Por último, se intentará definir una serie de criterios y recomendaciones para el diseño, fabricación y control de calidad de las mezclas bituminosas recicladas en planta en caliente en España.

## 4.2. Plan de trabajo

Una vez analizados los criterios utilizados en otros países, y basándonos en las metodologías y recomendaciones empleados en ellos, se han planificado una serie de campañas de ensayos en el Laboratorio de Caminos de la U.P.C., para estudiar las características de diferentes mezclas bituminosas recicladas en caliente, utilizando los ensayos y especificaciones empleados en este país para la fabricación de mezclas convencionales, y de esta manera, definir criterios de diseño y control de calidad necesarios para garantizar el buen comportamiento de este tipo de mezclas.

En primer lugar se desarrollaron unos estudios previos en los que se analizó el comportamiento de mezclas recicladas en caliente con diferentes cantidades de MBR en su composición, para observar la variación de sus características mecánicas y determinar los ensayos de laboratorio más adecuados para realizar los trabajos posteriores.

Para el desarrollo de los estudios previos se fabricaron mezclas tipo S-12 incorporando diferentes porcentajes de MBR en su composición y con dos tipos de ligante de aportación B-80/100 y B-150/200, realizando tres diferentes ensayos de laboratorio para evaluar sus características mecánicas, ensayo Marshall, ensayo de Tracción Indirecta y ensayo de Tracción Directa BTD.

Una vez concluidos los estudios previos y analizando los resultados obtenidos, se realizó un segundo estudio en el que se estudiaron mezclas tipo S-12 con diferentes porcentajes de MBR, teniendo especial cuidado de mantener la granulometría constante para todos los casos; en este trabajo se emplearon dos ensayos para analizar las características mecánicas de las mezclas, Tracción Indirecta y Tracción Directa BTD y se utilizaron dos betunes de aportación B-60/70 y B-150/200.

Posteriormente se llevó a cabo un completo estudio de las características mecánicas de diferentes mezclas recicladas en caliente empleando los Ensayos Marshall y de Tracción

Indirecta tanto en seco como tras inmersión, para comparar los resultados con los de mezclas convencionales equivalentes.

En este trabajo, se estudiaron tres tipos de mezclas habitualmente utilizadas en España en capas intermedias y de base S-20, G-20 y G-25, incorporando en todos los casos un 30% de MBR, valor comúnmente utilizado por las plantas adaptadas para el reciclado de mezclas bituminosas, y se emplearon tres tipos de ligantes de aportación B-80/100, B-150/200 y B-180/220.

Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores conseguidos por mezclas equivalentes fabricadas a partir de un 100% de árido virgen y un betún B-60/70 usado habitualmente para la fabricación de éste tipo de mezclas.

En cuarto lugar se evaluó un parámetro de gran importancia para cualquier mezcla, su vida a fatiga, esta parte del estudio consistió en analizar la vida a fatiga de dos tipos de mezclas, S-20 y G-20 utilizando el Ensayo de Flexotracción Dinámica normalizado en España.

Al igual que en el trabajo anterior, se utilizó un 30% de MBR y un ligante de aportación B-150/200. Posteriormente se compararon los resultados con los de mezclas de referencia fabricadas sin MBR y con un betún B-60/70, lo que permitirá analizar la influencia del MBR en el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas.

Generalmente, el MBR está formado por áridos y por materiales bituminosos que han perdido parte de sus propiedades debido al tiempo que han estado en servicio, y su reciclado debería lograr la recuperación de dichas propiedades. El envejecimiento de las mezclas bituminosas afecta principalmente al mástico, debido a la oxidación y a la pérdida de las fracciones más volátiles del ligante, lo que lo vuelve más rígido provocando una pérdida de cohesión del conjunto.

Por todo lo anterior, se pensó en evaluar el comportamiento del mástico de las mezclas recicladas en caliente, mediante el Ensayo UCL<sup>®</sup> desarrollado en esta Universidad y que

permite, de una forma clara y sencilla, analizar el efecto que tiene sobre la cohesión del mástico la incorporación de diferentes porcentajes de MBR y la utilización de diferentes tipos de ligantes de aportación.

Primeramente se analizó el comportamiento de másticos que contienen MBR en su composición a diferentes temperaturas, comparando su comportamiento con el de un mástico patrón compuesto por materiales vírgenes. En segundo lugar, se analizó el comportamiento frente al envejecimiento, de másticos compuestos por un 60% de MBR y diferentes tipos de betún y nuevamente se compararon los resultados con los de una mezcla patrón.

Por último se realizará un análisis conjunto de los resultados y conclusiones obtenidos en cada uno de los estudios, para proponer una serie de recomendaciones y de criterios para el diseño, fabricación y control de calidad de las mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta.

Esperamos aportar con éste trabajo, información que ayude a impulsar el empleo de ésta técnica en los proyectos de construcción y rehabilitación de firmes bituminosos, pero también es muy importante proponer nuevas líneas de investigación, que sirvan para ampliar el conocimiento de la técnica, logrando su aplicación en un mayor número de proyectos.

A continuación se presenta la Fig. 4.2.1 que resume de una forma sencilla las diferentes partes de los trabajos que se han desarrollado en esta tesis y los ensayos de laboratorio que han sido utilizados para cada una de ellas.

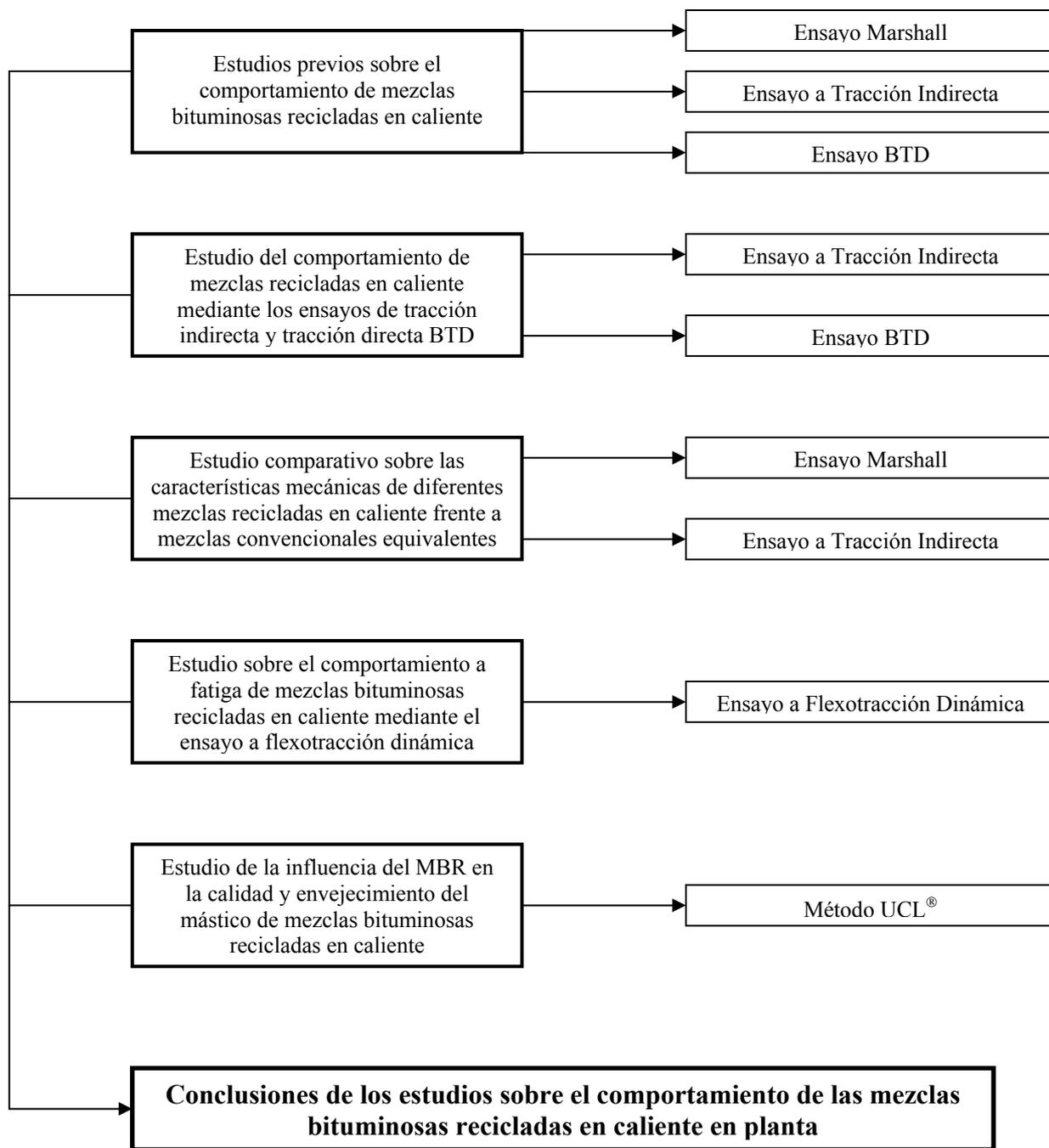


Fig. 4.2.1 Resumen del plan de trabajo de los estudios experimentales

## **4.3. Estudios previos sobre el comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente**

### **4.3.1. Planteamiento**

El objetivo primordial de este primer estudio es analizar la variación de algunas de las propiedades mecánicas más importantes de las mezclas bituminosas cuando se incorporan en su composición diferentes porcentajes de MBR y se utilizan para su fabricación diferentes tipos y porcentajes de betún de aportación, de esta manera se pretende definir los factores que mayor influencia tienen sobre el comportamiento de las mezclas recicladas y cuales son las características más susceptibles de sufrir variaciones al incorporar materiales fresados.

En este estudio se utilizarán tres ensayos de laboratorio para analizar el comportamiento de cada una de las composiciones utilizadas, el ensayo Marshall, ensayo de Tracción Indirecta y ensayo de Tracción Directa BTD, de esta manera se pretende ver la información más valiosa que nos puede brindar cada uno de estos ensayos sobre el comportamiento de las mezclas recicladas y así definir las características más importantes a estudiar y los ensayos necesarios para los trabajos futuros.

### **4.3.2. Materiales empleados**

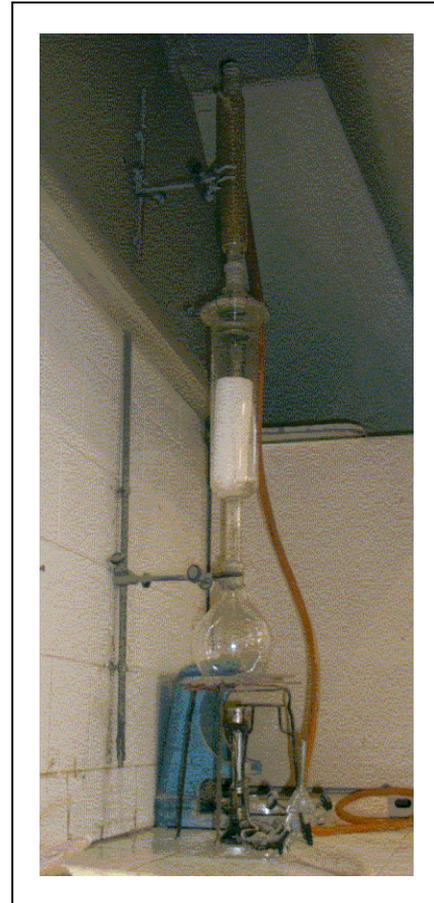
Es muy importante para el desarrollo del estudio definir los materiales que se utilizarán en la fabricación de las mezclas bituminosas, a continuación se describen las principales características de los materiales que formarán las mezclas fabricadas para este trabajo:

#### **Material fresado de pavimentos (MBR)**

Es uno de los principales elementos que forman parte de las mezclas bituminosas recicladas y está formado básicamente por un gran porcentaje de áridos y un ligante bituminoso envejecido.

En este trabajo se utilizará MBR proveniente del proyecto de refuerzo del firme de la carretera comarcal 1410, en el tramo Solsona – Barcelona, que se ha caracterizado adecuadamente realizando un par de extracciones con el método de columna de destilación para determinar la granulometría del árido contenido en el fresado y el contenido de ligante del mismo.

En el método de columna de destilación el ligante es extraído del MBR por disolución en diclorometano. Primeramente, se coloca una muestra de 400g de MBR dentro del filtro que ha sido pesado previamente y se coloca dentro del matraz de columna como se muestra en la fig. 4.3.1, posteriormente, el diclorometano se coloca dentro del matraz de fondo redondo que es calentado por el mechero hasta lograr su evaporación. El diclorometano evaporado es condensado en el serpentín y cae dentro del filtro, disolviendo parte del betún del MBR. El nivel de diclorometano en el matraz de columna aumenta hasta llegar al nivel superior y entonces es vaciado nuevamente al matraz esférico, lo que completaría un ciclo. Este proceso es repetido varias veces hasta que el dicloro que pase a través del filtro salga transparente, momento en el cual se da por terminado el proceso de destilación.



**Fig. 4.3.1** Aparato de destilación

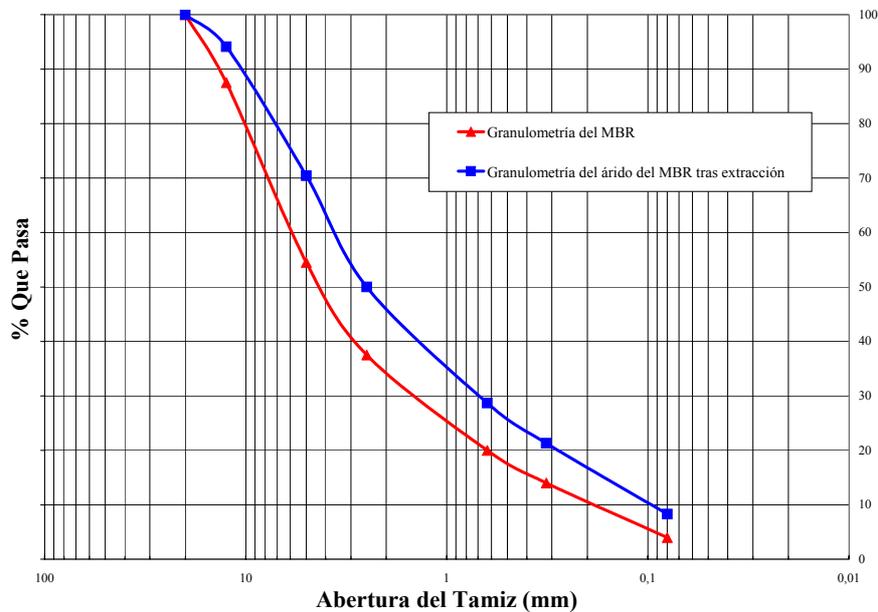
Una vez terminado el proceso de destilación se deja secar el filtro con la muestra y se pesa nuevamente para obtener el contenido de ligante del MBR, posteriormente se obtiene la granulometría del árido que queda en el filtro. Si es necesario caracterizar el ligante del MBR, se procederá a su recuperación mediante el ensayo *NLT-353/85*.

