

## **4.6. Estudio sobre el comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas recicladas en caliente mediante el ensayo a flexotracción dinámica**

### **4.6.1 Planteamiento**

Hasta el momento todos los ensayos que se han realizado son estáticos y aunque brindan información relevante sobre el comportamiento de las mezclas recicladas en caliente, es necesario ampliar los estudios mediante el empleo de ensayos dinámicos que nos indiquen cual es el comportamiento de las mezclas recicladas ante fenómenos tan importantes como la fatiga.

Esta parte del estudio pretende ser un completo análisis del comportamiento a fatiga de diferentes tipos de mezclas bituminosas en las que se incorporará un porcentaje de MBR en su composición. Para desarrollar el presente trabajo, se empleará el ensayo de Fatiga en Flexotracción Dinámica a desplazamiento controlado utilizado en España y detallado en la norma *NLT-350/90*.

En todos los trabajos realizados hasta este momento, se ha observado que las mezclas recicladas, en general, alcanzan unas densidades menores que las obtenidas por las mezclas convencionales equivalentes. Esto puede deberse en parte, a la dificultad para lograr una compactación adecuada, por lo tanto, es de gran importancia conocer la influencia que el grado de compactación puede tener sobre la vida a fatiga de estas mezclas. Por esto, se estudiarán mezclas recicladas fabricadas con diferentes energías de compactación.

Para tener una continuidad con los trabajos anteriores se fabricarán dos tipos de mezclas de los que se han venido utilizando S-20 y G-20 variando la energía de compactación empleada para fabricar las probetas y utilizando un solo tipo y porcentaje de betún de aportación para cada mezcla.

Se empleará nuevamente un porcentaje de MBR del 30% ya que es el utilizado con más frecuencia por el tipo de plantas adaptadas para el reciclado en caliente de mezclas bituminosas que se tienen en España, además de ser el porcentaje que más se ha empleado en los estudios anteriores.

Para contar con una serie de valores de referencia con los que podamos comparar el comportamiento a fatiga de las mezclas recicladas, se fabricarán una serie de probetas con mezclas convencionales con la misma granulometría y contenido de ligante que las recicladas, pero utilizando un betún B-60/70.

#### 4.6.2. Materiales empleados

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

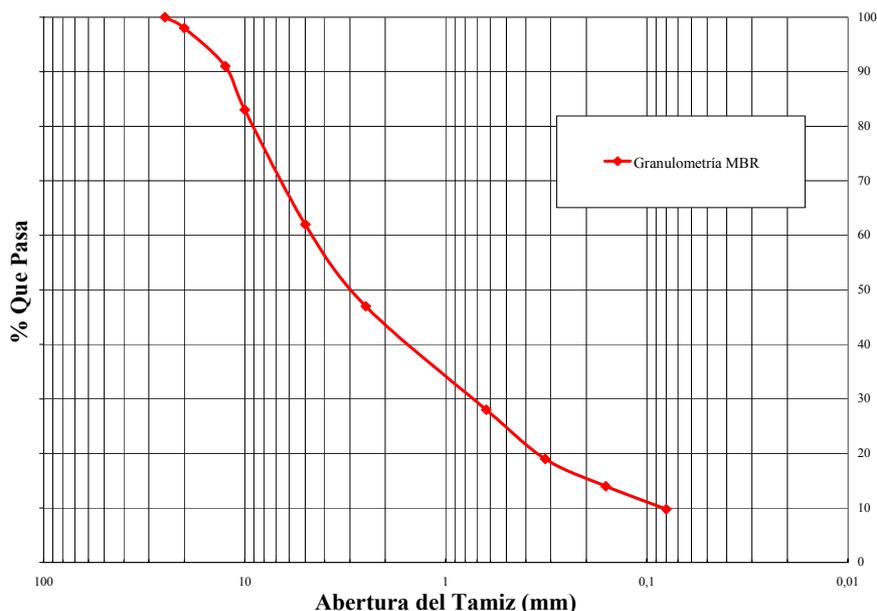
El MBR empleado en este estudio es de la misma procedencia que el empleado en el estudio anterior y ha sido suministrado por la misma planta industrial, después de haber pasado por un proceso de trituración y homogeneización.

