

4.5. Estudio comparativo sobre las características mecánicas de diferentes mezclas recicladas en caliente frente a mezclas convencionales equivalentes

4.5.1. Planteamiento

Después de analizar los resultados de los estudios anteriores, basados en la incorporación de diferentes porcentajes de MBR en una mezcla tipo S-12, y tomando en cuenta la capacidad para incorporar MBR de las pocas plantas existentes en España adaptadas para la fabricación de mezclas asfálticas recicladas en caliente, se decidió realizar esta parte del estudio, en la que se analizarán diferentes tipos de mezclas asfálticas que incorporen en su composición un 30% de MBR, cantidad empleada generalmente por este tipo de plantas.

El objetivo de esta parte del estudio es obtener una idea clara sobre el comportamiento de las características mecánicas de diferentes mezclas recicladas en caliente con un 30% de MBR, utilizando diferentes ligantes de aportación B-80/100, B-150/200 y B-180/220 y variando el contenido de betún total en las mezclas.

Se ha decidido emplear en esta parte del trabajo dos ensayos de laboratorio utilizados comúnmente para caracterizar mezclas convencionales, el Marshall y el ensayo a Tracción Indirecta, en seco y tras inmersión, debido a que son ensayos de uso generalizado y a que cualquier laboratorio especializado en el estudio de mezclas bituminosas cuenta con los equipos necesarios para realizarlos, además de que han mostrado buenos resultados en los trabajos realizados anteriormente.

Con el objetivo de tener una serie de valores de referencia para poder comparar el comportamiento de las mezclas recicladas, se fabricarán mezclas asfálticas convencionales con las mismas granulometrías y contenido de betún total que las recicladas, pero utilizando exclusivamente áridos nuevos y un betún B-60/70, usado habitualmente para fabricar mezclas convencionales.

Las mezclas de referencia serán caracterizadas a partir de los mismos ensayos utilizados para las mezclas recicladas, Marshall y Tracción Indirecta, en seco y tras inmersión.

Para el desarrollo de este trabajo se han considerado tres tipos de mezclas habitualmente utilizadas en España en capas intermedias y de base, que son las capas dónde se emplean comúnmente los mayores volúmenes de mezclas recicladas, dichos tipos son S-20, G-20 y G-25 de acuerdo con la OC 299/99 “*Recomendaciones sobre mezclas bituminosas en caliente*” en vigor durante la realización del estudio.

4.5.2. Materiales empleados

Material fresado de pavimentos (MBR)

El MBR empleado en este estudio ha sido suministrado por una planta industrial, después de haber pasado por un proceso de trituración y homogeneización. Debido a la cantidad de probetas que han sido fabricadas para este estudio, ha sido necesaria la entrega de dos lotes de material fresado que se han analizado independientemente y se denominarán *MBR 1* y *MBR 2*.

El MBR se ha caracterizado a partir de cuatro muestras tomadas de los acopios a las cuales se realizó el ensayo de extracción de ligante norma *NLT-164/90* y el análisis granulométrico de los áridos recuperados norma *NLT-165/90*, los valores medios obtenidos para cada uno de los lotes entregados se detallan en la tabla 4.5.1.

Tabla 4.5.1 Granulometría de los áridos del MBR 1 y del MBR 2 después de la extracción del ligante y su contenido de betún

Material	Porcentaje medio de pasa (% en masa)										Betún sobre mezcla (%)	Betún sobre áridos (%)
	Tamices UNE (mm)											
	25	20	12.5	10	5	2.5	0.63	0.32	0.16	0.08		
MBR 1	100	100	93	87	64	48	26	18	11	8.8	4.17	4.35
MBR 2	100	98	91	83	62	47	28	19	14	9.8	4.57	4.79

Una vez obtenidas las granulometrías del MBR 1 y del MBR 2 después de la extracción de ligante se presenta la fig. 4.5.1 donde se observan las pequeñas variaciones en las curvas que no son muy significativas.

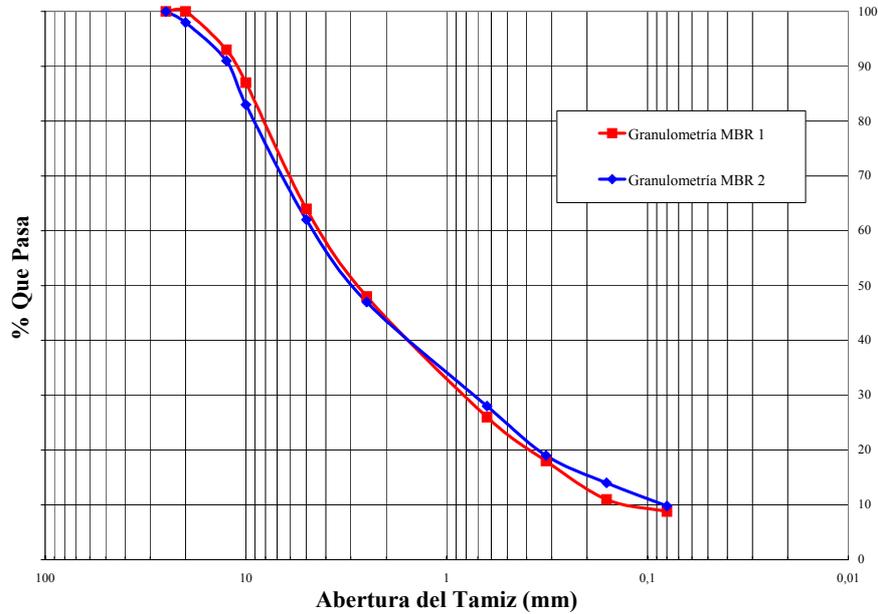


Fig. 4.5.1 Granulometría de los áridos de los diferentes materiales fresados después de la extracción del ligante

Áridos de aportación

Los áridos de aportación son de origen calizo, y al igual que sucedió con el MBR se ha suministrado en dos lotes debido al gran número de probetas que se han fabricado para este estudio.

El primer lote denominado *Árido 1* procede de la cantera Vallsallent y se ha suministrado en fracciones 25/40, 12/25, 5/12 y 0/5, el *Árido 2* procede de la cantera Readymix Asland (Ordal) y ha sido suministrado también en fracciones 25/40, 12/25, 5/12 y 0/5.

La distribución granulométrica de cada una de las fracciones de los dos lotes de áridos de aportación suministrados quedan recogidas en la tabla 4.5.2.

Tabla 4.5.2 Granulometrías de las fracciones de los áridos de aportación

Tamiz UNE (mm)	Granulometría del Árido 1 (% pasa)				Tamiz UNE (mm)	Granulometría del Árido 2 (% pasa)			
	25/40	12/25	5/12	0/5		25/40	12/25	5/12	0/5
40	100				40	100			
25	29	100			25	35	100		
20	1	84	100		20	2	85	100	
12.5		17	99		12.5	0.5	21	99	
10		3	85		10		5	87	100
5		0.8	4	100	5		0.8	11	99
3.5			1.5	72	3.5			1	71
0.63				32	0.63				31
0.32				20	0.32				19
0.08				11.1	0.08				11.3

Ligantes de aportación

Para la fabricación de las mezclas recicladas en caliente se han utilizado tres diferentes betunes de aportación de diferente penetración, B-80/100, B-150/200 y B-180/220, y para la fabricación de las mezclas convencionales de referencia se utilizó un betún de penetración B-60/70, en la tabla 4.5.3 se presentan las características más importantes de cada uno de ellos.

Tabla 4.5.3 Características de los ligantes bituminosos utilizados

Características	Unidad	Norma NLT	Tipo de ligante			
			B-60/70	B-80/100	B-150/200	B-180/220
Penetración a 25°C, 100g	0.1mm	124/84	65	88	165	195
Índice de penetración		181/88	-0.7	-0.5	0.9	0.3
Punto de reblandecimiento A y B	°C	125/84	49.5	47.0	44.5	41.0
Punto de Fragilidad Fraass	°C	182/84	-8	-12	-14	--
Densidad	gr/cm ³	122/91	1.000	1.030	1.024	1.018

4.5.3. Granulometrías empleadas

A partir de la granulometría del árido contenido en el MBR, y de las diferentes fracciones de los áridos de aportación, se procederá a determinar las curvas granulométricas de trabajo, intentando que sean centradas dentro de cada uno de los husos granulométricos que serán estudiados en este apartado.