En la tabla 4.3.1 se muestra la granulometría del MBR utilizado en esta parte del trabajo antes y después de la extracción del ligante.

**Tabla 4.3.1** Granulometrías medias del MBR antes y después de la extracción del ligante

	Porcentaje medio de pasa (% en masa) Tamices UNE (mm)						
	20	12.5	5	2.5	0.63	0.32	0.08
<b>MBR en acopio</b>	100	87.5	54.5	37.5	20	14	4
<b>MBR tras extracción</b>	100	94.1	70.4	50	28.7	21.3	8.3

En la fig. 4.3.2 se muestran las curvas granulométricas del MBR antes y después de la extracción del ligante.



**Fig. 4.3.2** Granulometría del árido del MBR después de la extracción del ligante

Después de realizar las extracciones de ligante del MBR se obtiene la diferencia de pesos entre la muestra de MBR inicial y tras el proceso de destilación con lo que se obtiene el porcentaje de ligante que contiene el material fresado, en este caso y después de tres extracciones se obtuvo un contenido medio del 4 % de betún en el material fresado, este dato será utilizado para la dosificación de las diferentes mezclas que serán estudiadas.

### Áridos de aportación

Los áridos de aportación proceden de la cantera FOJ en la región de Vallirana en las cercanías de la ciudad de Barcelona, estos áridos son de naturaleza caliza, y se obtienen de la trituración de piedra de cantera o grava natural y están exentos de la presencia de grumos de arcilla, material vegetal, limos u otros materiales extraños.

Para la fabricación de las probetas que se utilizarán en los estudios previos, se añadirán los áridos de aportación en los porcentajes correspondientes para cada caso. La granulometría que presentan los áridos de aportación se observa en la tabla 4.3.2.

**Tabla 4.3.2** Granulometría del árido de aportación

	Porcentaje de pasa (% en masa)							
	Tamices UNE (mm)							
	20	12.5	5	2.5	0.63	0.32	0.16	0.08
Granulometría del árido de aportación	100	87.5	54.5	37.5	20	14	10	4

### Ligantes de aportación

Se utilizarán dos tipos diferentes de ligantes hidrocarbonados de penetración B-80/100 y B-150/200, estos ligantes son habitualmente utilizados en España para la elaboración de mezclas asfálticas, en la tabla 4.3.3 se describen sus características más importantes.

**Tabla 4.3.3** Características de los ligantes bituminosos utilizados

Características	Unidad	Norma NLT	Tipo de ligante	
			B-80/100	B-150/200
Penetración a 25°C, 100g	0.1mm	124/84	88	165
Índice de penetración		181/88	-0.5	0.9
Punto de reblandecimiento A y B	°C	125/84	47.0	44.5
Punto de Fragilidad Fraass	°C	182/84	-12	-14
Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	122/91	1.030	1.024

### 4.3.3. Granulometrías empleadas

En este trabajo se estudiarán en primer lugar mezclas compuestas por un 100% de MBR, posteriormente mezclas que contienen un 50% de MBR y un 50% de áridos de aportación y por último mezclas compuestas por un 100% de áridos vírgenes.

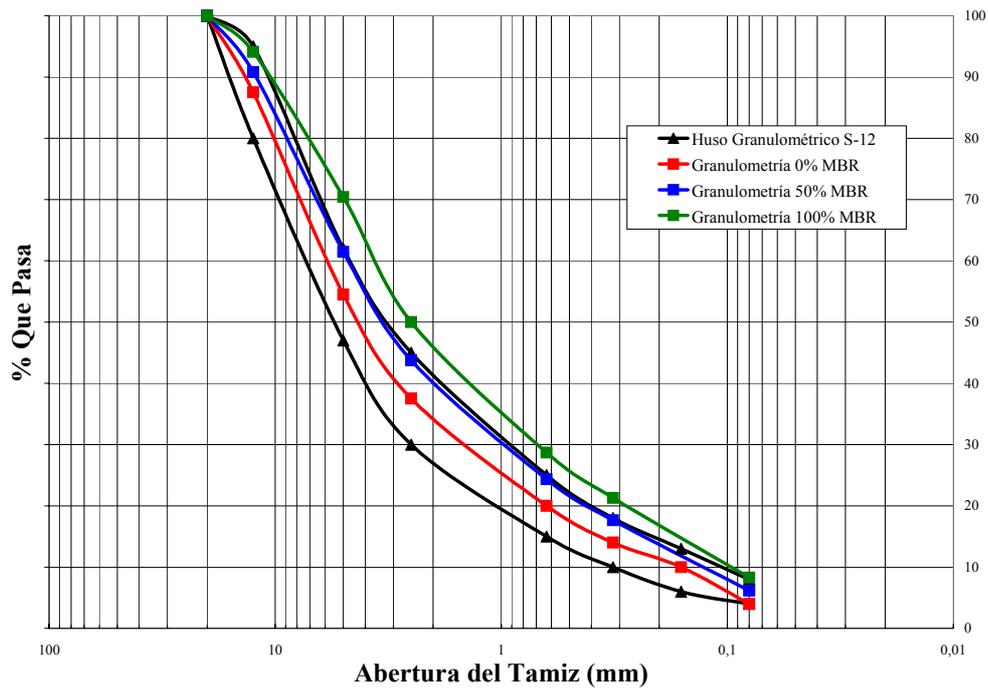
Para la composición y elaboración de cada una de las diferentes mezclas a estudiar en este trabajo, se consideró el MBR como si se tratara de un árido más a incorporar dentro de la mezcla y se ha mezclado con el árido de aportación para intentar obtener una granulometría centrada en el huso S-12.

La granulometría real de los áridos de las diferentes composiciones de las mezclas han sido obtenidos después, a partir de ensayos de extracción de las probetas ensayadas, los resultados se muestran en la tabla 4.3.4.

**Tabla 4.3.4** Granulometrías reales de las diferentes mezclas después de la extracción del ligante

	Porcentaje medio de pasa (% en masa)						
	Tamices UNE (mm)						
	20	12.5	5	2.5	0.63	0.32	0.08
Mezcla 100% MBR	100	94.1	70.4	50	28.7	21.3	8.3
Mezcla 50% MBR	100	91	62.3	43.5	24.6	17.4	6.3
Mezcla 0% MBR	100	87.5	54.5	37.5	20	14	4

En la fig. 4.3.3 se presentan las curvas granulométricas que presentaron las diferentes mezclas después del proceso de extracción de ligante y son comparadas con el huso granulométrico S-12.



**Fig. 4.3.3** Granulometría de los áridos de las diferentes mezclas estudiadas después de la extracción del ligante

Se puede observar que la granulometría del árido contenido en el fresado es más fina que la del árido de aportación, debido en parte al proceso de trituración, lo que hace que la granulometría de las mezclas con un 100% de MBR queden fuera del huso S-12 y que las mezclas fabricadas con un 50% de MBR apenas entren en el huso S-12.

#### 4.3.4. Proceso experimental

Como se mencionó anteriormente, se utilizarán en esta parte del trabajo tres tipos de ensayos de laboratorio diferentes, dos de ellos de uso común en España para el estudio de mezclas convencionales, Marshall y Tracción Indirecta y el tercero es un ensayo desarrollado en esta universidad y que nos brinda información sobre la tenacidad de las mezclas bituminosas, ensayo de Tracción Directa BTB.

Se han elaborado 18 series de probetas para cada ensayo, realizando diferentes combinaciones en las que se han variado los porcentajes de MBR y de árido virgen, el

porcentaje de betún agregado y el tipo de ligante de aportación, en la tabla 4.3.5 se muestran las características de cada serie.

**Tabla 4.3.5** Series de probetas fabricadas para cada uno de los ensayos de los estudios previos

Serie	MBR (%)	Árido virgen (%)	Betún de aportación	Betún de aportación (%)	Betún total (%)	Probetas
1	100	0	B-80/100	1	5	3
2				2	6	3
3				3	7	3
4	50	50		2	4	3
5				3	5	3
6				4	6	3
7	0	100		3	3	3
8				4	4	3
9				5	5	3
10	100	0	B-150/200	1	5	3
11				2	6	3
12				3	7	3
13	50	50		2	4	3
14				3	5	3
15				4	6	3
16	0	100		3	3	3
17				4	4	3
18				5	5	3
<b>Total</b>						<b>54</b>

Con la realización de los estudios previos se pretende analizar si los ensayos que se emplean normalmente para el diseño y control de calidad de mezclas bituminosas convencionales son adecuados y suficientes para el análisis de las mezclas recicladas, además de obtener una visión general del comportamiento de las mezclas recicladas para definir adecuadamente los trabajos posteriores.

#### 4.3.4.1. Resultados del Ensayo Marshall

El Ensayo Marshall consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de mezcla bituminosa que son colocadas en un baño de agua a 60° y se rompen posteriormente en una prensa para determinar su estabilidad y deformación. El proceso de fabricación y de ensayo de las probetas Marshall se detalla en la norma *NLT-159/86*.

El procedimiento general puede utilizarse con todas las mezclas bituminosas fabricadas en caliente con un tamaño máximo de partículas de 25mm, y es aplicable al proyecto de mezclas en laboratorio mediante el método Marshall.

**Tabla 4.3.6** Resultados medios obtenidos en el Ensayo Marshall por las diferentes mezclas

<b>Ensayo Marshall</b>									
<b>MBR (%)</b>	<b>Betún de aportación</b>	<b>Betún añadido (%)</b>	<b>Betún total (%)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Deformación Máxima (mm)</b>	<b>Carga Máxima (kg)</b>	<b>Estabilidad (kg)</b>	
100	B-80/100	1	5	60.0	2.336	2.58	4305	4692	
		2	6	59.8	2.356	3.53	3136	3418	
		3	7	60.5	2.360	4.79	2388	2603	
50		2	4	58.8	2.374	2.51	3762	4289	
		3	5	58.6	2.409	2.87	2809	3202	
		4	6	59.1	2.398	3.61	2154	2456	
0		3	3	59.7	2.423	2.32	1689	1841	
		4	4	58.6	2.423	2.60	1584	1806	
		5	5	58.6	2.447	3.18	1383	1574	
100		B-150/200	1	5	60.3	2.318	2.40	4654	5073
			2	6	59.2	2.345	2.81	3493	3980
			3	7	59.8	2.337	3.45	2422	2679
50	2		4	59.8	2.338	2.44	2866	3124	
	3		5	59.1	2.389	2.68	2442	2742	
	4		6	59.1	2.407	3.36	1801	2053	
0	3		3	59.0	2.393	2.15	1617	1843	
	4		4	58.7	2.428	2.18	1562	1781	
	5		5	58.6	2.449	2.40	1362	1552	

En la tabla 4.3.6 se muestran los valores medios más importantes obtenidos en laboratorio al ensayar cada una de las series fabricadas con los diferentes porcentajes de MBR, de betún agregado y de tipo de ligante.

Posteriormente a la realización del ensayo Marshall y a la obtención de los valores medios, se procedió a graficar cada uno de los parámetros obtenidos para entender mejor el comportamiento de las mezclas.

Al analizar el comportamiento de las curvas de densidades Marshall mostradas en la fig. 4.3.4 se observa claramente que a menor contenido de MBR se obtienen mayores densidades, debido posiblemente a la dificultad para compactar adecuadamente la parte que contiene material fresado.

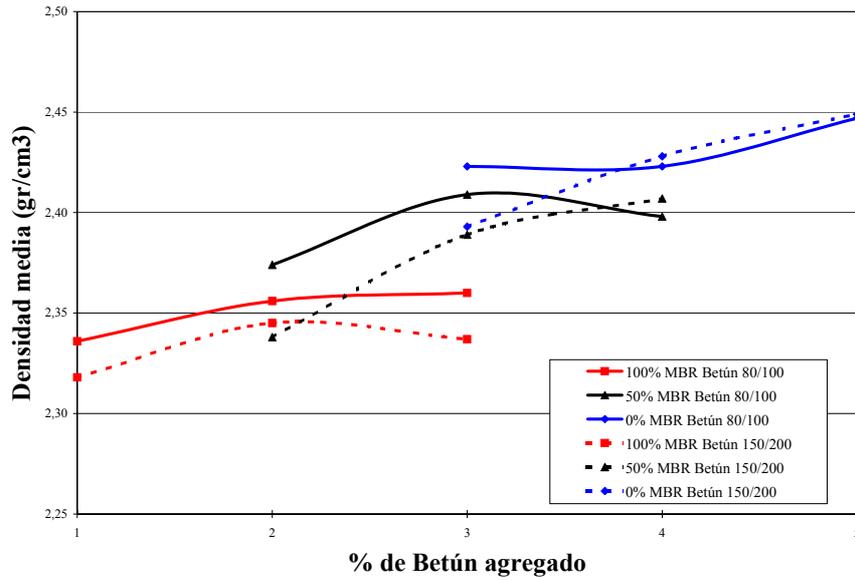


Fig. 4.3.4 Densidades medias de las probetas Marshall fabricadas con las diferentes mezclas

En general, se observa un incremento de la densidad a medida que se incorpora un mayor porcentaje de ligante, pero la tendencia de las curvas hace pensar en la existencia de un valor máximo, ya que en algunos casos, después de un cierto valor, las curvas parecen estabilizarse y en algunos casos incluso disminuyen, este comportamiento es común en las mezclas bituminosas.