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 de acuerdo a la norma *NLT-164/90* y el análisis granulométrico de los áridos recuperados siguiendo la norma *NLT-165/90*, los valores medios obtenidos se detallan en la tabla 4.6.1.

**Tabla 4.6.1** Granulometría de los áridos del MBR después de la extracción 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	100	98	91	83	62	47	28	19	14	9.8	4.57	4.79

Una vez obtenida la granulometría del MBR después de la extracción del ligante se elaboró la fig. 4.6.1 donde se observa la curva granulométrica que presentan los áridos contenidos en el MBR.



**Fig. 4.6.1** Granulometría de los áridos del material fresado después de la extracción del ligante

### Áridos de aportación

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

En este trabajo se separaron los áridos de aportación en diferentes fracciones y se agregaron en los porcentajes necesarios para generar unas curvas granulométricas iguales a las empleadas en el trabajo anterior.

### Ligantes de aportación

Como se ha mencionado anteriormente se pretende dar continuidad a los trabajos realizados hasta el momento, por lo cual, se utilizará para las mezclas recicladas un ligante de aportación B-150/200 que se ha utilizado en los trabajos anteriores, y para las mezclas de referencia un betún B-60/70 también empleado con anterioridad, en la tabla 4.6.2 se presentan las características más importantes de cada uno de ellos.

**Tabla 4.6.2** 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	1.034	1.024

### 4.6.3. Granulometría empleada

Las granulometrías de las mezclas bituminosas utilizadas son del tipo semidensa S-20 y gruesa G-20 de acuerdo con las “Recomendaciones sobre mezclas bituminosas en caliente” del MOPU del año 1989.

Este trabajo pretende ser un complemento de los descritos anteriormente, por lo tanto se utilizarán las granulometrías empleadas en el estudio anterior; en la tabla 4.6.3 se muestran los husos granulométricos y las granulometrías de trabajo empleadas.

**Tabla 4.6.3** Husos granulométricos S-20 y G-20 y granulometrías de trabajo empleadas

	Porcentajes de pasa (% en masa) Tamices UNE (mm)							
	25	20	12.5	5	2.5	0.63	0.32	0.08
<b>Huso S-20</b>	100	80-95	65-80	43-58	30-45	18-25	10-18	4-8
<b>Granulometría empleada</b>	100	96	77	50	36.2	17.4	11.4	5.94
<b>Huso G-20</b>	100	75-95	55-75	28-46	20-35	8-20	5-14	2-6
<b>Granulometría empleada</b>	100	93.6	64.6	39.9	29	14.2	9.4	4.84

Después de calcular las granulometrías para cada tipo de mezcla se elaboraron las curvas granulométricas que se presentan en las tablas 4.6.2 y 4.6.3 y que son las mismas que se emplearon en el trabajo pasado.