A continuación se detallan las composiciones empleadas para fabricar cada mezcla, que serán las mismas tanto para el Ensayo Marshall como para el Ensayo de Tracción Indirecta en seco y tras inmersión, los tipos de mezclas que serán estudiados son del tipo S-20, G-20 y G-25 de acuerdo con las *Recomendaciones sobre mezclas bituminosas en caliente del MOPU* del año 1989, en vigor durante la realización del estudio.

4.5.3.1. Mezclas tipo S-20

El plan de trabajo del estudio contempla el orden de fabricación de las series comenzando con las mezclas que contienen betunes de menor penetración y así sucesivamente por lo cual se fabricaron primeramente las mezclas de referencia con un betún B-60/70, posteriormente las mezclas recicladas con un betún B-80/100, siguiendo con las mezclas recicladas con betún B-150/200, todas estas mezclas fueron fabricadas a partir del *MBR 1* y del *Árido 1*.

Después de varios tanteos se decidió utilizar las siguientes proporciones de las diferentes fracciones del *Árido 1* que sumadas a un 30% del árido del *MBR 1*, nos da como resultado una granulometría prácticamente centrada en el huso S-20 que se presenta en la tabla 4.5.4:

- Fresado (MBR): 30%
- Fracción 12/25: 25%
- Fracción 5/12: 15%
- Fracción 0/5: 30%

Tabla 4.5.4 Granulometría de las mezclas S-20 fabricadas a partir del *MBR 1* y del *Árido 1*

Tamiz UNE (mm)	Porcentajes de pasa					
	MBR 1	12/25	5/12	0/5	Total	S-20
	30%	25%	15%	30%		
25	30	25	15	30	100	100
20	30	21	15	30	96	80-95
12.5	27.9	4.3	14.8	30	77	65-80
10	26.1	0.8	12.7	30	69.6	60-75
5	19.2	0.2	0.6	30	50	43-58
2.5	14.4		0.2	21.6	36.2	30-45
0.63	7.8			9.6	17.4	18-25
0.32	5.4			6	11.4	10-18
0.08	2.64			3.3	5.94	4-8

Para las mezclas S-20 de referencia, que no contienen MBR, se reprodujo, con áridos nuevos, la misma curva granulométrica presentada en la tabla 4.5.4.

Al comenzar a fabricar las mezclas recicladas con el betún de aportación B-180/220 fue necesario emplear el *MBR 2* y el *Árido 2* por lo cual se recalcularon los porcentajes de cada fracción necesarios para lograr una curva granulométrica lo más parecido posible a la utilizada para las primeras mezclas S-20.

Después de varios tanteos con las fracciones del *Árido 2* y con un 30% del *MBR 2* se decidió utilizar los porcentajes que se muestran a continuación con las que se logró obtener la granulometría de la tabla 4.5.5 casi centrada en el huso S-20 y muy parecida a la utilizada en las primeras mezclas:

- Fresado (MBR): 30%
- Fracción 12/25: 27%
- Fracción 5/12: 13%
- Fracción 0/5: 30%

Tabla 4.5.5 Granulometría de las mezclas S-20 fabricadas a partir del MBR 2 y del Árido 2

Tamiz UNE (mm)	Porcentajes de pasa					Total	S-20
	MBR 2	12/25	5/12	0/5			
25	30	27	13	30	100	100	
20	29.4	23	13	30	95.4	80-95	
12.5	27.3	5.7	12.9	30	75.9	65-80	
10	24.9	1.4	11.3	30	67.6	60-75	
5	18.6	0.2	1.4	29.7	49.9	43-58	
2.5	14.1		0.1	21.3	35.5	30-45	
0.63	8.4			9.3	17.7	18-25	
0.32	5.7			5.7	11.4	10-18	
0.08	2.9			3.4	6.3	4-8	

En la fig. 4.5.2 se presentan las curvas granulométricas empleadas para fabricar las mezclas S-20 con los diferentes lotes de MBR y de áridos de aportación, y se observa claramente que son prácticamente iguales.

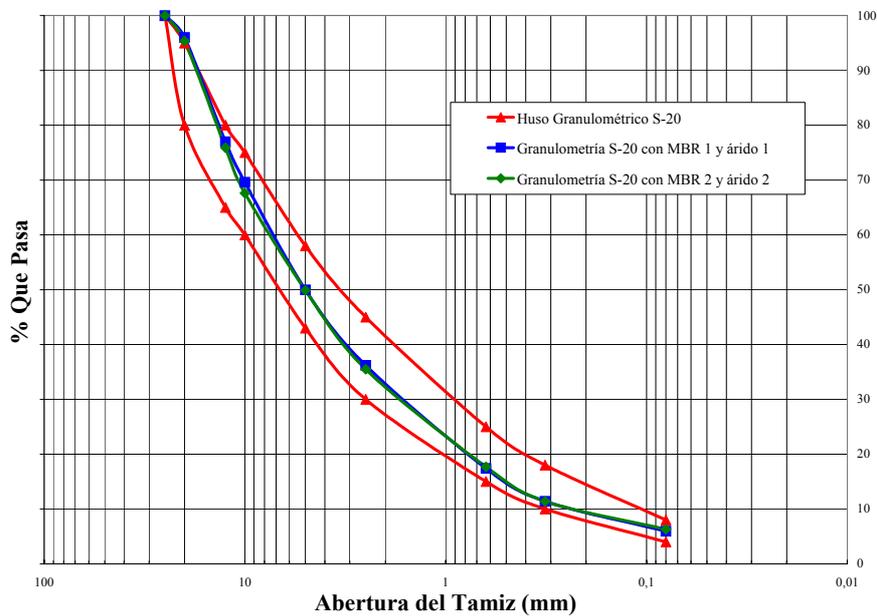


Fig. 4.5.2 Granulometría S-20 con los diferentes tipos de fresado y de áridos de aportación

4.5.3.2. Mezclas tipo G-20

De la misma forma que ocurrió con la mezcla S-20, se fabricaron primeramente las mezclas G-20 con los betunes más duros, iniciando con las mezclas convencionales de referencia con un betún B-60/70 y siguiendo posteriormente con las mezclas recicladas con betún B-150/200, todas ellas fabricadas con el *MBR 1* y el *Árido 1*.

Después de varios tanteos se decidió utilizar las siguientes proporciones de las diferentes fracciones del *Árido 1* con un 30% del árido del *MBR 1*, con las cuales obtenemos la granulometría de trabajo de la tabla 4.5.6 prácticamente centrada en el huso G-20:

- Fresado (MBR): 30%
- Fracción 12/25: 40%
- Fracción 5/12: 10%
- Fracción 0/5: 20%

Tabla 4.5.6 Granulometría de las mezclas G-20 fabricadas a partir del *MBR 1* y del *Árido 1*

Tamiz UNE (mm)	Porcentaje de pasa				Total	G-20
	MBR 1	12/25	5/12	0/5		
	30%	40%	10%	20%		
25	30	40	10	20	100	100
20	30	33.6	10	20	93.6	75-95
12.5	27.9	6.8	9.9	20	64.6	55-75
10	26.1	1.2	8.5	20	55.8	47-67
5	19.2	0.3	0.4	20	39.9	28-46
2.5	14.4		0.2	14.4	29	20-35
0.63	7.8			6.4	14.2	8-20
0.32	5.4			4	9.4	5-14
0.08	2.64			2.2	4.84	2-6

Para las mezclas G-20 de referencia, que no contienen MBR, se reprodujo, con áridos nuevos, la misma curva granulométrica presentada en la tabla 4.5.6.

Al fabricar las mezclas recicladas con el betún de aportación B-180/220 fue necesario emplear el *MBR 2* y el *Árido 2* por lo cual se recalcularon los porcentajes necesarios de cada fracción para lograr una curva granulométrica lo más parecida posible a la utilizada para las primeras mezclas G-20.

Después de varios tanteos con las fracciones del *Árido 2* y un 30% del *MBR 2* se decidió utilizar los porcentajes que se muestran a continuación con las que se logró obtener la granulometría de la tabla 4.5.7 casi centrada en el huso G-20 y muy parecida a la utilizada en las primeras mezclas:

- Fresado (MBR): 30%
- Fracción 12/25: 40%
- Fracción 5/12: 12%
- Fracción 0/5: 18%

Una vez calculados los porcentajes necesarios para las diferentes combinaciones de MBR y áridos de aportación se presenta la fig. 4.5.3 en la que se muestra como las curvas granulométricas no presentan variaciones significativas.