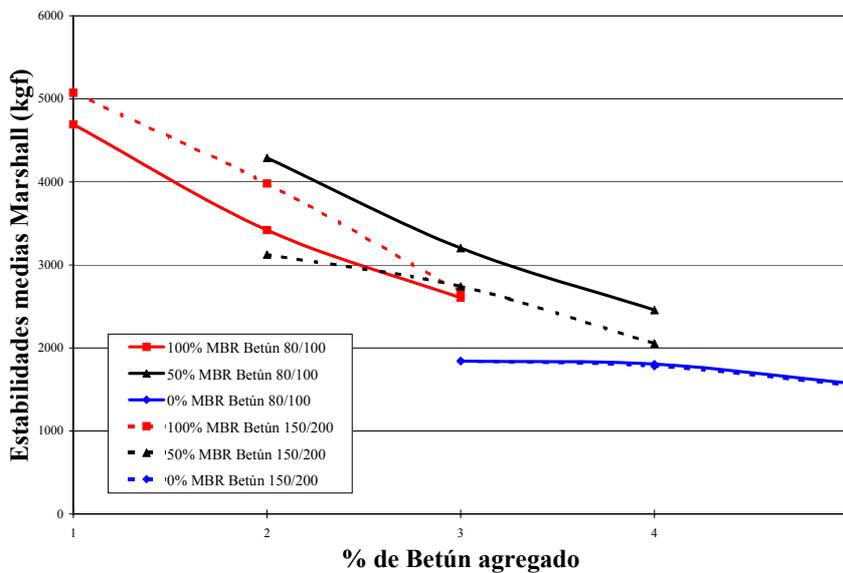


Fig. 4.3.5 Estabilidades medias de diferentes mezclas en el ensayo Marshall

En la fig. 4.3.5 se muestran los valores de las estabilidades medias Marshall, de donde se puede concluir que la estabilidad se incrementa con el contenido de MBR, debido principalmente a la rigidez aportada por el ligante envejecido, y por el contrario, la estabilidad disminuye sensiblemente al aumentar el contenido de ligante.

La influencia del tipo de betún agregado sobre la estabilidad media obtenida es similar ya que en unos casos la estabilidad es ligeramente mayor en las mezclas que contienen el betún B-80/100, en otros con el B-150/200 y en otros son prácticamente iguales, pero lo importante es que las tendencias son las mismas para ambos ligantes de aportación.

Por último, la fig. 4.3.6 muestra la evolución de las deformaciones en el Ensayo Marshall, en donde se observa que la deformación a rotura crece un poco al aumentar el contenido de MBR en mezcla, sin embargo, esto no quiere decir que las mezclas con altos porcentajes de MBR sean más dúctiles ya que su estabilidad es mucho más elevada que la de las mezclas convencionales.

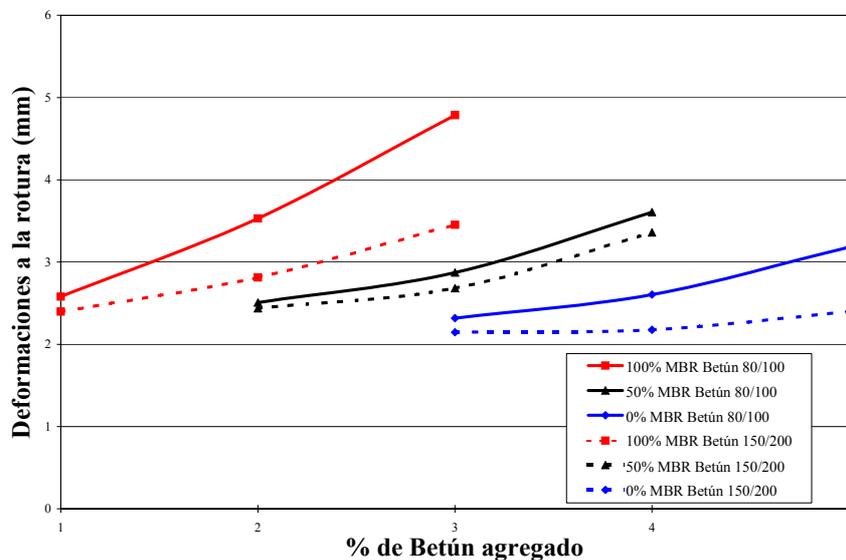


Fig. 4.3.6 Deformaciones medias de diferentes mezclas en el ensayo Marshall

Por otra parte, se observa que las deformaciones se incrementan notablemente al aumentar el porcentaje de betún agregado en las mezclas.

Si hacemos un análisis de las tendencias obtenidas en este Ensayo podríamos concluir que una mezcla con un alto contenido de MBR es adecuada para formar parte de un firme, ya que, en general, presentan una estabilidad y deformación que cumplen con las especificaciones para mezclas convencionales.

De cualquier forma queda la duda de que el Ensayo Marshall por si solo sea adecuado para evaluar una mezcla reciclada, ya que son las mezclas recicladas con mayor porcentaje de MBR, las que mejores características presentan en cuanto a estabilidad, pero pueden ser demasiado rígidas y propensas a agrietarse.

Aunque las mezclas recicladas estudiadas cumplen con las especificaciones Marshall establecidas para mezclas convencionales, sería importante analizar un parámetro que no se emplea normalmente pero que podría dar información importante sobre su rigidez.

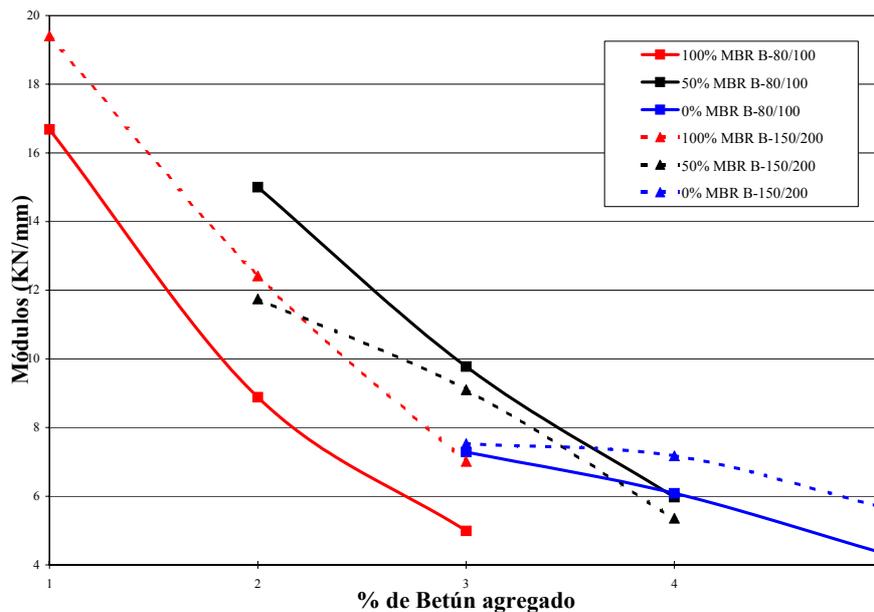


Fig. 4.3.7 Módulos Marshall de diferentes mezclas

Se trata del Módulo Marshall  $M$ , obtenido de dividir la carga máxima de las mezclas en el ensayo Marshall entre su deformación Marshall, este valor podría dar una idea de la fragilidad de las mezclas, en la fig. 4.3.7 se presentan los Módulos obtenidos por las mezclas estudiadas calculados a partir de la fórmula 4.3.1.

$$M = P_{\max} / d \quad \text{Fórmula (4.3.1)}$$

dónde  $M$  = Módulo Marshall,  $P_{\max}$  = Carga máxima, y  $d$  = deformación.

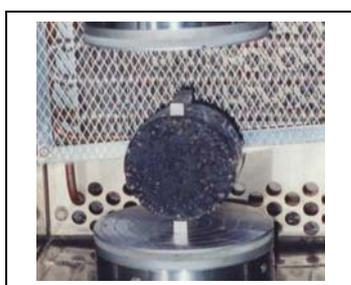
Se observa claramente que el Módulo Marshall se eleva drásticamente al aumentar el contenido de MBR en las mezclas y que disminuye al aumentar el porcentaje de betún añadido, por otra parte se observa que en ningún caso el Módulo Marshall de las mezclas convencionales ha superado el valor de 8 kN/mm mientras las mezclas con un 100% de MBR prácticamente llegan a los 20 kN/mm.

Sería importante seguir analizando este parámetro en los trabajos posteriores para decidir si realmente es un indicador que nos aporta una información importante para el diseño de las mezclas recicladas.

#### 4.3.4.2. Resultados del Ensayo a Tracción Indirecta (Ensayo Brasileño)

El Ensayo a Tracción Indirecta o Ensayo brasileño, también conocido con el nombre de resistencia a compresión diametral de mezclas bituminosas utilizadas en la pavimentación de carreteras, se detalla en la norma *NLT-346/90*.

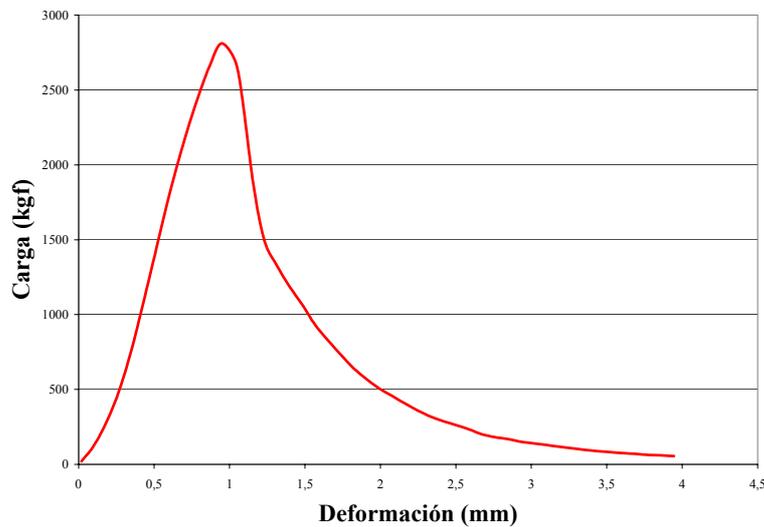
Este Ensayo consiste básicamente en imponer una deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica, fabricada en idénticas condiciones que para el Ensayo Marshall, situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de forma que los esfuerzos aplicados a la probeta sean sobre generatrices opuestas tal y como se muestra en la fig. 4.3.8.



**Fig. 4.3.8** Ensayo de tracción indirecta

El parámetro a medir con este Ensayo es la carga de rotura de la probeta, con la que se calculará la resistencia a compresión diametral también conocida como resistencia a tracción indirecta, utilizada para la caracterización de las mezclas bituminosas.

A continuación se presenta una curva carga-deformación obtenida por una mezcla bituminosa al ser sometida al ensayo de tracción indirecta, esta curva nos sirve para observar el comportamiento típico presentado por las diferentes mezclas en este ensayo.



**Fig. 4.3.9** Curva carga-deformación típica de mezclas bituminosas en el ensayo a Tracción Indirecta

En este caso, se aplicará el Ensayo a una temperatura de 5°C, en la tabla 4.3.7 se presenta un resumen de los valores medios más relevantes obtenidos para los diferentes grupos de probetas fabricadas en este estudio y que fueron sometidas al Ensayo de Tracción Indirecta.

Con los valores de las cargas máximas obtenidas en el ensayo a tracción indirecta, se calculará la resistencia a tracción indirecta  $R.T.I.$ , para cada una de las probetas ensayadas utilizando la fórmula 4.3.2.

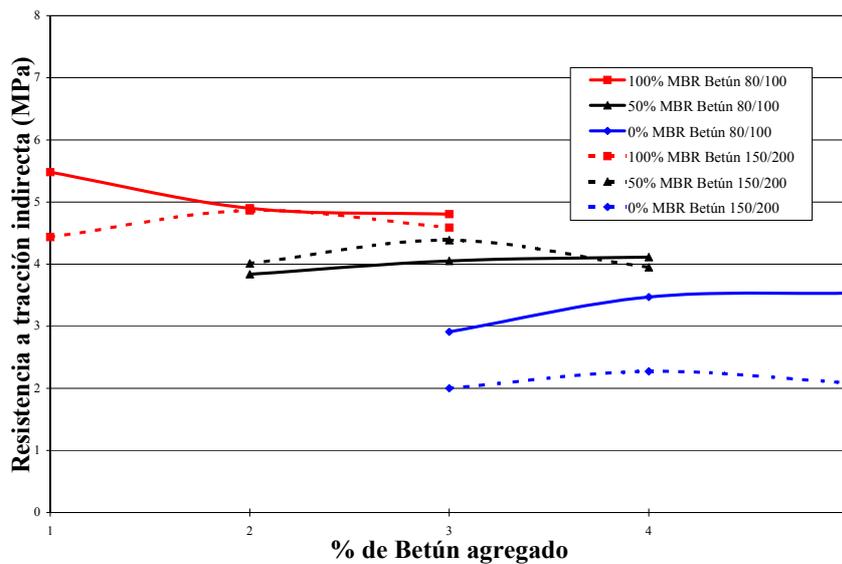
$$R.T.I. = \frac{2P}{\pi \times h \times d} \quad \text{Fórmula (4.3.2)}$$

dónde  $R.T.I.$  = resistencia a tracción indirecta,  $P$  = carga máxima de rotura,  $h$  = altura efectiva de la probeta, y  $d$  = diámetro de la probeta.