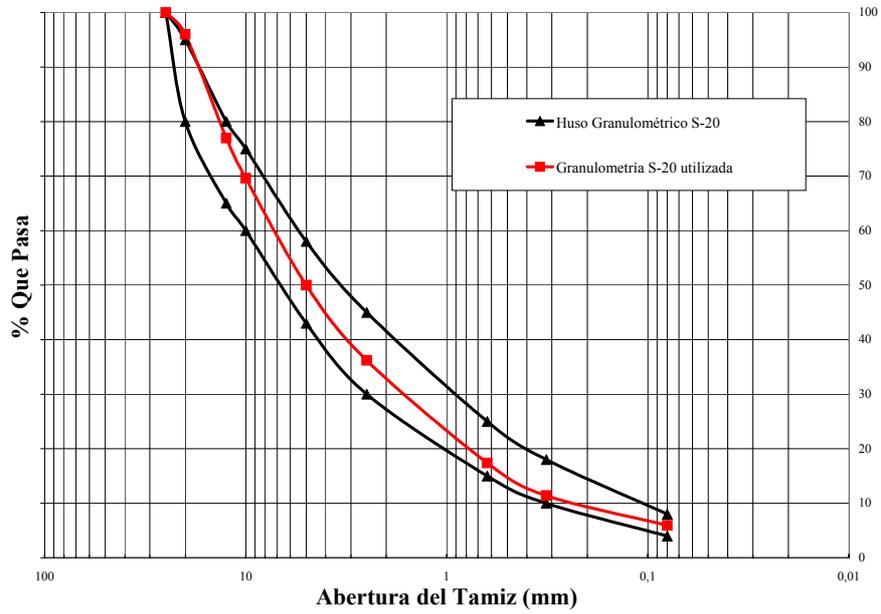


Fig. 4.6.2 Huso granulométrico S-20 y granulometría de trabajo utilizada

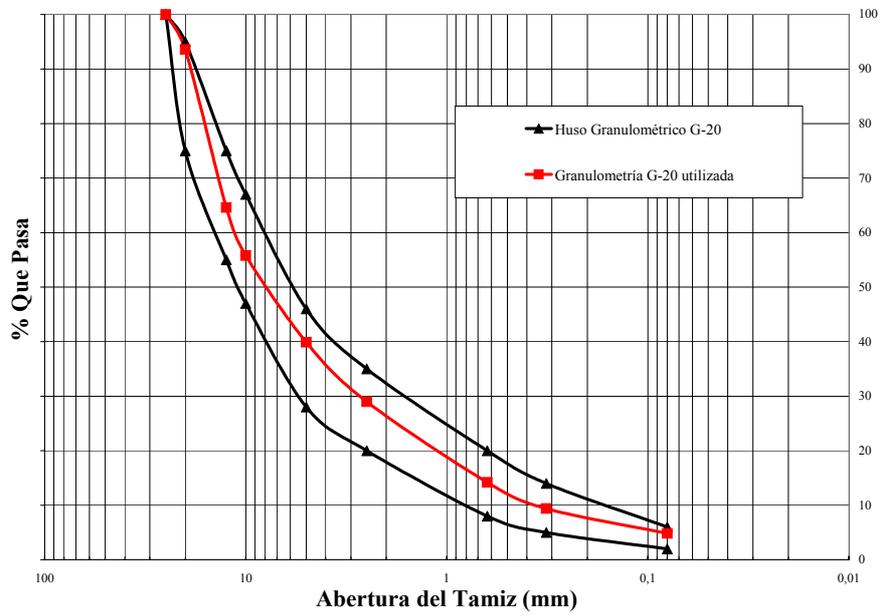


Fig. 4.6.3 Huso granulométrico G-20 y granulometría de trabajo utilizada

#### 4.6.4. Proceso experimental

Con la realización de este trabajo se pretende conocer el comportamiento que presentan algunos tipos de mezclas recicladas en caliente ante la fatiga, y el efecto que tiene el grado de compactación sobre su vida a fatiga.

Para realizar este estudio se utilizará el Ensayo de fatiga en flexotracción dinámica de mezclas bituminosas a desplazamiento controlado, detallado en la norma *NLT-350/90*.

Para dar continuidad a los estudios realizados hasta el momento, se ha decidido usar dos tipos de mezclas de los que se han venido analizando en los trabajos anteriores, S-20 y G-20, un porcentaje de MBR del 30%, porcentajes de betún total del 4.5% y 4% respectivamente y tres grados de compactación 100%, 50% y 25%, lo que nos da un total de 6 combinaciones diferentes para fabricar las distintas mezclas recicladas que se muestran en la tabla 4.6.4.

Para contar con valores de referencia con los cuales comparar los resultados obtenidos a fatiga por las mezclas recicladas, se ha fabricado una serie para cada tipo de mezcla sin adicionar MBR, con un betún de aportación B-60/70, y con un 100% de energía de compactación, manteniendo las mismas granulometrías y contenidos de betún total empleados para las mezclas recicladas.

**Tabla 4.6.4** Series de probetas fabricadas para el estudio a fatiga

Serie	Tipo de mezcla	MBR (%)	Betún de aportación	Betún de aportación (%)	Betún total (%)	Energía de compactación (%)	Probetas
1	S-20	30	B-150/200	3.1	4.5	100	10
2						50	10
3						25	10
4	G-20	30		2.6	4.0	100	10
5						50	10
6						25	10
7	S-20	0	B-60/70	4.5	4.5	100	10
8	G-20			4.0	4.0	100	10
						<b>Total</b>	<b>80</b>

#### 4.6.4.1. Ensayo de fatiga en flexotracción dinámica de mezclas bituminosas

El ensayo a flexotracción dinámica consiste en someter una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, a un desplazamiento que varía en el tiempo según una función sinusoidal.