Tabla 4.5.7 Granulometría de las mezclas G-20 fabricadas a partir del *MBR 2* y del *Árido 2*

Tamiz UNE (mm)	Porcentaje de pasa				Total	G-20
	MBR 2	12/25	5/12	0/5		
	30%	40%	12%	18%		
25	30	40	12	18	100	100
20	29.4	34	12	18	93.4	75-95
12.5	27.3	8.4	11.9	18	65.6	55-75
10	24.9	2	10.4	18	55.3	47-67
5	18.6	0.3	1.3	17.8	38	28-46
2.5	14.1		0.1	12.8	27	20-35
0.63	8.4			5.6	14	8-20
0.32	5.7			3.4	9.1	5-14
0.08	2.9			2	4.9	2-6

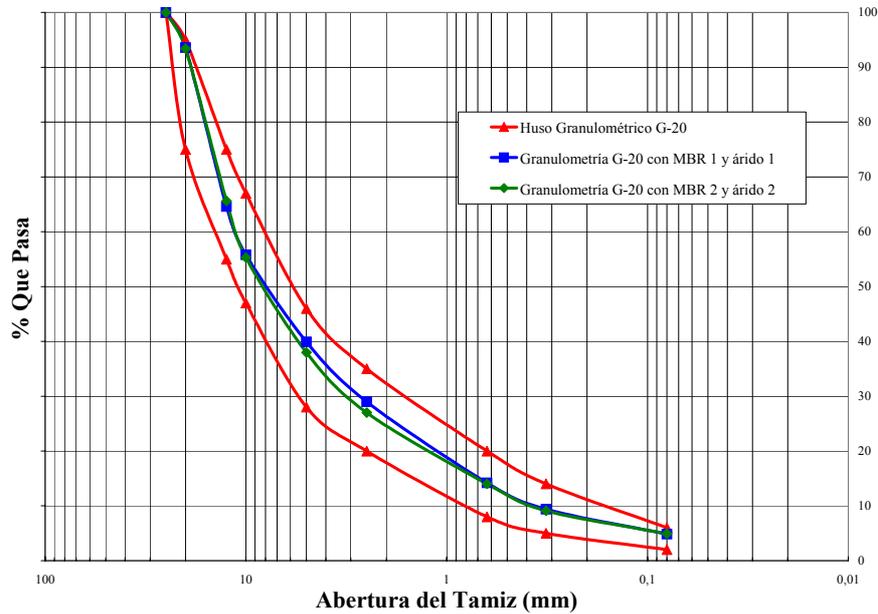


Tabla 4.5.8 Granulometría de las mezclas G-25 fabricadas a partir del *MBR 1* y del *Árido 1*

Tamiz UNE (mm)	Porcentaje de pasa					Total	G-25
	MBR 1 30%	25/40 15%	12/25 25%	5/12 15%	0/5 15%		
40	30	15	25	15	15	100	100
25	30	4.4	25	15	15	89.4	75-95
20	30	0.2	21	15	15	81.2	65-85
12.5	27.9		4.3	14.9	15	62.0	47-67
10	26.1		0.8	12.8	15	54.6	40-60
5	19.2		0.2	0.6	15	35.0	26-44
2.5	14.4			0.2	10.8	25.4	20-35
0.63	7.8				4.8	12.6	8-20
0.32	5.4				3.0	8.4	5-14
0.08	2.64				1.66	4.31	2-5

Para las mezclas G-25 de referencia, que no contienen MBR, se reprodujo, con áridos nuevos, la misma curva granulométrica presentada en la tabla 4.5.8.

Para fabricar las mezclas recicladas con el betún de aportación B-180/220 fue necesario emplear el *MBR 2* y el *Árido 2* por lo cual se recalcularon los porcentajes necesarios de cada fracción para lograr una curva granulométrica lo más parecida posible a la utilizada para las primeras mezclas G-25.

Después de varios tanteos con las fracciones del *Árido 2* y un 30% del *MBR 2* se decidió utilizar los porcentajes que se muestran a continuación con las que se logró obtener la granulometría de la tabla 4.5.9 casi centrada en el huso G-20 y muy parecida a la utilizada en las primeras mezclas:

- Fresado (MBR): 30%
- Fracción 25/40: 15
- Fracción 12/25: 25%
- Fracción 5/12: 15%
- Fracción 0/5: 15%

Tabla 4.5.9 Granulometría de las mezclas G-25 fabricadas a partir del *MBR 2* y del *Árido 2*

Tamiz UNE (mm)	Porcentaje de pasa						Total	G-25
	MBR 2	25/40	12/25	5/12	0/5			
	30%	15%	25%	15%	15%			
40	30	15	25	15	15	100	100	
25	30	5.3	25	15	15	90.3	75-95	
20	29.4	0.3	21.3	15	15	81	65-85	
12.5	27.3	0.1	5.3	14.9	15	62.6	47-67	
10	24.9		1.3	13.1	15	54.3	40-60	
5	18.6		0.2	1.7	14.9	35.4	26-44	
2.5	14.1			0.2	10.7	25	20-35	
0.63	8.4				4.7	13.1	8-20	
0.32	5.7				2.9	8.6	5-14	
0.08	2.9				1.7	4.6	2-5	

En la fig. 4.5.4 se observan las dos curvas granulométricas obtenidas con las diferentes combinaciones de MBR y áridos de aportación que son prácticamente iguales.

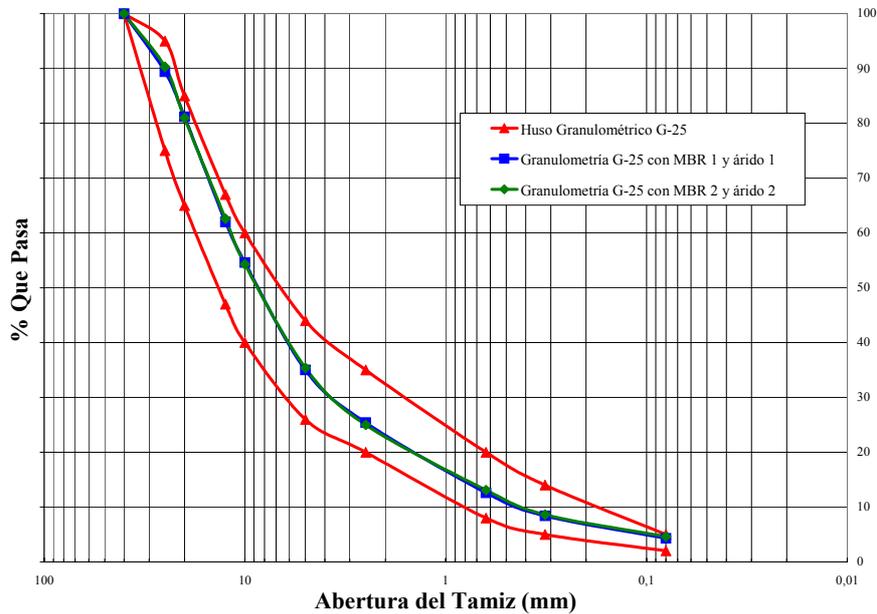


Fig. 4.5.4 Granulometría G-25 con los diferentes tipos de fresado y de áridos de aportación

4.5.4. Parte experimental

Con este trabajo se pretende obtener una serie de resultados que proporcionen información relevante sobre la variación de las características mecánicas de las mezclas bituminosas recicladas en caliente, y que nos permitan comparar su comportamiento con el que presentan las mezclas convencionales equivalentes, para de esta manera comprobar si son adecuadas para la construcción de firmes de carreteras.

Como se ha mencionado anteriormente, se han definido para el presente estudio tres tipos de mezclas utilizadas comúnmente en España para la fabricación de capas de base e intermedias, dichas mezclas son del tipo S-20, G-20 y G-25, por otra parte se ha decidido emplear dos ensayos de laboratorio especificados en la normativa española para el diseño y control de calidad de mezclas convencionales, el ensayo Marshall norma *NLT-159/86* y el ensayo a Tracción Indirecta en seco y tras inmersión norma *NLT-346/90*.

Otra variable de importancia dentro de este trabajo son los tipos de betún de aportación que se utilizarán para las mezclas recicladas B-80/100, B-150/200 y B-180/220 y el ligante empleado para las mezclas de referencia B-60/70, y por último tenemos los diferentes contenidos de betún total en las mezclas, todas estas variables nos dan una amplia serie de mezclas a estudiar que se detallan en la tabla 4.5.10.