**Tabla 4.3.7** Valores medios obtenidos en el Ensayo a Tracción Indirecta por las diferentes mezclas

Ensayo de Tracción Indirecta a 5°C								
MBR (%)	Betún de aportación	Betún añadido (%)	Betún total (%)	Altura (mm)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Deformación Máxima (mm)	Carga Máxima (kgf)	R.T.I. (MPa)
100	B-80/100	1	5	57.9	2.390	0.76	5061	5.48
		2	6	58.3	2.390	0.73	4556	4.90
		3	7	59.2	2.370	0.80	4536	4.80
50		2	4	58.8	2.390	0.70	3603	3.84
		3	5	58.3	2.420	0.88	3768	4.05
		4	6	58.5	2.420	0.98	3837	4.11
0		3	3	59.4	2.360	0.96	2757	2.91
		4	4	59.0	2.410	0.99	3271	3.47
		5	5	59.0	2.440	1.14	3325	3.53
100		B-150/200	1	5	58.5	2.450	0.74	4139
	2		6	58.5	2.500	0.88	4539	4.86
	3		7	59.1	2.510	0.81	4329	4.59
50	2		4	58.0	2.410	0.77	3712	4.01
	3		5	58.0	2.430	0.88	4058	4.39
	4		6	58.4	2.420	1.10	3680	3.95
0	3		3	59.3	2.300	0.93	1894	2.00
	4		4	58.7	2.320	1.14	2131	2.27
	5		5	58.5	2.330	1.36	1951	2.09

Una vez calculados los valores de resistencia a compresión diametral han sido graficados en la fig. 4.3.10 en la que se observa el comportamiento de las diferentes mezclas al variar el contenido de MBR, y el contenido y tipo de betún de aportación.



**Fig. 4.3.10** Resistencia a tracción indirecta de las diferentes mezclas ensayadas

Se observa que la Resistencia a Tracción Indirecta aumenta con el contenido de MBR, comportamiento muy parecido al observado en el Ensayo Marshall, pero al aumentar el contenido de ligante no se obtiene un comportamiento claro, aunque en algunos casos, se presenta lo que parece un punto máximo de resistencia que se podría observar mejor si se contara con más resultados para otros contenidos de ligante. En general, se puede decir que para el betún más duro se logran mayores resistencias.

En general las deformaciones aumentan con el contenido de ligante pero disminuyen con el contenido de MBR comportamiento que parece más lógico que el obtenido con el Ensayo Marshall, ya que las mezclas con altos contenidos de MBR son más rígidas pero más frágiles ya que la penetración del ligante que contiene el material fresado es muy baja, debido al envejecimiento sufrido durante el tiempo que ha estado en servicio.

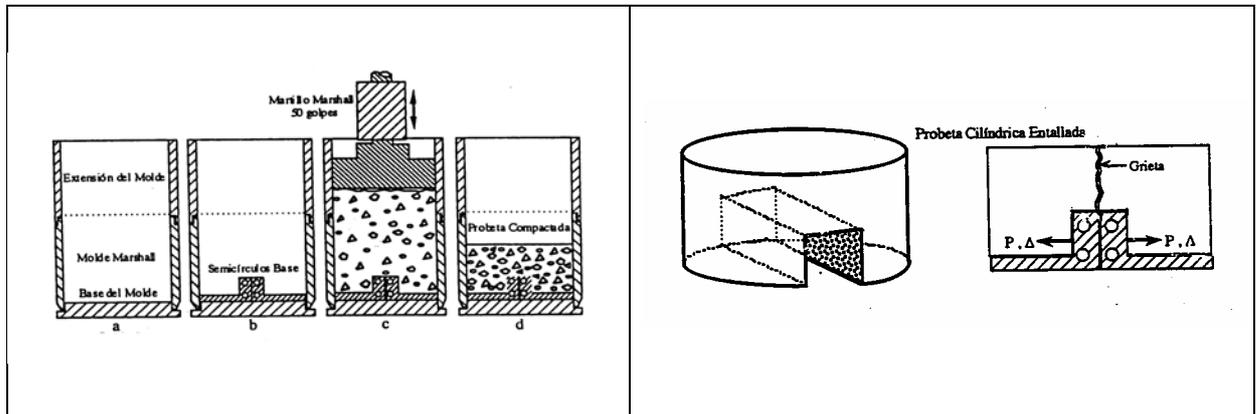
Un aspecto que vale la pena mencionar, es la dispersión que se ha presentado en los resultados de mezclas con elevados contenidos de MBR, lo cual puede deberse a que el MBR presenta variaciones en su composición, lo que nos lleva a variaciones en la granulometría y contenido de betún de las mezclas.

Será muy importante lograr una buena homogeneización y caracterización del MBR para obtener resultados más fiables en los siguientes trabajos que se realicen con este ensayo que nos brinda información muy importante sobre las mezclas recicladas.

#### 4.3.4.3. Resultados del Ensayo a Tracción Directa BTB

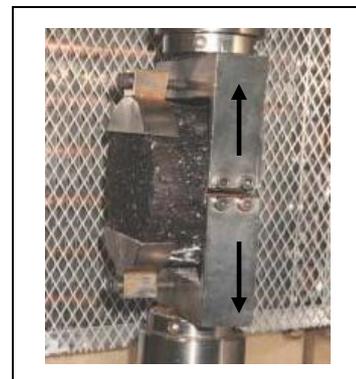
El Ensayo de Tracción Directa BTB ha sido desarrollado enteramente en el Laboratorio de Caminos de la U.P.C., y consiste en la fabricación de probetas cilíndricas, siguiendo el procedimiento Marshall, sobre una base constituida por dos semicírculos metálicos con un resalto en la zona media, lo que crea una hendidura en la parte central de la probeta y un sistema de anclaje donde se aplican los esfuerzos de tracción.

Las pletinas metálicas reducen la sección transversal de la probeta en la parte central, quedando una altura efectiva  $H$  que suele variar de 2 a 5 cm, dependiendo de la cantidad de mezcla introducida en el molde (fig. 4.3.11).



**Fig. 4.3.11** Fabricación y detalle de probetas para el Ensayo a Tracción Directa BTM

En la modalidad estática del ensayo, se aplica un desplazamiento perpendicular al sentido de compactación de la probeta mediante el sistema de anclaje (fig. 4.3.12), a una velocidad uniforme de 0.5 mm/minuto, manteniendo la temperatura de la prueba constante, en este trabajo 5°C, hasta que la carga necesaria para lograr el desplazamiento indicado sea cero, es decir, hasta la rotura total de la probeta.



**Fig. 4.3.12** Ensayo BTM

Durante el ensayo se registra la carga de tracción  $P$  en kgf en función del desplazamiento, valores con los que se calcula la resistencia máxima a tracción  $\sigma_{max}$  utilizando la fórmula 4.3.3, con estos valores también se obtiene la deformación de rotura  $dR$ , que corresponde a la deformación de la mezcla en el momento en el cual se tiene una carga cero en la probeta y se considera como el final del ensayo.

$$\sigma_{\max} = P_{\max} / h \times d \quad \text{Fórmula (4.3.3)}$$

dónde  $\sigma_{\max}$  = resistencia máxima a tracción,  $P$  = carga máxima,  $h$  = altura de la probeta, y  $d$  = diámetro de la probeta.

Las curvas carga-deformación obtenidas en este ensayo son muy importantes ya que nos muestran el comportamiento que presentan las diferentes mezclas, así como la influencia que tienen diferentes factores tales como el contenido de MBR, y el contenido y tipo de betún, sobre la tenacidad de las mezclas, su resistencia máxima a tracción y sobre su deformación de rotura.

A continuación se muestra la tabla 4.3.8 que contiene el resumen de los valores medios más importantes obtenidos para los diferentes grupos de probetas sometidas al Ensayo de Tracción Directa BTB.

**Tabla 4.3.8** Valores medios obtenidos en el Ensayo a Tracción Directa BTB por las diferentes mezclas

Ensayo de Tracción Directa BTB a 5°C							
MBR (%)	Betún de aportación	Betún añadido (%)	Betún total (%)	Altura efectiva (mm)	Deformación de Rotura $dR$ (mm)	Carga Máxima (kgf)	Resistencia a Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )
100	B-80/100	1	5	37.42	0.93	354.93	9.42
		2	6	37.76	1.30	361.43	9.41
		3	7	37.57	1.45	357.04	9.36
50		2	4	37.84	0.66	354.61	9.23
		3	5	37.71	1.20	383.31	10.00
		4	6	36.81	1.43	392.33	10.49
0		3	3	39.97	1.50	207.80	5.12
		4	4	38.45	2.42	231.43	5.92
		5	5	37.67	2.52	253.35	6.62
100	B-150/200	1	5	37.87	0.78	273.87	7.12
		2	6	37.80	0.94	347.66	9.05
		3	7	37.81	1.21	335.60	8.74
50		2	4	37.82	0.79	248.39	6.46
		3	5	37.80	1.18	277.75	7.23
		4	6	37.30	1.57	288.86	7.62
0		3	3	38.30	1.42	143.37	3.69
		4	4	38.05	1.58	163.18	4.22
		5	5	37.73	1.92	157.75	4.11

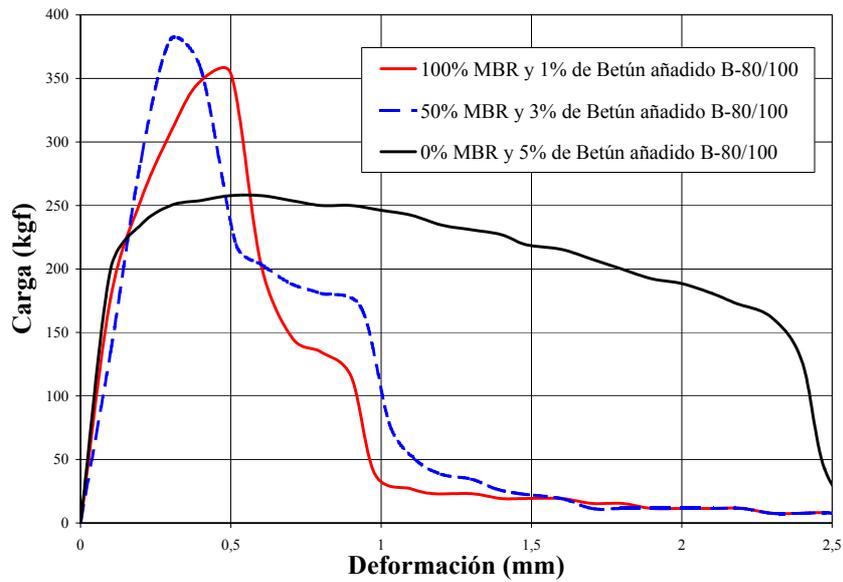
En las fig. 4.3.13 y 4.3.14 se presentan las curvas medias de carga-deformación que presentaron las mezclas fabricadas con los diferentes contenidos de MBR utilizados (0%, 50%, y 100%), pero que contienen un idéntico porcentaje de betún total en la mezcla (5%).

Se puede observar claramente que el ensayo BTD a tracción directa ha puesto de manifiesto el efecto que la incorporación de diferentes porcentajes de MBR tiene sobre algunas de las propiedades mecánicas más importantes de las mezclas bituminosas como la flexibilidad y la tenacidad.

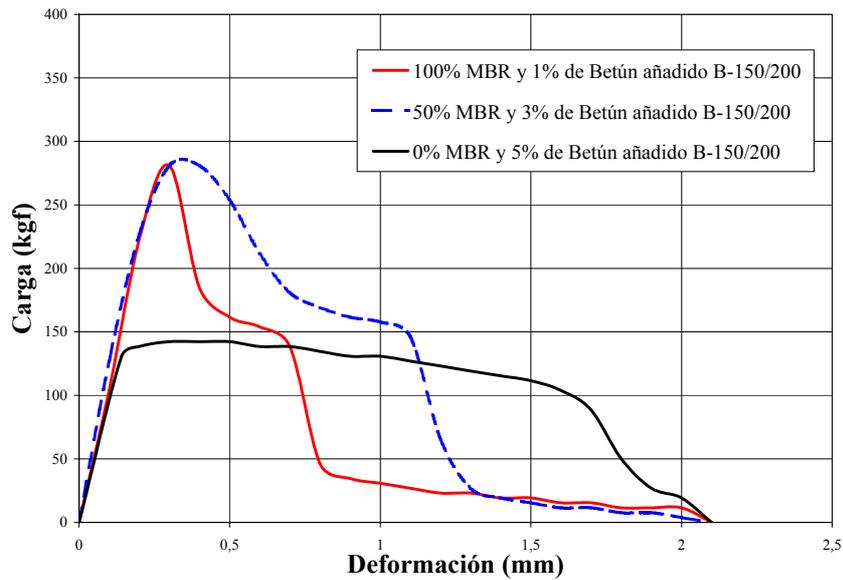
En primer lugar, se puede apreciar que las mezclas que contienen elevados porcentajes de MBR incrementan notablemente su rigidez ya que logran resistencias máximas a tracción muy elevadas.

Sin embargo, la tenacidad de las mezclas se ve disminuida al incrementar el contenido de material fresado en su composición, ya que se observa que la deformación de rotura disminuye sensiblemente al incrementar el contenido de MBR en la composición de las mezclas.

Por otra parte, el tipo de ligante de aportación utilizado también tiene una gran influencia sobre el comportamiento de las mezclas pues se aprecia claramente que, a esta temperatura de ensayo, las mezclas fabricadas con un betún de aportación B-80/100 presentan una mayor resistencia a tracción que las mezclas equivalentes fabricadas con un betún de aportación B-150/200, de la misma forma presentan una mayor tenacidad y lógicamente una mayor área bajo la curva que se traduce en una mayor energía específica de fractura.