Si relacionamos las deformaciones máximas iniciales producidas en el centro de la probeta, con el número de ciclos necesarios para reducir la rigidez total de la probeta a la mitad, se obtienen pares de valores correspondientes a varios ensayos, que permiten definir la ley de fatiga en deformación con control en desplazamiento.

En este ensayo se considera la hipótesis de que la reducción de rigidez es causada únicamente por el aumento del grado de microfisuración, despreciando el efecto termomecánico de aumento de la temperatura de la mezcla debido a la transformación de la energía visco-elástica disipada en cada pulsación en forma de calor.

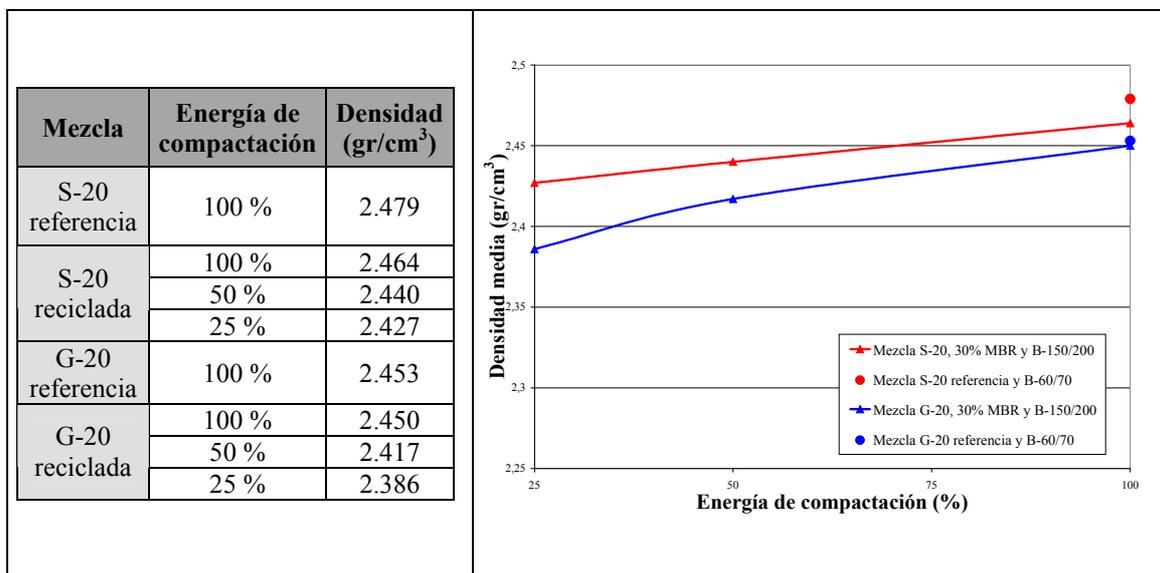
La máquina para ensayar las probetas puede ser cualquier tipo de prensa servohidráulica con capacidad para aplicar cargas cíclicas sinusoidales de intensidad no menor de  $\pm 2.5$  kN y frecuencia mínima de 10 Hz. La célula de carga que se utilice para la medida de la carga dinámica tendrá una capacidad de lectura no menor de  $\pm 2.5$  kN y la precisión de lectura será menor o igual de  $\pm 0.002$  kN.

El extensómetro que se vaya a utilizar para la medida de la deformación central de la probeta tendrá una base de medida de  $50 \pm 0.5$  mm, su rango de lectura estará comprendido entre  $\pm 0.2$  mm y  $\pm 0.5$  mm, y la precisión de lectura será menor o igual de  $\pm 0.25$   $\mu$ m.

Las probetas para ensayo se obtienen a partir del procedimiento descrito en la norma *NLT-173*, y tendrán unas dimensiones aproximadas de 300 x 300 x 50 mm, y por serrado de las mismas se obtendrán cinco probetas prismáticas de cada una, con unas dimensiones de  $300 \pm 10$  mm por  $50 \pm 3$  mm por  $50 \pm 3$  mm; para la obtención de la ley de fatiga de cada tipo de mezcla se ensayarán 10 probetas como estas.