Todas las probetas del estudio se han fabricado de acuerdo con la norma *NLT-159/86*, en el caso de las probetas que contienen reciclado, se parte de un 70% de árido virgen y un 30% de árido aportado por el material fresado de acuerdo con los husos granulométricos definidos en el apartado 4.5.2 y se toma en cuenta el contenido de betún del fresado para llegar al porcentaje total de betún necesario en cada caso

Para la fabricación de las mezclas de referencia se siguen también las especificaciones de la norma *NLT-159/86*, pero en este caso el 100% de árido necesario para cada probeta es árido virgen y todo el betún de la mezcla es de aportación del tipo B-60/70.

Tabla 4.5.10 Series de probetas fabricadas para cada uno de los tipos de betún de aportación: B-60/70 sin material fresado, y B-80/100, B-150/200 y B-180/220 con un 30% de material fresado

Serie	Tipo de mezcla	Ensayo	Betún total (%)	Probetas
1	S-20	Marshall	4.0	3
2			4.5	3
3			5.0	3
4		Tracción Indirecta seco	4.0	4
5			4.5	4
6			5.0	4
7		Tracción Indirecta húmedo	4.0	4
8			4.5	4
9			5.0	4
10	G-20	Marshall	3.5	3
11			4.0	3
12			4.5	3
13		Tracción Indirecta seco	3.5	4
14			4.0	4
15			4.5	4
16		Tracción Indirecta húmedo	3.5	4
17			4.0	4
18			4.5	4
19	G-25	Marshall	3.0	3
20			3.5	3
21			4.0	3
22		Tracción Indirecta seco	3.0	4
23			3.5	4
24			4.0	4
25		Tracción Indirecta húmedo	3.0	4
26			3.5	4
27			4.0	4
Total				99

4.5.4.1 Ensayo Marshall

El ensayo Marshall utilizado principalmente para el diseño de mezclas asfálticas se encuentra explicado en la norma *NLT 159/86* y se ha descrito con anterioridad en este capítulo, motivo por el cual no se explicará nuevamente la metodología necesaria para fabricar y ensayar las probetas Marshall.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por las diferentes mezclas recicladas estudiadas mediante el ensayo Marshall, haciendo un análisis de su comportamiento comparado con el obtenido por mezclas convencionales equivalentes.

Mezclas tipo S-20

Una vez definido el huso granulométrico que se empleará para fabricar las mezclas S-20 y conociendo los diferentes betunes de aportación que se utilizarán tanto para las mezclas de referencia como para las mezclas recicladas, solo hace falta definir los porcentajes de betún total que deberán contener las mezclas.

Se fabricarán mezclas S-20 con tres porcentajes de betún total que oscilarán en torno al 4.5% sobre árido, porcentaje habitualmente utilizado para este tipo de mezclas.

Para obtener los porcentajes de betún a añadir en las mezclas con reciclado, fue necesario tener en cuenta el betún contenido en el 30% de MBR utilizado para fabricar cada probeta, en la tabla 4.5.11 se describen los porcentajes de betún total y de betún aportado necesarios en cada caso.

Tabla 4.5.11 Porcentajes de betún sobre áridos utilizadas para fabricar las mezclas S-20 recicladas

Betún total	Betún aportado por el 30% de MBR 1	Betún añadido (B-80/100, B-150/200)	Betún aportado por el 30% de MBR 2	Betún añadido (B-180/220)
4.0	1.3	2.7	1.5	2.5
4.5	1.3	3.2	1.5	3.0
5.0	1.3	3.7	1.5	3.5

Para las mezclas de referencia con betún B-60/70, se prepararon series de probetas Marshall con los mismos porcentajes de betún total, 4.0, 4.5 y 5.0% sobre árido.

Los resultados obtenidos en el ensayo Marshall se recogen en la tabla 4.5.12, y en las fig. 4.5.5, 4.5.6, 4.5.7 y 4.5.8 en las que se observa la variación de la densidad, estabilidad, deformación Marshall y porcentaje de huecos en mezcla de todas las mezclas ensayadas.

Tabla 4.5.12 Resultados medios obtenidos en el Ensayo Marshall por las mezclas S-20

Ensayo Marshall							
MBR (%)	Betún de aportación	Betún total (%)	Densidad (g/cm³)	Estabilidad (kg)	Deformación (mm)	Huecos en mezcla (%)	Huecos en áridos (%)
0	60/70	4.0	2.435	2079	2.5	4.6	14.3
		4.5	2.451	1856	2.9	3.2	14.1
		5.0	2.452	1629	3.1	2.5	14.5
30	80/100	4.0	2.412	2677	2.2	6.2	15.2
		4.5	2.418	2313	2.5	5.3	15.4
		5.0	2.439	2020	3.0	3.8	15.1
30	150/200	4.0	2.405	2382	2.2	6.5	15.5
		4.5	2.427	2261	2.6	5.0	15.1
		5.0	2.433	2035	3.2	4.1	15.4
30	180/220	4.0	2.400	1714	2.2	6.7	15.7
		4.5	2.437	1824	2.3	4.6	14.8
		5.0	2.435	1437	2.4	4.0	15.3

Mezclas tipo G-20

De la misma forma que en el caso anterior se ha definido el huso granulométrico que será empleado para fabricar las mezclas G-20, pero en este caso no se fabricarán probetas recicladas con el betún B-80/100, por lo tanto, solo queda definir los porcentajes de betún total que se utilizarán en la fabricación de las mezclas de referencia con betún B-60/70 y de las mezclas recicladas con betunes B-150/200 y B-180/220.

En este caso, se fabricarán las mezclas G-20 con tres porcentajes de betún total que oscilarán en torno al 4% sobre árido, porcentaje habitualmente utilizado para este tipo de mezclas.

Para obtener los porcentajes de betún a añadir en las mezclas con reciclado, será necesario nuevamente tener en cuenta el betún contenido en el 30% de MBR utilizado para fabricar cada probeta, en la tabla 4.5.13 se describen los porcentajes de betún total y de betún aportado necesarios en cada caso.

Tabla 4.5.13 Porcentajes de betún sobre áridos utilizadas para fabricar las mezclas G-20 recicladas

Betún total	Betún aportado por el 30% de MBR 1	Betún añadido (B-80/100, B-150/200)	Betún aportado por el 30% de MBR 2	Betún añadido (B-180/220)
3.5	1.3	2.2	1.5	2.0
4.0	1.3	2.7	1.5	2.5
4.5	1.3	3.2	1.5	3.0

Para las mezclas de referencia con betún B-60/70, se prepararon series de probetas Marshall con los mismos porcentajes de betún total que para las mezclas recicladas, 3.5, 4.0 y 4.5 sobre árido.

Los resultados obtenidos para las mezclas G-20 en el ensayo Marshall se recogen en la tabla 4.5.14, y en las fig. 4.5.5, 4.5.6, 4.5.7 y 4.5.8 en las que se observa la variación de la densidad, estabilidad, deformación Marshall y porcentaje de huecos en mezcla.

Tabla 4.5.14 Resultados medios obtenidos en el Ensayo Marshall por las mezclas G-20

Ensayo Marshall							
MBR (%)	Betún de aportación	Betún total (%)	Densidad (g/cm ³)	Estabilidad (kg)	Deformación (mm)	Huecos en mezcla (%)	Huecos en áridos (%)
0	60/70	3.5	2.417	1910	2.5	6.0	14.2
		4.0	2.428	1949	2.8	4.9	14.2
		4.5	2.450	1855	3.0	3.3	13.8
30	150/200	3.5	2.408	2327	2.3	7.1	15.0
		4.0	2.422	2107	2.7	5.8	14.9
		4.5	2.447	1820	2.5	4.2	14.4
30	180/220	3.5	2.381	1649	2.2	8.1	15.9
		4.0	2.405	1559	2.3	6.5	15.5
		4.5	2.424	1399	2.3	5.1	15.2

Mezclas tipo G-25

Anteriormente se ha definido el huso granulométrico que será empleado para fabricar las mezclas G-25, por lo tanto, solo hace falta definir los porcentajes de betún total que se utilizarán en la fabricación de las mezclas de referencia con betún B-60/70 y de las mezclas recicladas con betunes B-80/100, B-150/200 y B-180/220.