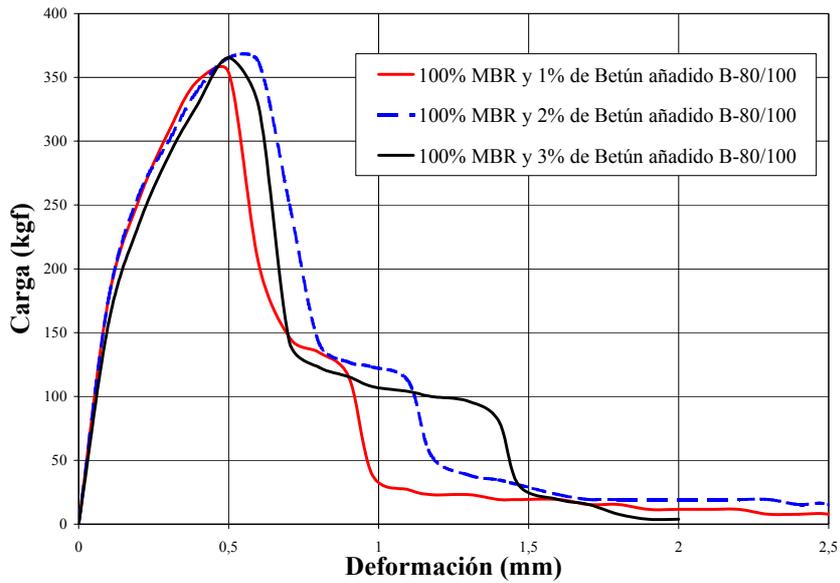


**Fig. 4.3.13** Curvas carga-deformación en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas fabricadas con un 5% de betún total

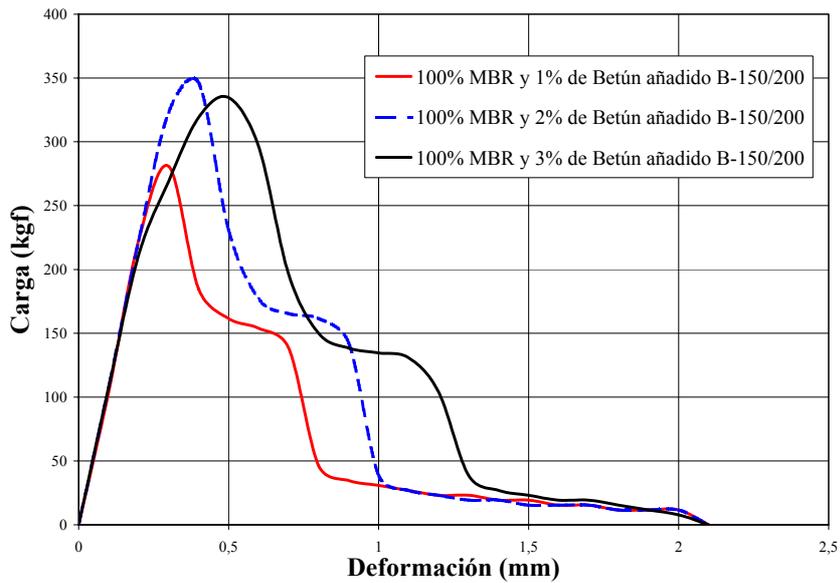


**Fig. 4.3.14** Curvas carga-deformación en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas fabricadas con un 5% de betún total

Si comparamos ahora las gráficas carga-deformación para las mezclas con el mismo porcentaje de MBR pero con diferentes contenidos de betún de aportación se apreciará la influencia que tiene el contenido de ligante en la tenacidad y rigidez de las mezclas.



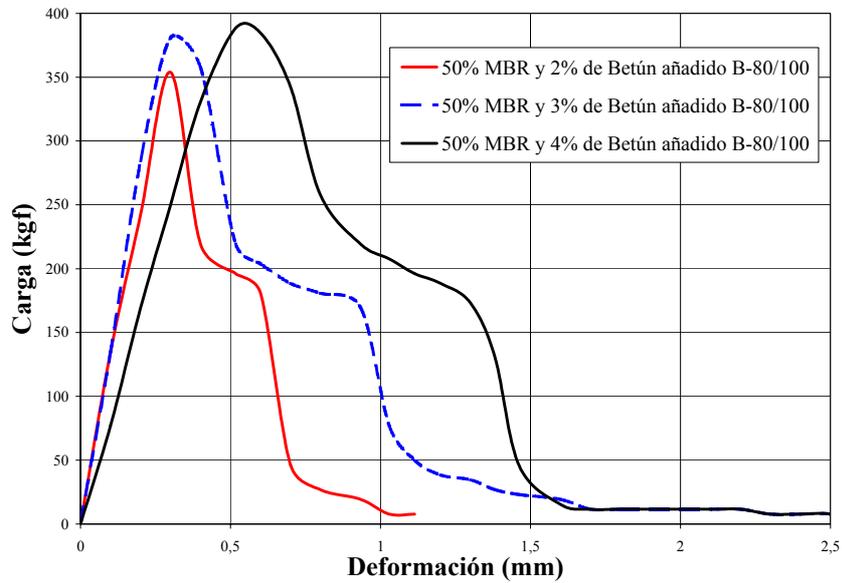
**Fig. 4.3.15** Curvas carga-deformación en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas fabricadas con un 100% de MBR



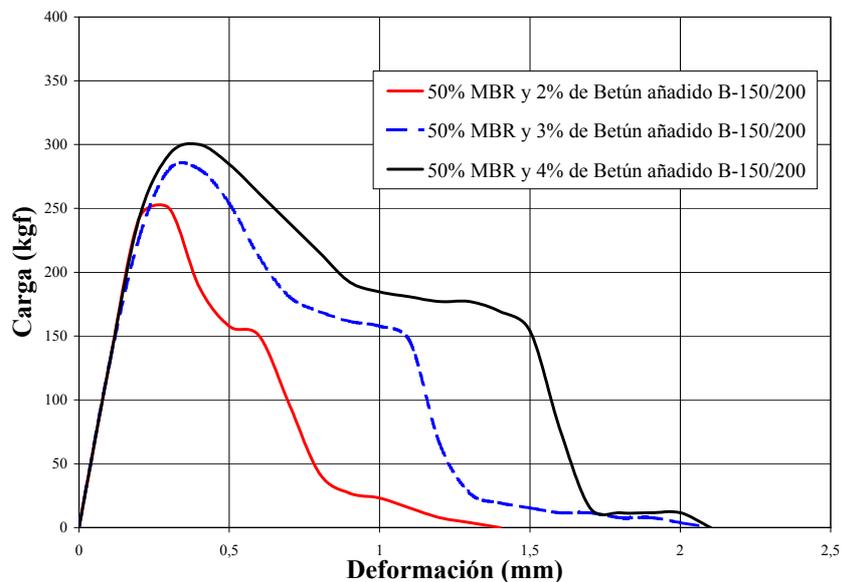
**Fig. 4.3.16** Curvas carga-deformación en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas fabricadas con un 100% de MBR

En primer lugar tenemos las fig. 4.3.15 y 4.3.16 en las que observamos que las mezclas recicladas con un 100% de MBR incrementan su tenacidad al aumentar el porcentaje de betún de aportación ya que se observan deformaciones de rotura mayores ya sea con el betún de aportación B-80/100 ó B-150/200.

El incremento de la tenacidad permite a las mezclas soportar cargas posteriores a la carga máxima, teniendo una disipación de energía lenta, con lo cual la rotura total de la mezcla se da con desplazamientos mayores.



**Fig. 4.3.17** Curvas carga-deformación en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas fabricadas con un 50% de MBR



**Fig. 4.3.18** Curvas carga-deformación en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas fabricadas con un 50% de MBR

Si observamos las fig. 4.3.17 y 4.3.18 nos daremos cuenta de que nuevamente el ensayo BTB nos muestra la influencia del contenido de betún en la tenacidad y flexibilidad de las mezclas recicladas con un 50% de MBR, se aprecia que la resistencia máxima a tracción se incrementa con el contenido de ligante de aportación y lo mismo sucede con la tenacidad. El mismo comportamiento se presenta con los dos ligantes de aportación.

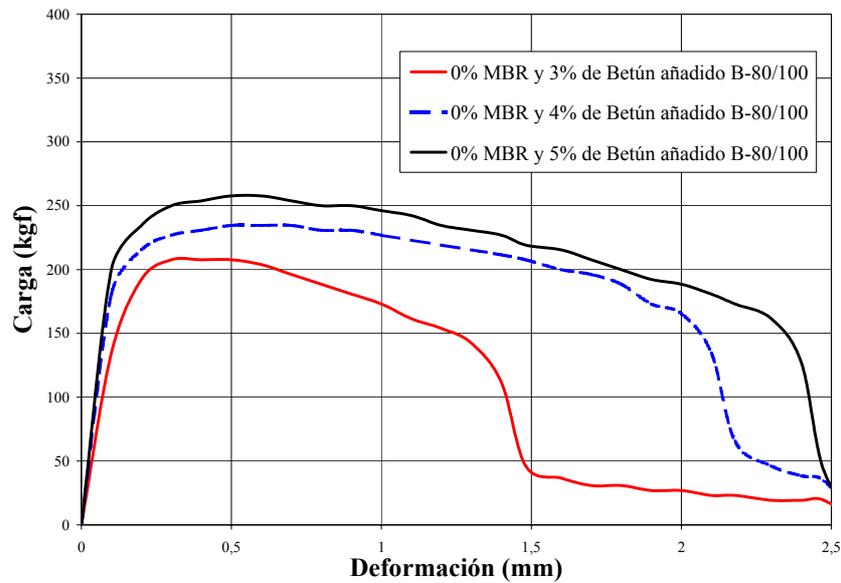


Fig. 4.3.19 Curvas carga-deformación en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas de referencia

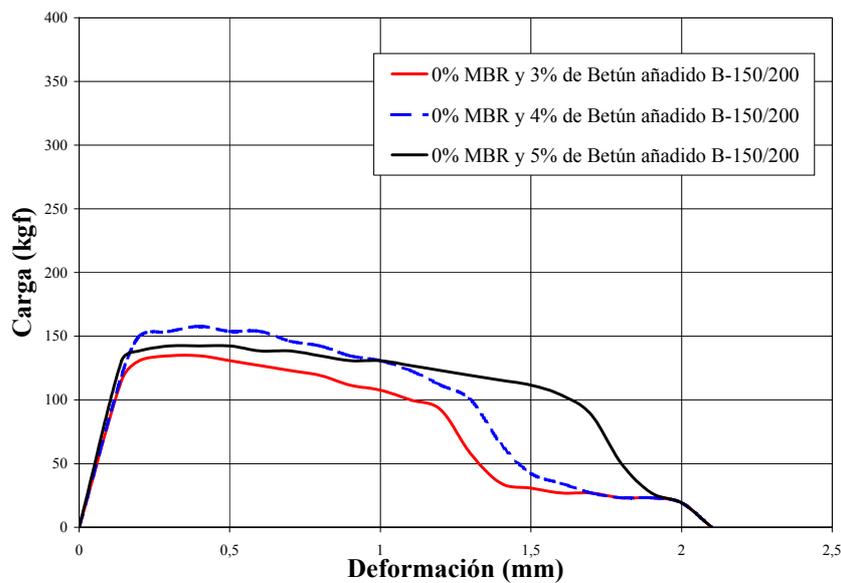


Fig. 4.3.20 Curvas carga-deformación en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas de referencia

Por último tenemos las fig. 4.3.19 y 4.3.20 en las que se muestran las curvas carga-deformación de las mezclas de referencia fabricadas sin MBR, nuevamente se observa la influencia del contenido de betún. Las resistencia máxima a tracción es mucho menor que en las mezclas recicladas, sin embargo, la deformación de rotura es mayor.

Dos parámetros muy importantes obtenidos con el ensayo BTB son la resistencia a tracción y la deformación de rotura **δR** los cuales han sido graficados después realizar los ensayos y de haber calculado los valores medios.

En la fig. 4.3.21 se presenta la resistencia a tracción media obtenida por las diferentes mezclas evaluadas en el ensayo BTB, donde se observa, en general, que las mezclas fabricadas con un betún de aportación B-80/100 tienen una mejor respuesta ante la aplicación de cargas que las mezclas fabricadas con betunes B-150/200, soportando valores más elevados.

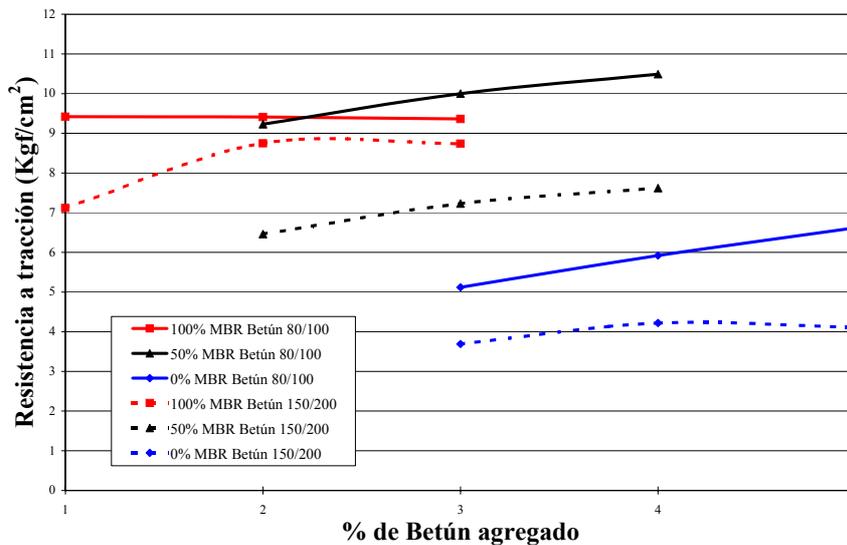


Fig. 4.3.21 Resistencia a tracción en el Ensayo BTB a 5°C de diferentes mezclas

Por otra parte, al incrementar el contenido de MBR en las mezclas, parece aumentar su resistencia a tracción, lo mismo ocurre al elevar el porcentaje de betún aportado hasta ciertos valores a partir de los cuales comienza a disminuir su resistencia.

En la fig. 4.3.22 se presentan las deformaciones medias de rotura  $dR$ , obtenidas por las diferentes mezclas sometidas al Ensayo de Tracción Directa BTB, y se observa que la deformación de rotura decrece a medida que se incrementa el contenido de MBR en las mezclas, de forma contraria a lo que ocurre con la resistencia a tracción, esto nos indica que el incremento en el contenido de MBR en las mezclas incrementa su rigidez y las hace más frágiles.