Una vez fabricadas las probetas se determinará su densidad relativa empleando el método descrito en la norma *NLT-168*, adoptando el procedimiento de la muestra saturada y superficie seca y después de obtener las densidades se dejan secar perfectamente las probetas.

En la fig. 4.6.4 se muestran los valores medios de densidad obtenidos por las diferentes mezclas fabricadas en este trabajo y la gráfica en la que se aprecia su comportamiento.



**Fig. 4.6.4** Densidades medias obtenidas por las diferentes mezclas fabricadas en este trabajo

Se puede observar que las diferencias entre los valores de densidad de las mezclas de referencia con respecto a las recicladas con un 100% de energía de compactación son mínimas y puede decirse que son equivalentes aunque nuevamente se observa que las mezclas de referencia logran una densidad mayor que las recicladas.

Por otra parte, se aprecia que las densidades obtenidas disminuyen al emplear una menor energía de compactación, sin embargo, las diferencias no son tan grandes como se esperaba; esto puede deberse a que la mayor parte de la compactación se produce en el período inicial de compactación.

Las diferencias tan pequeñas en la densidad relativa de las mezclas fabricadas con diferentes energías de compactación nos pueden traer problemas en el momento de determinar las leyes de fatiga ya que probablemente no existan diferencias considerables entre ellas y será difícil observar una influencia clara del grado de compactación en la vida a fatiga de las mezclas recicladas.

Una vez obtenidas las densidades y antes de la ejecución del ensayo a fatiga en flexotracción dinámica, las probetas deben tener una temperatura homogénea e igual a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ; para ello se mantienen durante más de cuatro horas previas al ensayo a la temperatura especificada.

Con el fin de fijar la probeta al aparato de apoyo se pegarán a la probeta trozos de tubo cuadrado metálico; uno de ellos se pega en el centro de una de las caras serradas de la probeta y en la otra cara serrada se pegan otros dos tubos en los extremos tal y como se muestra en la fig. 4.6.5.

La capacidad que presenta el aparato de apoyo de desplazar y bascular los ejes del mismo, se emplea para evitar que, en las operaciones de fijación de la probeta, ésta sea sometida a esfuerzos de flexión o torsión que puedan dañarla o modificar su estado tensional, afectando así a su comportamiento en el ensayo. Una vez terminado el montaje dentro de la cámara termostática de la prensa se espera el tiempo necesario para que todos los elementos de apoyo, extensómetro y probeta, recuperen la temperatura de ensayo de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Una vez realizado el montaje de la probeta y del extensómetro, y conseguida la temperatura de ensayo especificada, se aplica al émbolo un desplazamiento que varíe en el tiempo siguiendo una función sinusoidal de acuerdo con la fórmula 4.6.1.