En este caso, se fabricarán las mezclas G-25 con tres porcentajes de betún total que oscilarán en torno al 3.5% sobre árido, porcentaje habitualmente utilizado para la fabricación de este tipo de mezclas.

Para obtener los porcentajes de betún a añadir en las mezclas con reciclado, será necesario, de la misma forma que en los casos anteriores, tener en cuenta el betún contenido en el 30% del MBR utilizado para fabricar cada una de las probetas, en la tabla 4.5.15 se describen los porcentajes de betún total y de betún de aportación necesarios en cada caso.

Tabla 4.5.15 Porcentajes de betún sobre áridos utilizadas para fabricar las mezclas G-25 recicladas

Betún total	Betún aportado por el 30% de MBR 1	Betún añadido (B-80/100, B-150/200)	Betún aportado por el 30% de MBR 2	Betún añadido (B-180/220)
3.0	1.3	1.7	1.5	1.5
3.5	1.3	2.2	1.5	2.0
4.0	1.3	2.7	1.5	2.5

Para las mezclas de referencia con betún B-60/70, se prepararán series de probetas Marshall con los mismos porcentajes de betún total que para las mezclas recicladas, 3.0, 3.5 y 4.0 sobre árido.

Tabla 4.5.16 Resultados medios obtenidos en el Ensayo Marshall por las mezclas G-25

Ensayo Marshall							
MBR (%)	Betún de aportación	Betún total (%)	Densidad (g/cm ³)	Estabilidad (kg)	Deformación (mm)	Huecos en mezcla (%)	Huecos en áridos (%)
0	60/70	3.0	2.414	1957	2.1	6.9	13.8
		3.5	2.427	1877	2.3	5.6	13.8
		4.0	2.451	1796	2.5	4.0	13.4
30	80/100	3.0	2.397	2759	2.0	7.8	15.2
		3.5	2.414	2551	2.1	6.4	15.0
		4.0	2.428	2300	2.4	5.2	14.9
30	150/200	3.0	2.414	2287	2.2	7.1	14.6
		3.5	2.423	2339	2.5	6.1	14.7
		4.0	2.443	2235	2.8	4.6	14.4
30	180/220	3.0	2.352	1686	2.1	9.9	16.5
		3.5	2.374	1630	2.2	8.4	16.2
		4.0	2.389	1461	2.2	7.1	16.1

Los resultados obtenidos en este estudio para las diferentes mezclas tipo G-25 que se han sometido al ensayo Marshall quedan recogidos en la tabla 4.5.16, y en las fig. 4.5.5, 4.5.6, 4.5.7 y 4.5.8, en las que se puede observar la variación de algunas de las propiedades mecánicas como la densidad, estabilidad, deformación Marshall y porcentaje de huecos en mezcla.

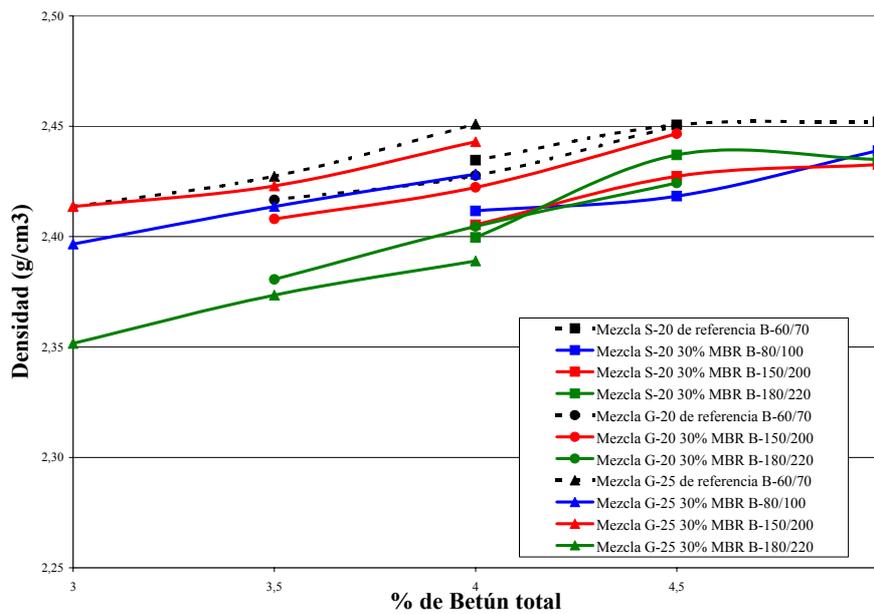


Fig. 4.5.5 Densidades medias de las probetas Marshall

En la Fig. 4.5.5 se puede observar que para todos los casos estudiados se han obtenido menores densidades en las mezclas recicladas que en las convencionales, esto puede deberse a la dificultad para compactar adecuadamente las mezclas que contienen material fresado, sin embargo, las diferencias no son muy grandes.

También se puede observar claramente que al aumentar el porcentaje de betún añadido se incrementa la densidad de las mezclas, aunque las curvas parecen indicar la existencia de un valor máximo.

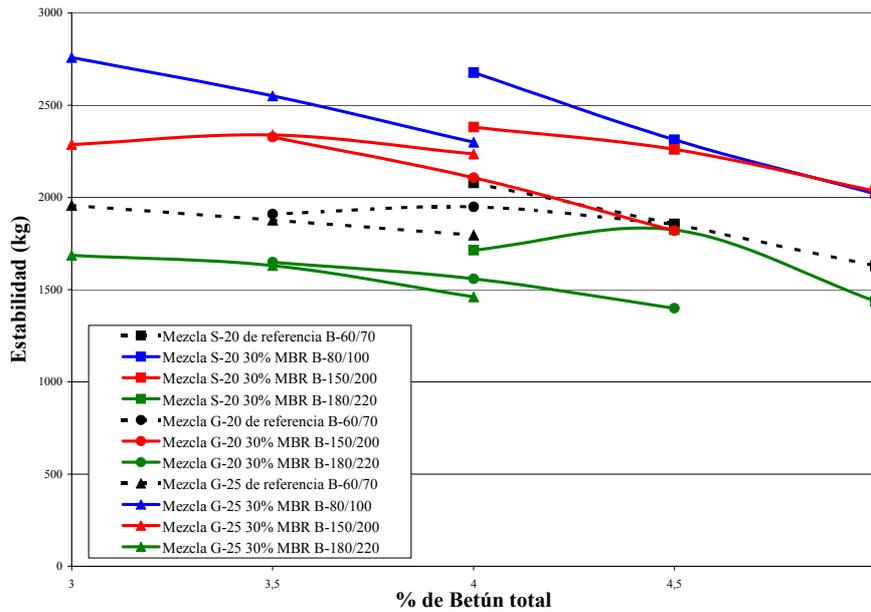


Fig. 4.5.6 Estabilidades medias de las diferentes mezclas en el ensayo Marshall

La Fig. 4.5.6 nos permite observar que, a contenidos de betún total iguales, la estabilidad de las mezclas recicladas disminuye si se utilizan betunes de aportación más blandos, así pues, al añadir a las mezclas recicladas un betún B-80/100 las estabilidades obtenidas son muy elevadas con respecto a los valores conseguidos por la mezcla patrón, sin embargo, si se añade un betún de aportación B-150/200 nos aproximamos un poco más al comportamiento de las mezclas convencionales fabricadas a partir de un betún B-60/70, pero si se emplea un betún B-180/220 la estabilidad disminuye y se obtienen valores de estabilidad inferiores a los presentados por las mezclas de referencia.

En la fig. 4.5.7 se puede observar que las deformaciones Marshall de las mezclas recicladas estudiadas son generalmente menores que las obtenidas por las mezclas convencionales, y en general, tienden a incrementarse con el porcentaje de betún de aportación utilizado.

Si tomamos en cuenta que las mezclas recicladas han presentado, en general, mayores estabilidades y menores deformaciones que las de referencia se podría decir que tienen un comportamiento más frágil, lo que podría inducir agrietamientos con más facilidad.