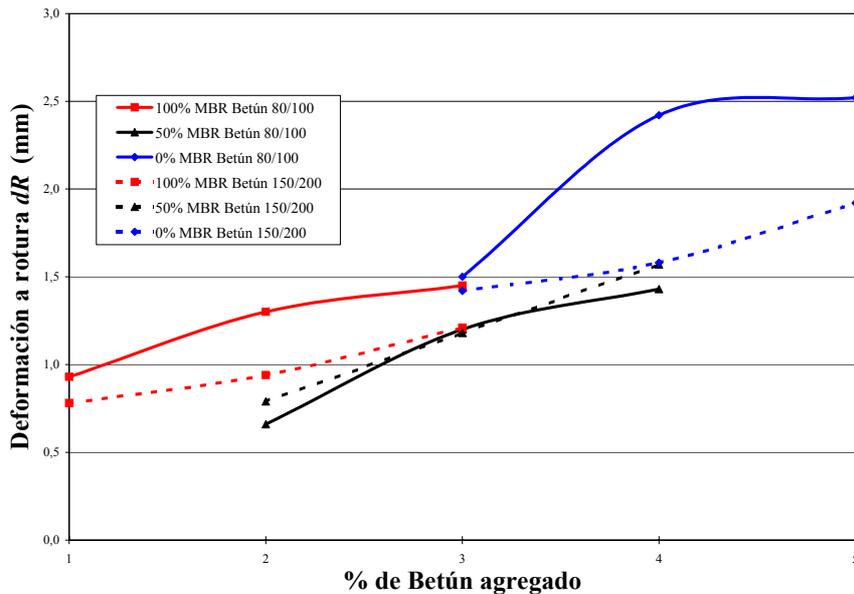


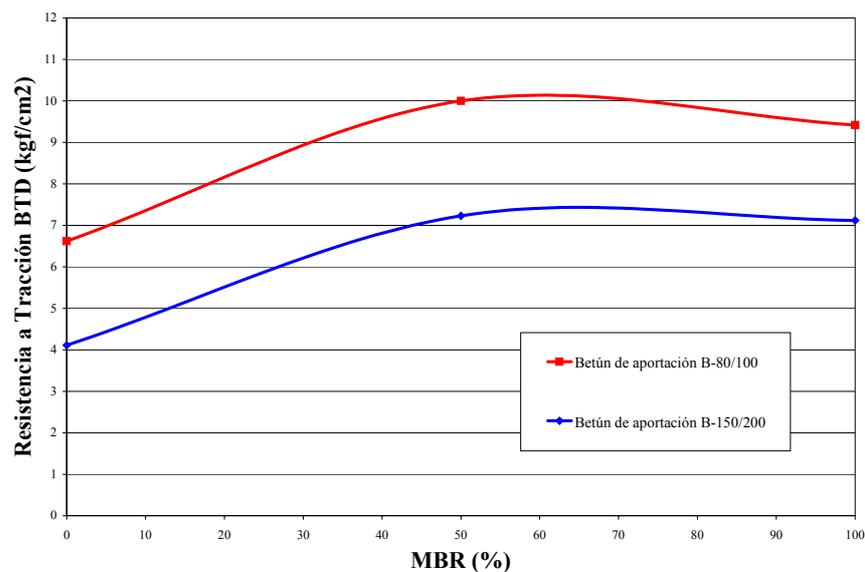
Fig. 4.3.22 Deformación de rotura  $dR$  en el Ensayo BTB a 5°C obtenida por diferentes mezclas

También se observa que si aumentamos el porcentaje de betún de aportación, sin importar si se trata de betún B-80/100 ó B-150/200, se incrementa la deformación de rotura.

En los resultados del Ensayo BTB se observa que si aumentamos el contenido de MBR en las mezclas recicladas en caliente, se incrementa su rigidez y fragilidad, lo que puede contribuir al agrietamiento prematuro de los pavimentos; por otra parte, al aumentar el porcentaje de betún de aportación y por consiguiente el porcentaje de betún total en las mezclas recicladas, se consiguen mayores deformaciones de rotura, lo cual, de acuerdo con Cepeda (2002), se puede traducir en un incremento de la vida a fatiga de las mezclas.

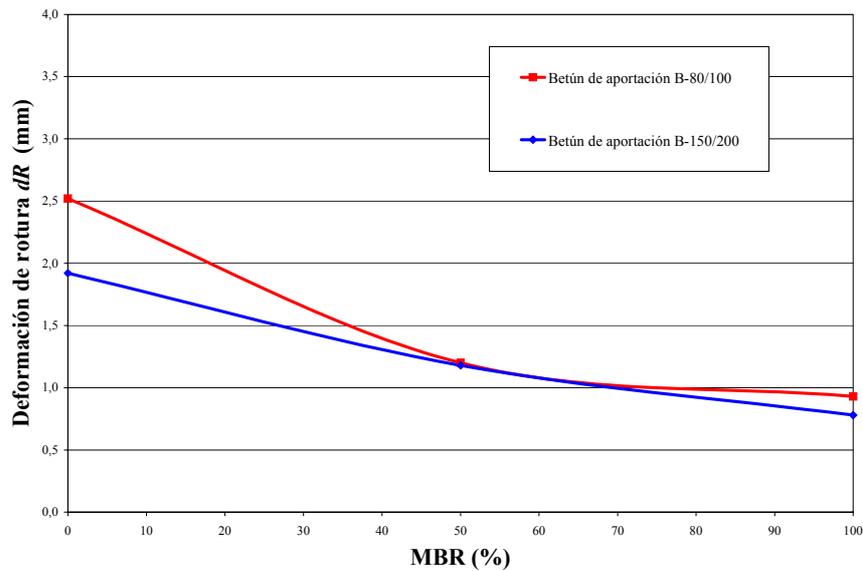
Una vez analizado todo lo anterior se decidió observar como se comportaban las mezclas que contienen el mismo porcentaje de betún total pero diferentes contenidos de MBR, así pues, en la fig. 4.3.23 se muestran los valores de resistencia a tracción de las probetas fabricadas con un 5% de betún total pero diferentes tipos de ligante de aportación y contenidos de MBR distintos.

Se puede observar un comportamiento muy parecido en ambos casos, al incrementar el contenido de MBR hasta porcentajes cercanos al 50% se incrementa la resistencia a tracción de las mezclas, pero cuando se emplean contenidos más elevados la resistencia disminuye nuevamente.



**Fig. 4.3.23** Resistencia a tracción en el Ensayo BTD a 5°C obtenida por diferentes mezclas fabricadas con un 5% de betún total

En la fig. 4.3.24 se muestra el comportamiento de las deformaciones de rotura  $dR$  obtenidas por las mezclas fabricadas con un 5% de betún total.



**Fig. 4.3.24** Resistencia a tracción en el Ensayo BTB a 5°C obtenida por diferentes mezclas fabricadas con un 5% de betún total

Como se dijo anteriormente, al aumentar el contenido de MBR hasta aproximadamente el 50% se incrementa la resistencia a tracción, pero con porcentajes más elevados no sufre variaciones significativas, por otra parte, la deformación  $dR$  disminuye siempre que aumentamos el contenido de MBR, lo que nos puede indicar una mayor rigidez y una menor vida a fatiga de las mezclas recicladas con altos contenidos de MBR, problema que se podría corregir en ciertos casos, de acuerdo con los resultados obtenidos, incrementando el contenido de betún de aportación pero cuidando las deformaciones plásticas que se podrían producir por un exceso de ligante.

Cabe destacar, que en este caso, las granulometrías para los diferentes contenidos de MBR han variado, lo cual nos hace comparar cosas que no son exactamente iguales, pero nos da una idea para los siguientes estudios, por lo cual, será muy importante analizar la variación de la resistencia a tracción y de la deformación de rotura  $dR$  para mezclas que mantengan la granulometría y el contenido de betún total constantes y que solo varíen su contenido de MBR para, de esta manera, poder observar la influencia que tiene el material fresado en su comportamiento.

## **4.4. Estudio del comportamiento de Mezclas Recicladas en Caliente mediante los ensayos de Tracción Indirecta y de Tracción Directa BTD**

### **4.4.1. Planteamiento**

Una vez concluidos los estudios previos, y después de analizar la información que de ellos se obtiene, se desarrolló la segunda parte del estudio que pretende analizar la influencia que tiene la incorporación de diferentes contenidos de MBR sobre algunas de las propiedades mecánicas de las mezclas recicladas en caliente en planta.

Para esta segunda parte se decidió profundizar en los ensayos de Tracción Indirecta y de Tracción Directa BTD ya que dieron gran cantidad de información en los trabajos previos. En este caso se tendrá especial cuidado con el proceso de fabricación y de ensayo de las probetas para observar la variación del comportamiento de cada una de las diferentes mezclas que en este caso serán fabricadas con el 0, 30, 50 y 80% de MBR, dos betunes de aportación B-60/70 y B-150/200 y una misma granulometría.

### **4.4.2. Materiales empleados**

Los materiales empleados son de la misma procedencia que en los estudios previos, a continuación se describen sus características más importantes.

#### **Material fresado de pavimentos (MBR)**

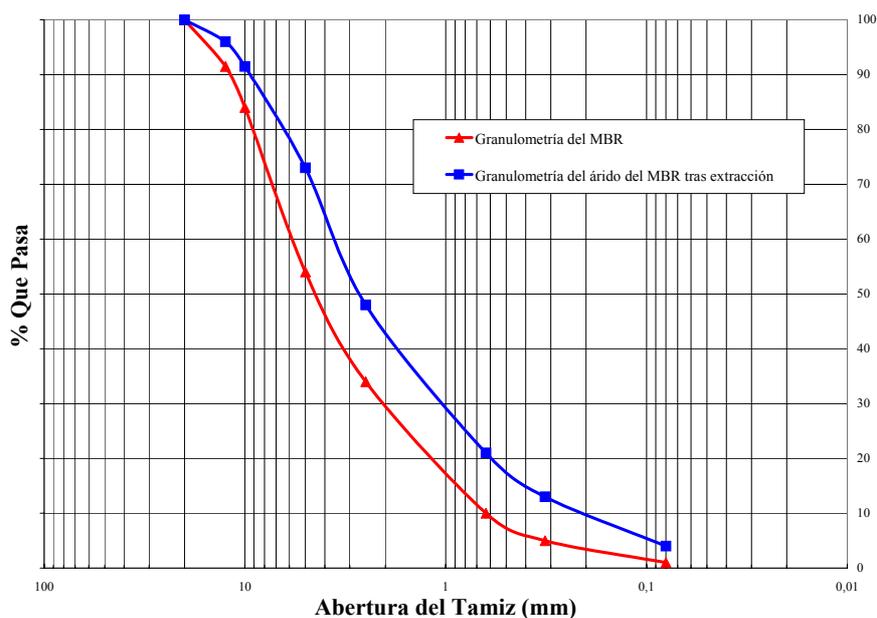
Como en el caso anterior, se utilizará nuevamente MBR proveniente del proyecto de refuerzo del firme de la carretera comarcal 1410, en el tramo Solsona–Barcelona, caracterizado adecuadamente mediante varias extracciones con el método de columna de destilación para determinar la granulometría del árido contenido en el fresado y su contenido de ligante.

En la tabla 4.4.1 se muestran las granulometrías medias obtenidas para el MBR antes y después de las extracciones.

**Tabla 4.4.1** Granulometrías medias del MBR antes y después de la destilación

	Porcentaje medio de pasa (% en masa) Tamices UNE (mm)							
	20	12.5	10	5	2.5	0.63	0.32	0.08
<b>MBR en acopio</b>	100	91.5	84	54	34	10	5	1
<b>MBR limpio</b>	100	96	91.5	73	48	21	13	4

En la fig. 4.4.1 se muestran las curvas granulométricas del MBR antes y después de la extracción del ligante.



**Fig. 4.4.1** Granulometría del MBR antes y después de la extracción del ligante

Por la diferencia de pesos entre la muestra de MBR inicial y tras destilación se obtiene el porcentaje de ligante que contiene el material fresado, en este caso y después de tres extracciones se obtuvo un contenido medio del 4.3%.

### Áridos de aportación

Los áridos empleados serán los mismos que en el trabajo anterior, proceden de la cantera FOJ en la región de Vallirana, y son áridos de naturaleza caliza.

Para este estudio se separarán los áridos de aportación en diferentes fracciones para componer las granulometrías con cada uno de los porcentajes de MBR definidos por el huso granulométrico.

### Ligantes de aportación

Se utilizarán dos tipos de ligantes hidrocarbonados de penetración habitualmente utilizados en España en la elaboración de mezclas asfálticas B-60/70 y B-150/200, en la tabla 4.4.2 se describen sus características más relevantes.

Es muy importante indicar que se fabricarán todas las probetas con el mismo porcentaje de betún total, el 4.5% empleado comúnmente en mezclas de este tipo, por lo cual, se añadirán las cantidades necesarias de ligante en cada caso para llegar a este porcentaje tomando en cuenta el betún contenido en el MBR.

**Tabla 4.4.2** Características de los ligantes bituminosos utilizados

Características	Unidad	Norma NLT	Tipo de ligante	
			B-60/70	B-150/200
Penetración a 25°C, 100g	0.1mm	124/84	65	165
Índice de penetración		181/88	-0.7	0.9
Punto de reblandecimiento A y B	°C	125/84	49.5	44.5
Punto de Fragilidad Fraass	°C	182/84	-8	-14
Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	122/91	1.000	1.024

#### **4.4.3. Granulometría empleada**

El huso granulométrico de las mezclas bituminosas utilizadas será nuevamente del tipo semidenso S-12 de acuerdo con las *Recomendaciones sobre mezclas bituminosas en caliente del MOPU* del año 1989, en vigor durante la realización del estudio.