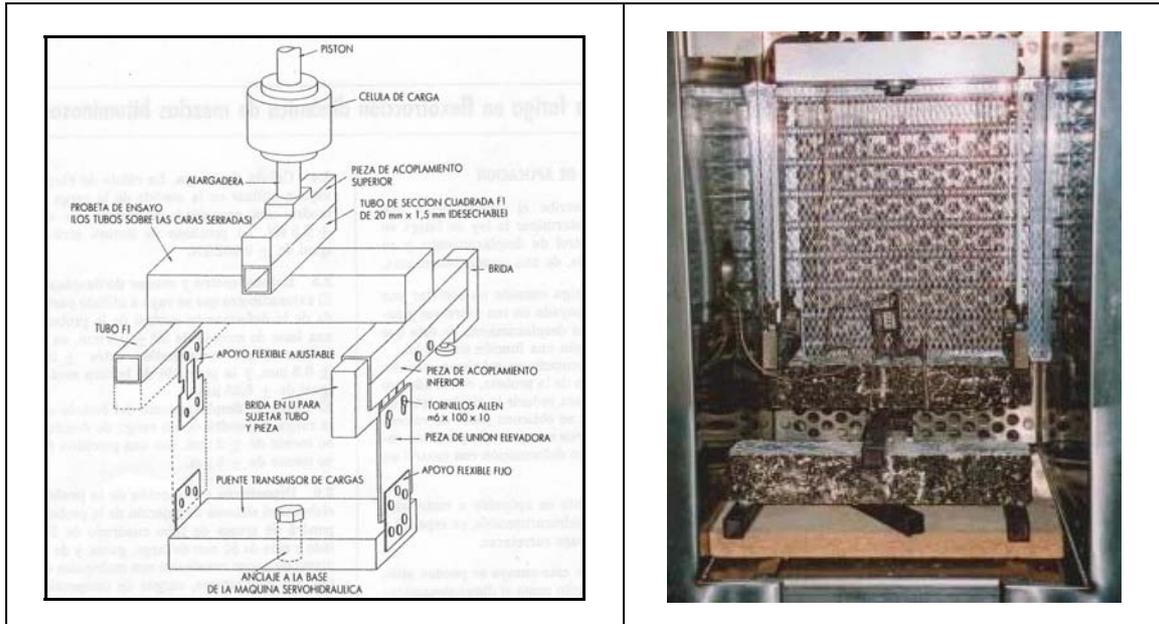


Fig. 4.6.5 Montaje del ensayo a flexotracción dinámica

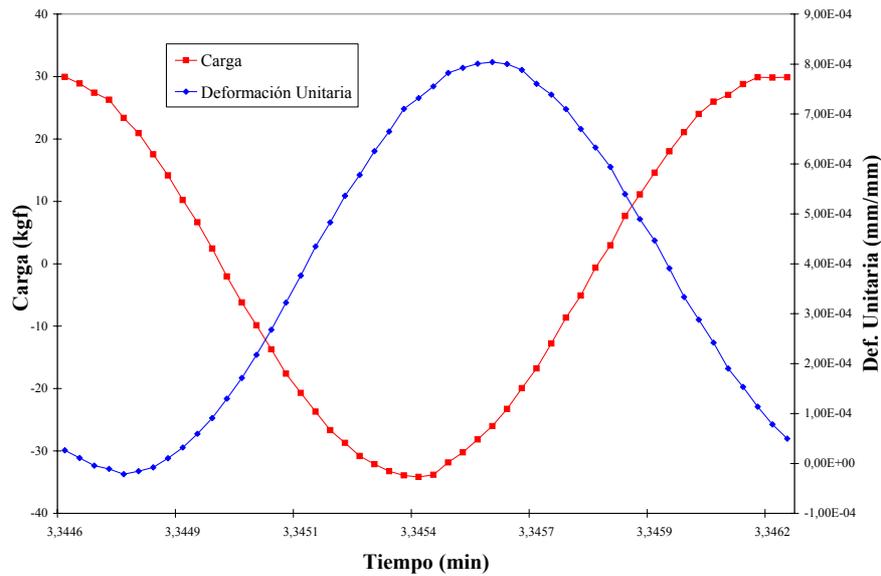
$$D = D_o \text{ sen } (2\pi Ft)$$

Fórmula (4.6.1)

donde  $D$  = Desplazamiento en el instante  $t$  ( $\mu\text{m}$ ),  $2D_o$  = Amplitud total de la función desplazamiento ( $\mu\text{m}$ ),  $F$  = Frecuencia de la onda (Hz), y  $t$  = Tiempo (segundos).

La frecuencia  $F$  de la onda será de 10 Hz y el valor de la amplitud total  $2D_o$  será distinto en cada ensayo variando desde 80 mm a 350 mm, esta sollicitación se mantiene hasta que se cumpla la condición de fin de ensayo.

El registro de las funciones de carga, extensométricas y desplazamiento se realiza a través del equipo de adquisición de datos cada 500 ciclos, a partir del ciclo 100. Las funciones de carga, extensométrica y de desplazamiento, vendrán dadas, en cada ciclo considerado, por los valores obtenidos en la lectura de más de 50 puntos equidistantes en el tiempo, en la fig. 4.6.6. se observa un ejemplo de las funciones de carga y deformación obtenidas para una de las probetas ensayadas



**Fig. 4.6.6** Ejemplo de gráfica de las funciones de carga y desplazamiento obtenida por el sistema de adquisición de datos de la prensa para un ciclo del ensayo a flexotracción

Una vez realizado el registro de las funciones anteriores en cada ciclo, y antes de proceder al siguiente registro, se calcula la amplitud cíclica de carga dinámica, definiendo ésta como el valor absoluto de la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de la función de carga registrada en dicho ciclo.