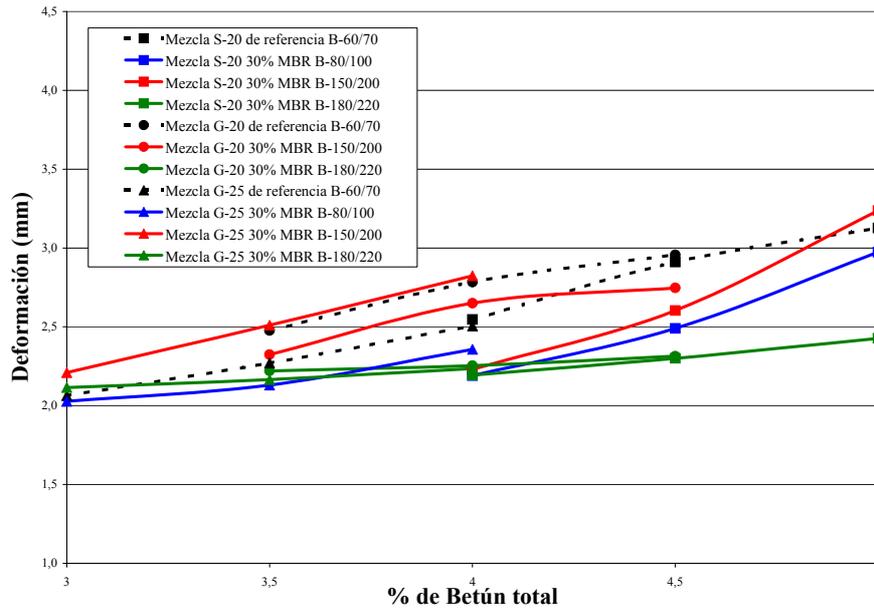


Fig. 4.5.7 Deformaciones medias de las probetas en el ensayo Marshall

El contenido de huecos en mezcla presentado por las mezclas recicladas en todos los casos es superior que el presentado por las mezclas de referencia, esto puede deberse, al igual que en el caso de las densidades, a la dificultad para compactar adecuadamente las mezclas que contienen material fresado.

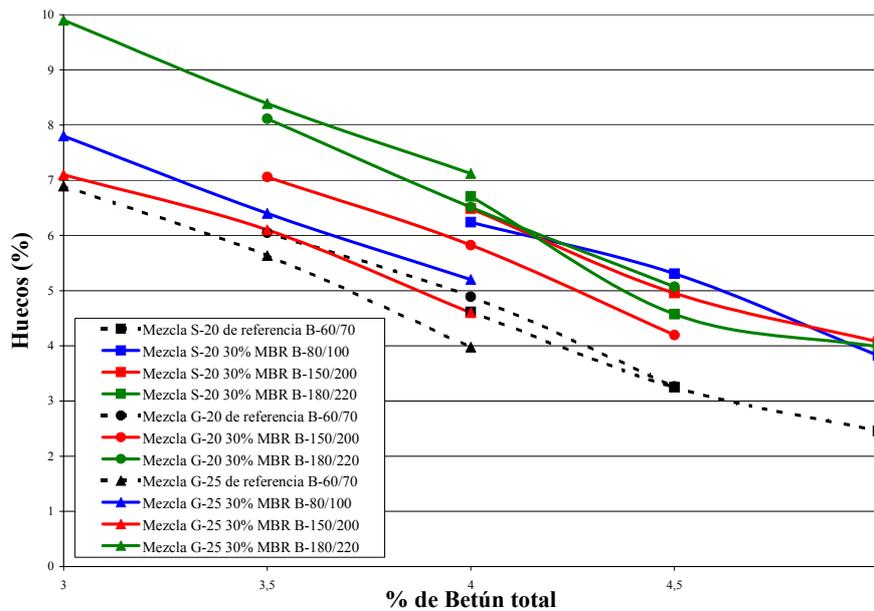


Fig. 4.5.8 Porcentaje de huecos en mezcla medios de las probetas Marshall

De acuerdo con las gráficas anteriores, las tendencias de comportamiento de las mezclas recicladas son similares que las de las mezclas convencionales equivalentes y cumplen, en cualquiera de los casos, con las especificaciones establecidas en la O.C. 299/89 T “Recomendaciones sobre mezclas bituminosas en caliente” en cuanto a estabilidad, deformación y porcentaje de huecos en mezcla.

A pesar de que las mezclas recicladas estudiadas en este trabajo cumplen con las especificaciones establecidas para mezclas convencionales, sería importante analizar el Módulo Marshall M calculado con la fórmula 4.3.1 ya que se observa nuevamente que las mezclas recicladas presentan, en general, estabilidades altas, sin embargo, sus deformaciones son menores que las presentadas por las mezclas convencionales, en la fig. 4.5.9 se presentan los Módulos obtenidos por las diferentes mezclas en este trabajo.

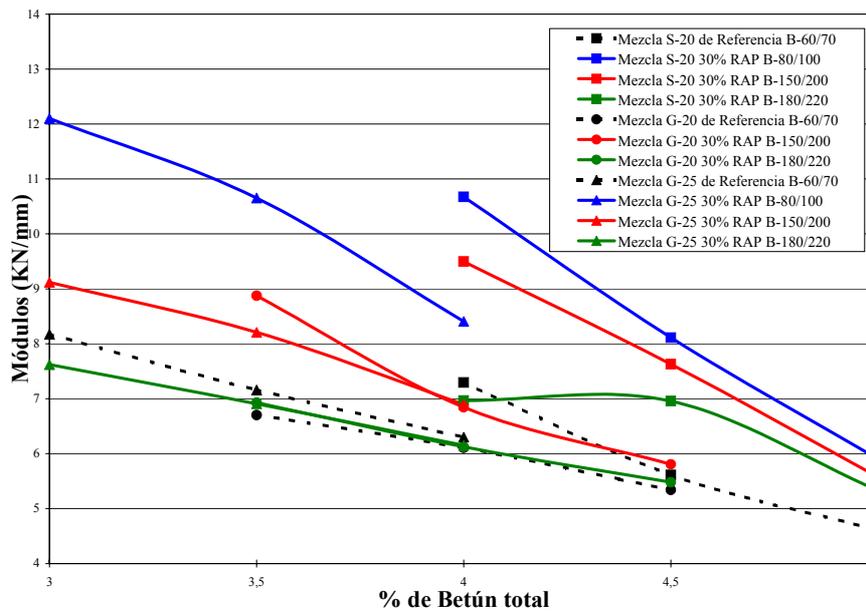


Fig. 4.5.9 Módulos Marshall de las diferentes mezclas estudiadas

Se observa que las mezclas recicladas disminuyen su Módulo Marshall cuando el betún de aportación utilizado es mas blando o se incrementa el porcentaje de betún añadido.

Las mezclas convencionales estudiadas en este trabajo apenas lograron obtener un Módulo con un valor máximo de 8 kN/mm mientras que un gran número de las mezclas recicladas superan en mucho este valor.

4.5.4.2 Ensayo a Tracción Indirecta

Una vez concluido el Ensayo Marshall, se procederá a la realización del Ensayo de Tracción Indirecta en seco y tras inmersión, de acuerdo con la norma *NLT-346/90*.

Las probetas necesarias para este ensayo se han fabricado conjuntamente con las utilizadas para el ensayo Marshall, ya que el procedimiento, los materiales empleados y los porcentajes de cada material son exactamente los mismos en ambos casos.

A continuación se detallarán los resultados obtenidos por cada una de las diferentes mezclas estudiadas.

Mezclas tipo S-20

Para cada tipo y contenido de betún se han ensayado cuatro probetas en seco y cuatro tras permanecer sumergidas en un baño de agua a 60°C durante 24 horas, de acuerdo con la norma *NLT-346/90*, en ambos casos las probetas han sido colocadas en nevera a 5°C durante varias horas para asegurar que tendrán dicha temperatura al ser ensayadas, los resultados obtenidos en cada caso se presentan en las tablas 4.5.17, 4.5.18, 4.5.19.