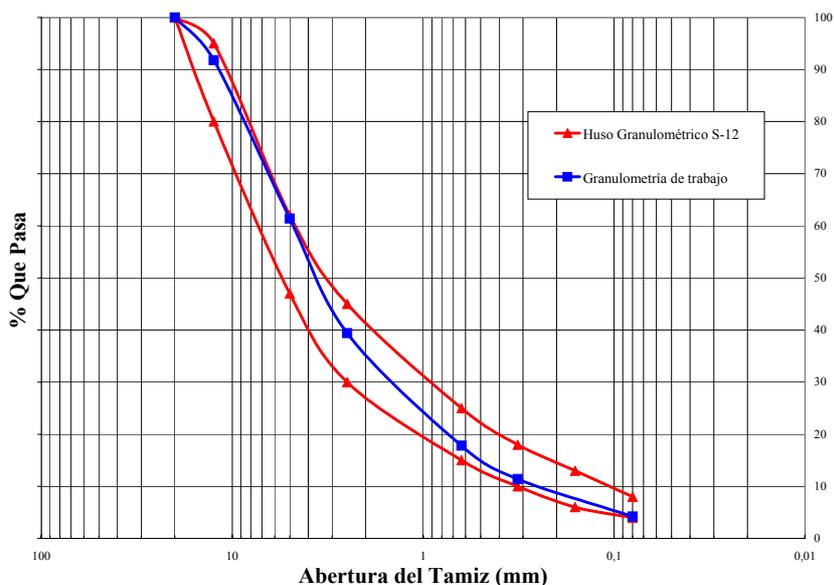
Para definir la granulometría que se empleará en este estudio, se intentará encajar la granulometría del árido contenido en el MBR (tabla 4.4.1) en el huso S-12, incorporando áridos vírgenes en las fracciones necesarias.

Después de varios tanteos se decidió incorporar un 20% de áridos vírgenes para corregir la granulometría del MBR en las fracciones que quedaban fuera del huso S-12, quedando como se muestra en la tabla 4.4.3.

**Tabla 4.4.3** Huso granulométrico S-12 y determinación de la granulometría de trabajo

	Porcentajes de pasa (% en masa) Tamices UNE (mm)						
	20	12.5	5	2.5	0.63	0.32	0.08
<b>Huso S-12</b>	100	80-95	47-62	30-45	15-25	10-18	4-8
<b>80% árido del MBR</b>	100	96	73	48	21	13	4
<b>20% árido virgen</b>	100	75	15	5	5	5	5
<b>Granulometría de trabajo</b>	100	91.8	61.4	39.4	17.8	11.4	4.2

La granulometría de trabajo será la misma en todos los casos estudiados en este trabajo, y deberán cuidarse los porcentajes de MBR y de árido de aportación necesarios para cumplir con la curva granulométrica mostrada en la fig. 4.4.2.



**Fig. 4.4.2** Granulometría S-12 de trabajo empleada para todos los casos estudiados

Una vez definida la granulometría de trabajo, se fabricará con cada uno de los diferentes porcentajes de MBR que se han especificado anteriormente (0, 30, 50 y 80%), utilizando las cantidades de árido de aportación necesarias de cada fracción; en la tabla 4.4.4 se indican los porcentajes de árido de aportación y de árido del MBR requeridos para cada una de las combinaciones.

**Tabla 4.4.4** Composición de los áridos para cada contenido de MBR en las mezclas (0, 30 50 y 80%)

Tamices UNE (mm)	Árido Virgen	Árido del MBR	Porcentaje acumulado
12,5	8,2	0	8,2
5	30,4	0	30,4
2,5	22	0	22
0,63	21,6	0	21,6
0,32	6,4	0	6,4
0,08	7,2	0	7,2
Filler	4,2	0	4,2
% Total	100	0	100

Tamices UNE (mm)	Árido Virgen	Árido del MBR	Porcentaje acumulado
12,5	7	1,2	8,2
5	23,5	6,9	30,4
2,5	14,5	7,5	22
0,63	13,5	8,1	21,6
0,32	4	2,4	6,4
0,08	4,5	2,7	7,2
Filler	3	1,2	4,2
% Total	70	30	100

Tamices UNE (mm)	Árido Virgen	Árido del MBR	Porcentaje acumulado
12,5	6,2	2	8,2
5	18,9	11,5	30,4
2,5	9,5	12,5	22
0,63	8,1	13,5	21,6
0,32	2,4	4	6,4
0,08	2,7	4,5	7,2
Filler	2,2	2	4,2
% Total	50	50	100

Tamices UNE (mm)	Árido Virgen	Árido del MBR	Porcentaje acumulado
12,5	5	3,2	8,2
5	12	18,4	30,4
2,5	2	20	22
0,63	0	21,6	21,6
0,32	0	6,4	6,4
0,08	0	7,2	7,2
Filler	1	3,2	4,2
% Total	20	80	100

**4.4.4. Proceso experimental**

En este estudio se realizarán los ensayos de Tracción Indirecta en seco y tras inmersión, y de Tracción Directa BTD para observar la variación de algunas de las características mecánicas de las mezclas bituminosas.

Será necesario elaborar 8 series de probetas para cada uno de los ensayos, realizando diferentes combinaciones variando los porcentajes de MBR y de árido virgen, el porcentaje de betún agregado y el tipo de ligante de aportación, quedando cada serie como se muestra en la tabla 4.4.5.

**Tabla 4.4.5** Series de probetas fabricadas para cada uno de los ensayos de la segunda etapa del estudio

Serie	MBR (%)	Árido virgen (%)	Betún de aportación	Betún de aportación (%)	Betún Total (%)	Probetas
1	0	100	B-60/70	4.5	4.5	3
2	30	70		3.2		3
3	50	50		2.35		3
4	80	20		1.1		3
5	0	100	B-150/200	4.5		3
6	30	70		3.2		3
7	50	50		2.35		3
8	80	20		1.1		3
					<b>Total</b>	<b>24</b>

#### 4.4.4.1. Resultados del Ensayo a Tracción Indirecta en seco y tras inmersión

El Ensayo a Tracción Indirecta o Ensayo brasileño ha sido explicado en los estudios previos y se encuentra detallado en la norma *NLT-346/90*, por lo cual, no se explicará nuevamente en detalle.

Como se mencionó anteriormente, se ensayará una serie de probetas en seco, y otra serie de probetas tras permanecer 24 horas en un baño de agua a 60°C para medir el efecto que puede tener el agua sobre la resistencia a tracción indirecta de las mezclas recicladas.

De la misma forma que en los estudios previos, el Ensayo se realizará a una temperatura de 5°C, por lo cual las probetas que serán colocadas en el baño deberán dejarse secar perfectamente antes de ser introducidas en la nevera para adquirir la temperatura de ensayo.

En la tabla 4.4.6 se presenta un resumen de los valores medios obtenidos por los diferentes grupos de probetas fabricadas en este estudio y que fueron sometidas al Ensayo de Tracción Indirecta en seco.

**Tabla 4.4.6** Valores medios obtenidos en el Ensayo a Tracción Indirecta en seco por las mezclas S-12

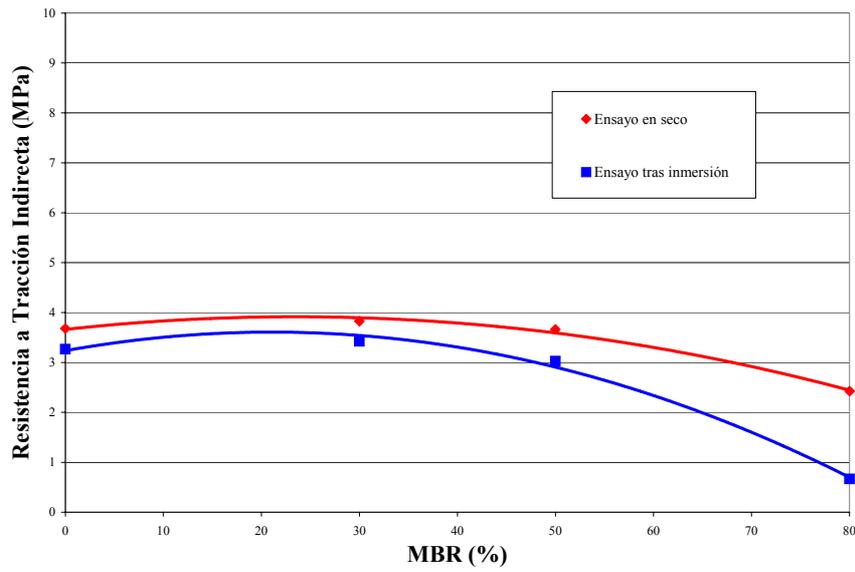
<b>Ensayo de Tracción Indirecta a 5°C en seco</b>							
% MBR	Betún de aportación	% Betún añadido	Altura (mm)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Deformación Máxima (mm)	Carga Máxima (kgf)	R.T.I. (MPa)
0	60/70	4.5	59.58	2.40	1.05	3498.43	3.68
30		3.2	59.71	2.37	0.84	3647.31	3.83
50		2.35	59.81	2.37	0.91	3494.56	3.66
80		1.1	61.56	2.28	0.64	2384.65	2.43
0	150/200	4.5	59.18	2.41	1.45	2152.95	2.28
30		3.2	60.27	2.35	1.14	2850.40	2.97
50		2.35	60.68	2.33	0.90	3179.69	3.28
80		1.1	62.59	2.26	0.82	2108.55	2.11

En la tabla 4.4.7 se presenta un resumen de los valores medios obtenidos por las probetas ensayadas a Tracción Indirecta tras inmersión.

**Tabla 4.4.7** Valores medios obtenidos en el Ensayo a Tracción Indirecta tras inmersión por las mezclas S-12

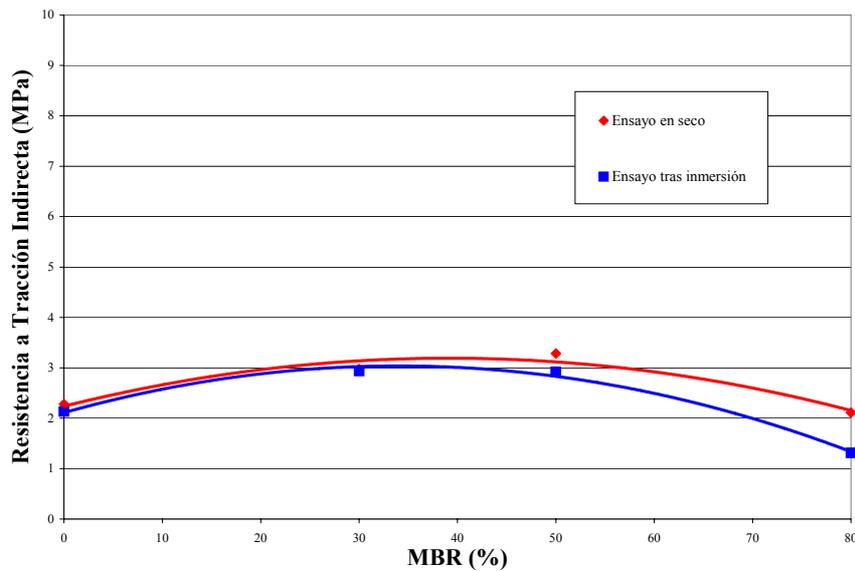
<b>Ensayo de Tracción Indirecta a 5°C tras inmersión</b>						
% MBR	Betún de aportación	% Betún añadido	Altura (mm)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Carga Máxima (kgf)	R.T.I. (MPa)
0	60/70	4.5	59.65	2.40	3108.82	3.27
30		3.2	60.27	2.35	3293.37	3.42
50		2.35	59.81	2.35	2887.19	3.02
80		1.1	64.64	2.17	690.03	0.67
0	150/200	4.5	59.62	2.41	2029.48	2.13
30		3.2	60.08	2.36	2814.56	2.94
50		2.35	59.88	2.36	2790.49	2.92
80		1.1	62.47	2.24	1308.88	1.31

Una vez concluidos los ensayos y habiendo procesado los datos y calculado los valores medios se procedió a realizar gráficas con los parámetros más importantes, en la fig. 4.4.3 se presenta el comportamiento de la resistencia a tracción indirecta en seco y tras inmersión de las mezclas fabricadas con diferentes porcentajes de MBR, betún de aportación B-60/70 y un contenido de betún total del 4.5%.



**Fig. 4.4.3** Resistencia a tracción indirecta en seco y tras inmersión de mezclas recicladas tipo S-12 fabricadas con un 4.5% de betún total y con betún de aportación B-60/70

En la fig. 4.4.4 se presenta el comportamiento de la resistencia a tracción indirecta en seco y tras inmersión de las mezclas fabricadas con diferentes porcentajes de MBR, betún de aportación B-150/200 y un contenido de betún total del 4.5%.



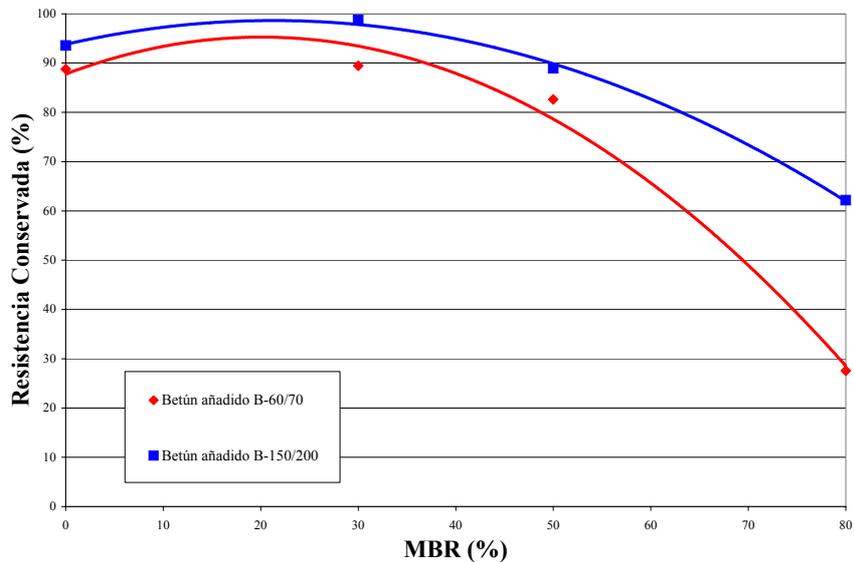
**Fig. 4.4.4** Resistencia a tracción indirecta en seco y tras inmersión de mezclas recicladas tipo S-12 fabricadas con un 4.5% de betún total y con betún de aportación B-150/200

Con los valores de resistencia a tracción indirecta en seco y tras inmersión obtenidas de los ensayos se calcula la resistencia conservada, en la tabla 4.4.8 se muestra el cálculo de dichas resistencias.