Se considera finalizado el ensayo en el ciclo N, si el valor de la amplitud cíclica de carga calculada para el ciclo N es menor o igual a la mitad del valor de la amplitud cíclica de carga calculada para el ciclo 200; el ensayo se considera válido si el N obtenido está comprendido entre 6200 y 600200 ciclos.

El estado tensional de las mezclas se caracteriza por la tensión que se produce en un punto situado en el centro geométrico de la cara en que se encuentran los dos apoyos.

La función tensión se determina, para cada ciclo, a partir de la función de carga, de las dimensiones de la probeta y de la distancia entre apoyos según la fórmula 4.6.2.

$$T = 3 \times P \times \frac{(L/2 - 10)}{(C \times D^2)} \quad \text{Fórmula (4.6.2)}$$

donde  $T$  = Tensión en un instante en  $\text{N/mm}^2$  ó MPa,  $P$  = Carga registrada en el mismo instante en N,  $L$  = Separación entre apoyos en mm,  $C$  = Ancho de la probeta en mm y  $D$  = Canto de la probeta en mm.

El estado de deformaciones de la probeta se caracteriza por la deformación que se produce en el mismo punto en que se define la tensión y según la normal al mismo plano mencionado.

La función deformación se determina, para cada ciclo, a partir de la función extensométrica registrada y de la distancia entre apoyos y base de medida del extensómetro, en nuestro trabajo, la función deformación viene dada directamente en el registro de datos que nos entrega el sistema de adquisición de datos de la prensa.

El módulo dinámico en un determinado ciclo se define como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión y la amplitud cíclica de la función deformación tal y como se muestra en la fórmula 4.6.3

$$MD = \frac{T_c}{\varepsilon_c} \quad \text{Fórmula (4.6.3)}$$

Dónde  $MD$  = Módulo dinámico en MPa,  $T_c$  = Amplitud cíclica de la función tensión en MPa, y  $\varepsilon_c$  = Amplitud cíclica de la función deformación (adimensional).

El ángulo de desfase entre la función de tensión y la función de deformación se obtiene aproximando, por el método de mínimos cuadrados, cada una de las dos funciones tensión y deformación a las siguientes funciones aproximadas:

$$T_a = A_t \text{sen}(2\pi Ft + B_t) + K_t \quad \text{Fórmula (4.6.4)}$$

$$\varepsilon_a = A_\varepsilon \text{sen}(2\pi Ft + B_\varepsilon) + K_\varepsilon \quad \text{Fórmula (4.6.5)}$$

Dónde  $T_a$  y  $\varepsilon_a$  = Valor de las funciones tensión y deformación aproximadas, en MPa y adimensional, respectivamente,  $2A_t$  y  $2A_\varepsilon$  = Amplitud de las funciones tensión y deformación aproximadas, en MPa y adimensional,  $F$  = Frecuencia de la función de carga, 10 Hz.,  $t$  = Tiempo en segundos,  $B_t$  y  $B_\varepsilon$  = Ángulo de fase de las funciones tensión y deformación aproximadas, en radianes,  $K_t$  y  $K_\varepsilon$  = Constantes.

El ángulo de desfase se define como el desfase existente entre las funciones de tensión y deformación, de acuerdo con la fórmula 4.6.6.

$$\phi = (B_\varepsilon - B_t) \frac{180}{\pi} \quad \text{Fórmula (4.6.6)}$$

Dónde  $\phi$  = Ángulo de desfase en grados sexagesimales.

El cálculo del ángulo de desfase se basa en la formulación anterior, pero en este caso se ha calculado directamente sobre las gráficas de carga y deformación representadas por los valores registrados por el equipo de adquisición de datos. Para esto, se ha buscado el tiempo de deformación máxima y de carga máxima y suponiendo que cada ciclo corresponde a  $360^\circ$  y conociendo los tiempos iniciales y finales de cada ciclo, el ángulo de desfase vendrá dado por la fórmula 4.6.7.

$$\phi = \frac{(t_M - t_m) 360}{t_f - t_i} \quad \text{Fórmula (4.6.7)}$$

Donde  $\phi$  = Ángulo de desfase en grados sexagesimales,  $t_M$  = Tiempo de valor máximo de la deformación,  $t_m$  = Tiempo de valor mínimo de carga,  $t_f$  = tiempo final del ciclo,  $t_i$  = tiempo inicial del ciclo.