Tabla 4.5.17 Resultados medios en el Ensayo a Tracción Indirecta en seco de las mezclas S-20

Ensayo a tracción indirecta a 5°C, vía seca					
Tipo de Betún	Betún total (%)	Densidad (g/cm³)	R.T.I. (MPa)	Deformación (mm)	Huecos en mezcla (%)
60/70	4.0	2.436	3.72	0.9	4.6
	4.5	2.454	3.76	0.9	3.1
	5.0	2.452	3.75	0.9	2.5
80/100	4.0	2.407	3.96	0.8	6.4
	4.5	2.427	4.03	0.8	5.0
	5.0	2.431	4.03	0.9	4.1
150/200	4.0	2.408	3.42	0.8	6.4
	4.5	2.422	3.40	1.0	5.1
	5.0	2.438	3.45	1.0	3.9
180/220	4.0	2.410	3.53	0.9	6.3
	4.5	2.436	3.49	1.0	4.6
	5.0	2.439	3.63	1.0	3.8

Tabla 4.5.18 Resultados medios en el Ensayo a Tracción Indirecta tras inmersión de las mezclas S-20

Ensayo a tracción indirecta a 5°C, vía húmeda				
Tipo de Betún	Betún total (%)	Densidad (g/cm³)	R.T.I. (MPa)	Huecos en mezcla (%)
60/70	4.0	2.439	2.73	4.4
	4.5	2.449	3.09	3.3
	5.0	2.456	3.33	3.3
80/100	4.0	2.409	3.43	6.3
	4.5	2.421	3.78	5.2
	5.0	2.439	4.02	3.8
150/200	4.0	2.407	2.93	6.4
	4.5	2.427	3.33	5.0
	5.0	2.440	3.39	3.8
180/220	4.0	2.415	3.13	6.1
	4.5	2.435	3.42	4.7
	5.0	2.442	3.30	3.7

Tabla 4.5.19 Resistencia Conservada en el Ensayo a Tracción Indirecta de las mezclas S-20

Resistencia conservada en el Ensayo a tracción indirecta				
Tipo de Betún	Betún total (%)	R.T.I (MPa)		Resistencia conservada (%)
		Vía seca	Vía húmeda	
60/70	4.0	3.72	3.73	73
	4.5	3.76	3.09	82
	5.0	3.75	3.33	89
80/100	4.0	3.96	3.43	87
	4.5	4.03	3.78	94
	5.0	4.03	4.02	100
150/200	4.0	3.42	2.93	86
	4.5	3.40	3.33	98
	5.0	3.45	3.39	98
180/220	4.0	3.53	3.13	89
	4.5	3.49	3.42	98
	5.0	3.63	3.30	91

En las fig. 4.5.10, 4.5.11 y 4.5.12 se presentan las variaciones de la Resistencia a Tracción Indirecta en seco, tras inmersión y conservada obtenidas para cada una de las diferentes mezclas estudiadas.

Mezclas tipo G-20

En este caso no se fabricarán mezclas recicladas con el betún B-80/100, por lo tanto solo se fabricarán las mezclas de referencia y las recicladas con betunes B-150/200 y B-180/220, en cada caso se han ensayado cuatro probetas en seco y cuatro tras inmersión, de acuerdo con la norma *NLT-346/90*, todas las probetas han sido colocadas en nevera a 5°C durante varias horas para asegurar que tendrán dicha temperatura al ser ensayadas.

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 4.5.20, 4.5.21, 4.5.22 y en las fig. 4.5.10, 4.5.11 y 4.5.12 donde se presentan las variaciones de la Resistencia a Tracción Indirecta en seco, tras inmersión y conservada de las diferentes mezclas estudiadas.

Tabla 4.5.20 Resultados medios en el Ensayo a Tracción Indirecta en seco de las mezclas G-20

Ensayo a tracción indirecta a 5°C, vía seca					
Tipo de Betún	Betún total (%)	Densidad (g/cm ³)	R.T.I. (MPa)	Deformación (mm)	Huecos en mezcla (%)
60/70	3.5	2.416	3.18	0.8	6.1
	4.0	2.436	3.19	0.8	4.6
	4.5	2.454	3.53	0.9	3.1
150/200	3.5	2.417	3.32	0.8	6.7
	4.0	2.442	3.54	0.9	5.1
	4.5	2.448	3.48	1.0	4.1
180/220	3.5	2.380	2.94	0.8	8.1
	4.0	2.406	3.16	0.9	6.5
	4.5	2.415	3.00	0.9	5.4

Tabla 4.5.21 Resultados medios en el Ensayo a Tracción Indirecta tras inmersión de las mezclas G-20

Ensayo a tracción indirecta a 5°C, vía húmeda				
Tipo de Betún	Betún total (%)	Densidad (g/cm ³)	R.T.I. (MPa)	Huecos en mezcla (%)
60/70	3.5	2.425	2.42	5.7
	4.0	2.441	2.73	4.4
	4.5	2.452	3.13	3.2
150/200	3.5	2.418	2.72	6.7
	4.0	2.443	3.29	5.0
	4.5	2.455	3.33	3.9
180/220	3.5	2.393	2.70	7.6
	4.0	2.419	2.96	6.0
	4.5	2.423	2.89	5.1

Tabla 4.5.22 Resistencia Conservada en el Ensayo a Tracción Indirecta de las mezclas G-20

Resistencia conservada en el Ensayo a tracción indirecta				
Tipo de Betún	Betún total (%)	R.T.I (MPa)		Resistencia conservada (%)
		Vía seca	Vía húmeda	
60/70	3.5	3.25	2.42	74
	4.0	3.19	2.73	85
	4.5	3.53	3.13	89
150/200	3.5	3.32	2.72	82
	4.0	3.54	3.29	93
	4.5	3.43	3.33	97
180/220	3.5	2.94	2.70	92
	4.0	3.16	2.96	94
	4.5	3.00	2.89	97

Mezclas tipo G-25

Nuevamente se han ensayado cuatro probetas en seco y cuatro tras inmersión para cada una de las diferentes mezclas fabricadas y han sido ensayadas a 5°C de acuerdo con la norma *NLT-346/90*, los resultados obtenidos en cada caso se presentan en las tablas 4.5.23, 4.5.24, 4.5.25 y en las fig. 4.5.10, 4.5.11 y 4.5.12 donde se observan las variaciones de la Resistencia a Tracción Indirecta en seco, tras inmersión y conservada de las diferentes mezclas estudiadas.

Tabla 4.5.23 Resultados medios en el Ensayo a Tracción Indirecta en seco de las mezclas G-25

Ensayo a tracción indirecta a 5°C, vía seca					
Tipo de Betún	Betún total (%)	Densidad (g/cm ³)	R.T.I. (MPa)	Deformación (mm)	Huecos en mezcla (%)
60/70	3.0	2.399	2.57	0.8	7.5
	3.5	2.433	2.83	0.8	5.4
	4.0	2.442	2.95	0.8	4.3
80/100	3.0	2.357	2.34	0.6	9.7
	3.5	2.376	2.57	0.7	8.3
	4.0	2.390	2.93	0.8	7.1
150/200	3.0	2.362	2.14	0.6	9.5
	3.5	2.379	2.53	0.8	8.2
	4.0	2.396	2.86	0.9	6.8
180/220	3.0	2.348	2.36	0.7	10.0
	3.5	2.374	2.62	0.8	8.4
	4.0	2.394	2.80	0.8	6.9

Tabla 4.5.24 Resultados medios en el Ensayo a Tracción Indirecta tras inmersión de las mezclas G-25

Ensayo a tracción indirecta a 5°C, vía húmeda				
Tipo de Betún	Betún total (%)	Densidad (g/cm³)	R.T.I. (MPa)	Huecos en mezcla (%)
60/70	3.0	2.414	1.50	6.9
	3.5	2.433	1.78	5.4
	4.0	2.442	2.37	4.3
80/100	3.0	2.373	1.31	9.1
	3.5	2.390	1.92	7.8
	4.0	2.410	2.16	6.3
150/200	3.0	2.369	1.32	9.2
	3.5	2.389	1.74	7.8
	4.0	2.415	2.02	6.1
180/220	3.0	2.366	2.15	9.4
	3.5	2.378	2.42	8.2
	4.0	2.392	2.58	7.0

Tabla 4.5.25 Resistencia Conservada en el Ensayo a Tracción Indirecta de las mezclas G-25

Resistencia conservada en el Ensayo a tracción indirecta				
Tipo de Betún	Betún total (%)	R.T.I (MPa)		Resistencia conservada (%)
		Vía seca	Vía húmeda	
60/70	3.0	2.57	1.50	58
	3.5	2.83	1.78	63
	4.0	2.95	2.37	80
80/100	3.0	2.34	1.31	56
	3.5	2.57	1.92	75
	4.0	2.93	2.16	74
150/200	3.0	2.14	1.32	62
	3.5	2.53	1.74	69
	4.0	2.86	2.02	71
180/220	3.0	2.36	2.15	91
	3.5	2.62	2.42	92
	4.0	2.80	2.58	92

En la fig. 4.5.10 se puede observar que, en general, la resistencia a tracción indirecta presentada por todas las mezclas estudiadas, recicladas y de referencia, es más elevada cuanto más cerrada es la mezcla y mayor es su contenido de betún.