**Tabla 4.4.8** Resistencia conservada en el ensayo a Tracción Indirecta de las mezclas S-12

Ensayo de Tracción Indirecta a 5°C Resistencia Conservada					
% MBR	Betún de aportación	% Betún añadido	R.T.I. en seco (MPa)	R.T.I. tras Inmersión (MPa)	R.T.I. conservada (%)
0	B-60/70	4.5	3.68	3.27	89
30		3.2	3.83	3.42	89
50		2.35	3.66	3.02	83
80		1.1	2.43	0.67	28
0	B-150/200	4.5	2.28	2.13	93
30		3.2	2.97	2.94	99
50		2.35	3.28	2.92	89
80		1.1	2.11	1.31	62

Una vez calculadas las resistencias conservadas se graficaron en la fig. 4.4.5 dónde se observa el comportamiento de la resistencia conservada que presentan las mezclas con diferentes contenidos de MBR.



**Fig. 4.4.5** Resistencia conservada a tracción indirecta de mezclas recicladas tipo S-12 fabricadas con 4.5% de betún total

En las tablas y gráficas que se han obtenido del ensayo a tracción indirecta se pueden observar tendencias muy significativas entre las que se pueden mencionar las siguientes:

- Las mezclas recicladas con porcentajes de MBR entre el 20 y el 50% logran las resistencias a tracción indirecta más elevadas.
- Al incrementar el contenido de MBR en las mezclas recicladas disminuye la deformación de rotura a tracción indirecta, lo que significa, en general, un incremento de la rigidez de las mezclas.
- Las mezclas recicladas con porcentajes de MBR entre el 20 y el 30% obtienen las resistencias conservadas más elevadas, sin embargo con porcentajes altos de MBR disminuye dramáticamente su resistencia al agua.

Es muy importante recordar que todos estos resultados se han obtenido con mezclas recicladas fabricadas con un porcentaje de betún total del 4.5% incluyendo tanto el ligante de aportación como el ligante que contiene el material fresado.

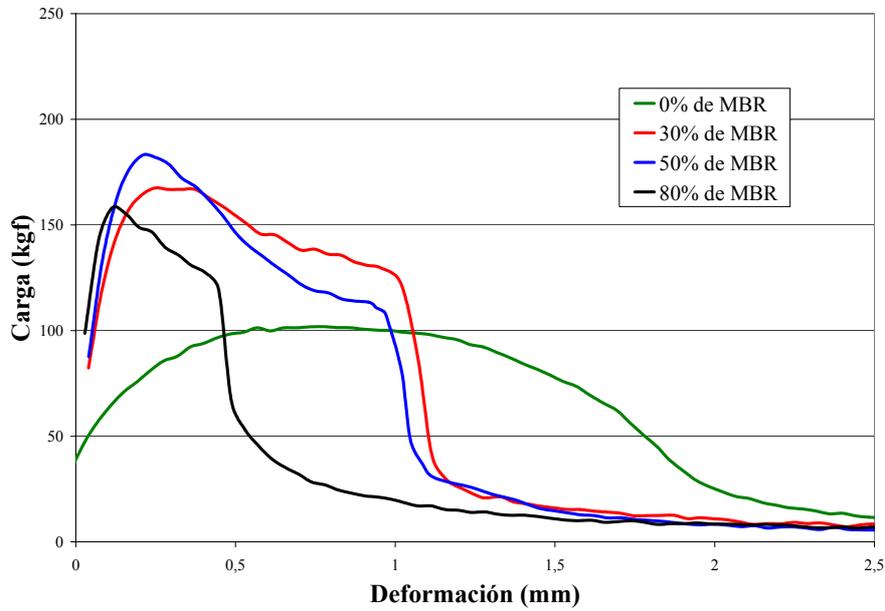
#### 4.4.4.2. Resultados del Ensayo a Tracción Directa BTB

El Ensayo de Tracción Directa BTB será realizado de la misma forma que fue descrito en el apartado 4.3.3.3, con la única diferencia de que en éste caso será realizado a una temperatura de 20°C.

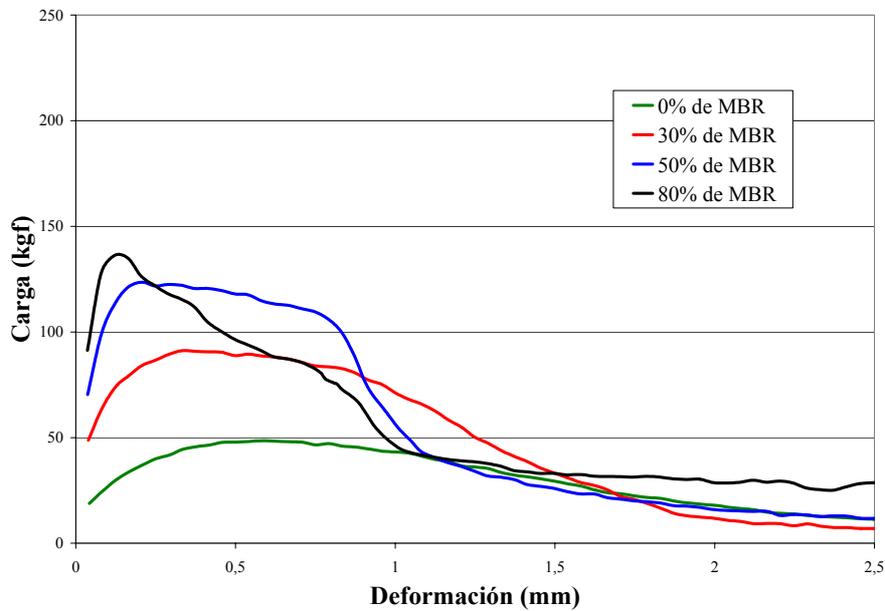
Es muy importante observar las curvas carga-deformación que presentan las diferentes mezclas fabricadas en este trabajo ya que nos brindan información sobre la tenacidad y rigidez de las mezclas.

Se observa claramente en las fig. 4.4.6 y 4.4.7 la influencia del porcentaje de MBR en el comportamiento de las diferentes mezclas recicladas, en general, la resistencia máxima aumenta con el contenido de MBR pero disminuye su deformación de rotura, lo que indica que al aumentar el contenido de fresado en las mezclas recicladas disminuye su

tenacidad si se mantiene constante el porcentaje de betún total, esto significa que para porcentajes de MBR elevados sería conveniente incrementar un poco el contenido de betún total.



**Fig. 4.4.6** Curvas carga-deformación en el ensayo BTB a 20°C obtenida por diferentes mezclas tipo S-12 fabricadas con un betún de aportación B-60/70 y un 4.5% de betún total



**Fig. 4.4.7** Curvas carga-deformación en el ensayo BTB a 20°C obtenida por diferentes mezclas tipo S-12 fabricadas con un betún de aportación B-150/200 y un 4.5% de betún total

En la tabla 4.4.9 se muestra el resumen de los valores medios obtenidos para cada uno de los diferentes grupos de probetas sometidas al Ensayo de Tracción Directa BTM en su modalidad estática.

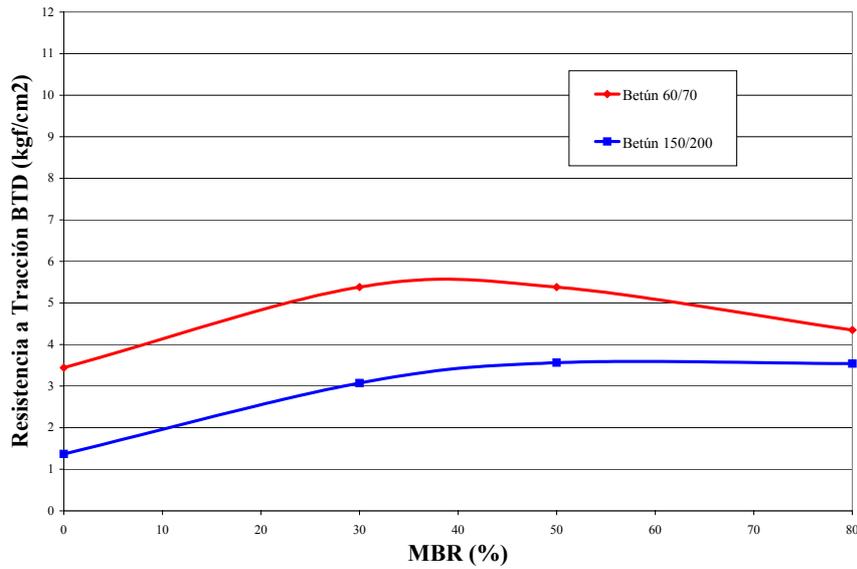
Cabe destacar nuevamente la importancia de dos valores muy importantes que se obtienen de este ensayo, por un lado tenemos la Resistencia a Tracción y por otro la deformación de rotura  $dR$  que nos puede dar una idea del comportamiento a fatiga que tendrán las mezclas (Cepeda, 2002).

**Tabla 4.4.9** Valores medios obtenidos en el Ensayo a Tracción Directa BTM

<b>Ensayo de Tracción Directa BTM a 20°C</b>						
<b>MBR (%)</b>	<b>Betún de aportación</b>	<b>% Betún añadido</b>	<b>Altura efectiva (mm)</b>	<b>Def. Rotura <math>dR</math> (mm)</b>	<b>Carga Máxima (kgf)</b>	<b>Res. a Tracción (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
0	B-60/70	4.5	33.08	2.07	115.67	3.44
30		3.2	32.43	1.38	177.10	5.38
50		2.35	33.22	1.14	180.26	5.38
100		1.1	33.51	0.72	147.28	4.35
0	B-150/200	4.5	31.50	2.14	43.80	1.37
30		3.2	32.18	1.55	100.35	3.07
50		2.35	33.11	1.28	119.17	3.56
100		1.1	34.39	1.18	124.37	3.54

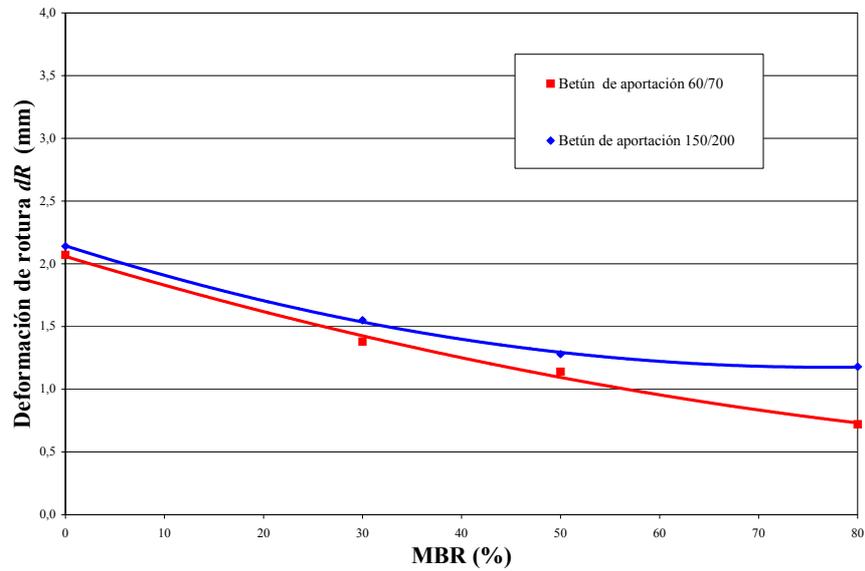
Una vez calculados los valores se procede a graficarlos, en la fig. 4.4.8 se muestra la resistencia a tracción media obtenida por cada una de las mezclas evaluadas con el ensayo BTM, y se puede observar claramente que en este caso, las mezclas fabricadas con betún de aportación B-60/70 presentan una mejor respuesta ante la aplicación de cargas que las mezclas fabricadas con betún B-150/200, ya que soportan valores más elevados.

Se puede observar en la gráfica que la resistencia a tracción se incrementa al aumentar el contenido de MBR en la mezcla pero al superar contenidos entre el 30 y el 50% este valor ya no aumenta y en algunos casos disminuye, comportamiento muy parecido al obtenido en los estudios previos.



**Fig. 4.4.8** Resistencia a tracción en el ensayo BT a 20°C obtenida por diferentes mezclas recicladas tipo S-12 fabricadas con un 4.5% de betún total

En la fig. 4.4.9 se presentan las deformaciones de rotura *dR* obtenidas por las diferentes mezclas en el Ensayo BT.



**Fig. 4.4.9** Deformación de rotura *dR* en el ensayo BT a 20°C obtenida por diferentes mezclas recicladas tipo S-12 fabricadas con un 4.5% de betún total

Al igual que en los estudios previos, se observa claramente la tendencia de las mezclas recicladas a obtener menores deformaciones de rotura a medida que se incrementa su contenido de MBR, lo cual indica que si se mantiene constante el porcentaje de betún total y se incrementa el contenido de material fresado, las mezclas se vuelven más rígidas pero su vida a fatiga puede verse disminuida.

Una vez concluido este estudio y analizando los resultados de los trabajos previos, se observa que las mezclas que contienen altos porcentajes de MBR en su composición presentan un comportamiento muy frágil y además presentan una susceptibilidad muy alta a la presencia del agua, lo que se puede observar en las bajas resistencias conservadas alcanzadas por las mezclas con altos contenidos de material fresado en su composición.

Será pues importante, estudiar el comportamiento de mezclas con contenidos no tan elevados de MBR que han presentado un comportamiento muy bueno tanto en estabilidad, resistencia a tracción directa, resistencia conservada, etc.