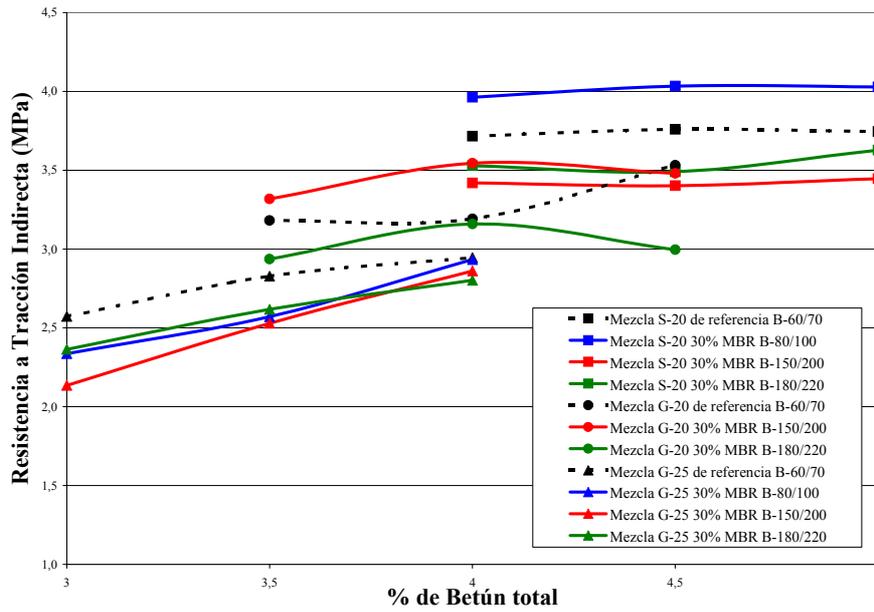


Fig. 4.5.10 Resistencia a Tracción Indirecta en seco a 5°C de las diferentes mezclas estudiadas

Los resultados obtenidos por las diferentes mezclas recicladas en el ensayo de Tracción Indirecta no presentan variaciones significativas con respecto a los valores de las mezclas de referencia.

En el ensayo en seco se puede observar que para la mezcla G-25 todos los valores de las mezclas recicladas están un poco por debajo de los obtenidos por la mezcla de referencia, pero la máxima diferencia de valores entre las mezclas convencionales y las recicladas no llega a los 0.5 MPa.

En las mezclas G-20 y S-20 los valores de las mezclas recicladas son en algunos casos mayores y en otros menores que los presentados por las mezclas de referencia dependiendo del betún de aportación utilizado, pero nuevamente los resultados son muy parecidos y no se encuentran diferencias de valores entre las mezclas recicladas y de referencia mayores de 0.5 MPa.

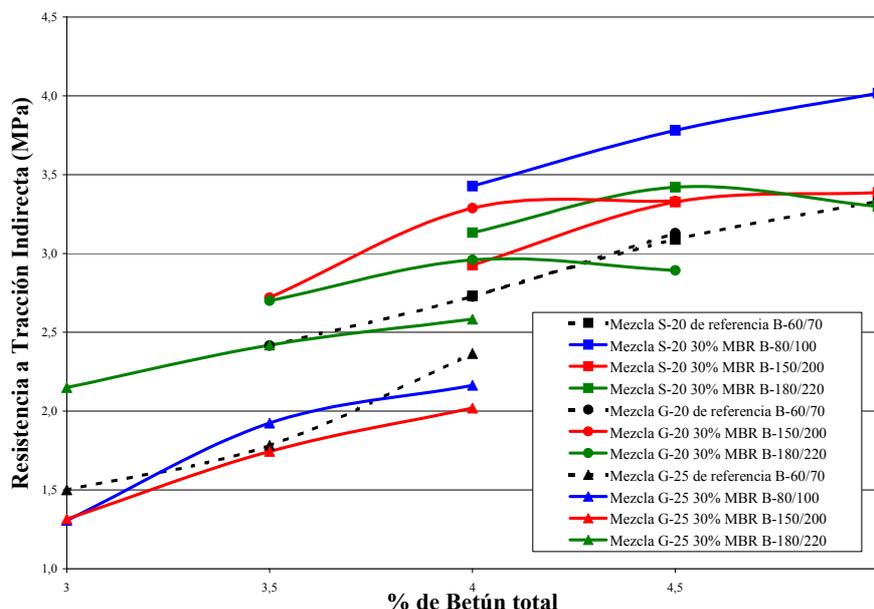


Fig. 4.5.11 Resistencia a Tracción Indirecta tras inmersión a 5°C de las diferentes mezclas estudiadas

Al analizar los resultados de los ensayos a Tracción Indirecta tras inmersión nos damos cuenta de que en este caso, las mezclas recicladas presentan un mejor comportamiento que las convencionales ya que en la mayoría de los casos las mezclas recicladas presentan resistencias más elevadas que las mezclas de referencia.

En el caso de las mezclas G-25 con betunes de aportación B-80/100 y B-150/200 se logran resistencias a Tracción Indirecta tras inmersión del mismo orden que las presentadas por las mezclas convencionales equivalentes, esto puede deberse a que el porcentaje de betún añadido a estas es más bajo y no logra tener tanta influencia en su comportamiento como sucede en las mezclas G-20 y S-20.

En la Fig. 4.5.12 se presentan las resistencias conservadas a tracción indirecta de las diferentes mezclas estudiadas en donde se puede observar que las mezclas recicladas han presentado un comportamiento muy satisfactorio ya que han logrado resistencias tras inmersión muy elevadas.

Esto coincide con lo que se había observado en la figura 4.4.5, en donde las resistencias conservadas a tracción indirecta de mezclas recicladas en caliente con porcentajes de MBR de hasta un 35% se habían comportado adecuadamente, sin embargo, si sobrepasamos este valor, la resistencia tras inmersión disminuye considerablemente y por consecuencia también la resistencia conservada.

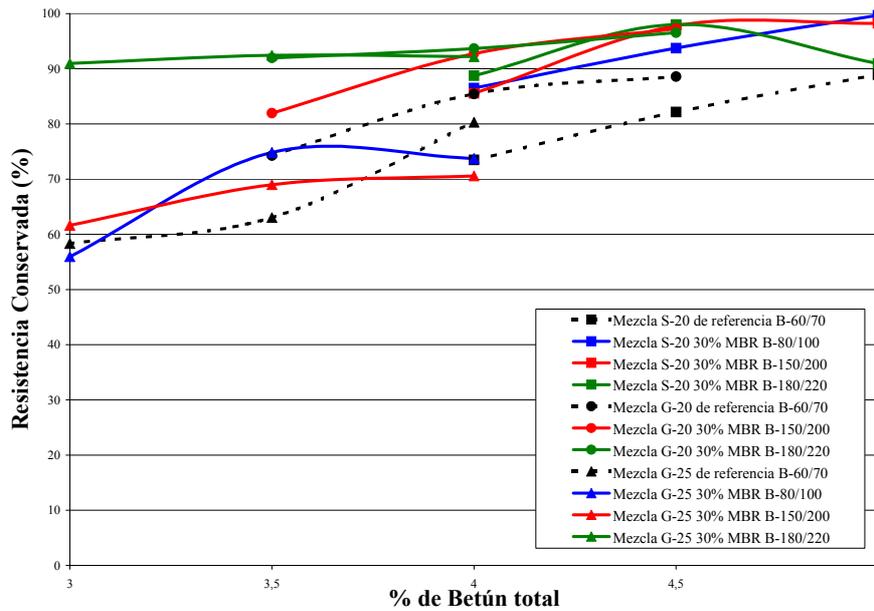


Fig. 4.5.12 Resistencia Conservada a Tracción Indirecta de las diferentes mezclas estudiadas

Si analizamos los resultados obtenidos en esta parte del trabajo, se observa que el ensayo de Tracción Indirecta no ha puesto de manifiesto grandes diferencias entre las características mecánicas de las mezclas recicladas y las mezclas convencionales, lo que no significa que en todos los casos suceda lo mismo ni que a lo largo del tiempo se conserve este comportamiento.

Por lo tanto, es necesario ampliar el estudio a otros campos como la fatiga o el envejecimiento para asegurarnos que el diseño de las mezclas recicladas es adecuado y su comportamiento equivalente al de una mezcla convencional.