En la tabla 4.6.5 se observan los resultados obtenidos por cada una de las probetas ensayadas para la mezcla reciclada S-20 fabricadas con un 100% de energía de compactación, es importante mencionar que se ensayaron un total de 10 probetas, pero solamente 6 de ellas han sido válidas.

**Tabla 4.6.5** Resultados obtenidos en el ensayo a flexotracción por las probetas fabricadas con mezcla tipo S-20 reciclada con un 30% de MBR, betún de aportación B-150/200 y un 100% de energía de compactación

Probeta	Amplitud impuesta ( $\mu\text{m}$ )	Def. Unitaria ciclo 200	Módulo Dinámico ciclo 200 (MPa)	Número de ciclos final ( $N$ )
1_2_300	300	0,000303845	5389	45000
5_2_280	280	0,000315669	5008	36000
2_2_260	260	0,000288241	4968	55500
1_1_240	240	0,000242398	5722	79000
4_1_180	180	0,000188413	5300	172000
3_1_180	180	0,000186858	5993	356500
<b>Media</b>			<b>5277</b>	

Como se puede observar en la tabla, las amplitudes de ensayo que han dado resultados aceptables se encuentran entre los 180 y los 300  $\mu\text{m}$ , el resto de los valores no se tomaron en cuenta por que el valor de  $N$  era mayor que  $6.2 \cdot 10^6$ .

En la tabla 4.6.6 se muestran los resultados obtenidos por las probetas ensayadas para la mezcla reciclada S-20 fabricadas con un 50% de energía de compactación, en este caso se ensayaron nuevamente un total de 10 probetas, pero solamente 8 de ellas han sido aceptadas para los cálculos.

Nuevamente las amplitudes de deformación impuestas en los ensayos que dieron resultados válidos se encuentran entre los 180 y los 300  $\mu\text{m}$ , y el resto de las probetas ensayadas superaron los  $6.2 \cdot 10^6$  ciclos.

**Tabla 4.6.6** Resultados obtenidos en el ensayo a flexotracción por las probetas fabricadas con mezcla tipo S-20 reciclada con un 30% de MBR, betún de aportación B-150/200 y un 50% de energía de compactación

Probeta	Amplitud impuesta ( $\mu\text{m}$ )	Def. Unitaria ciclo 200	Módulo Dinámico ciclo 200 (MPa)	Número de ciclos final (N)
5_3_300	300	0,000352273	4216	14000
2_4_300	300	0,000350528	4351	19500
1_3_280	280	0,000360123	4104	39500
3_3_260	260	0,000304297	4124	87000
3_4_240	240	0,000247018	5319	39000
1_4_200	200	0,000221980	5167	131500
4_3_180	180	0,000231510	4133	276000
4_4_180	180	0,000210091	4583	413000
<b>Media</b>			<b>4500</b>	

La tabla 4.6.7 contiene los resultados obtenidos por las probetas de la mezcla reciclada S-20 fabricadas con un 25% de energía de compactación, y como en todos los casos se ensayaron 10 probetas, pero solamente 8 de ellas han obtenido resultados válidos.

Para este caso, las amplitudes de deformación impuestas en los ensayos que dieron resultados válidos se encuentran entre los 180 y los 400  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 4.6.7** Resultados obtenidos en el ensayo a flexotracción por las probetas fabricadas con mezcla tipo S-20 reciclada con un 30% de MBR, betún de aportación B-150/200 y un 25% de energía de compactación

Probeta	Amplitud impuesta ( $\mu\text{m}$ )	Def. Unitaria ciclo 200	Módulo Dinámico ciclo 200 (MPa)	Número de ciclos final (N)
4_5_400	400	0,000474166	3725	6500
3_5_300	300	0,000366262	4103	35000
2_6_280	280	0,000274543	5200	38000
3_6_260	260	0,000254674	5305	42000
4_6_240	240	0,000254674	4821	61000
5_6_200	200	0,000214840	5373	156000
1_5_180	180	0,000219395	4257	250000
1_6_180	180	0,000183147	5549	275500
<b>Media</b>			<b>4792</b>	

En la tabla 4.6.8 se observan los valores obtenidos por las probetas elaboradas con mezcla reciclada tipo G-20, fabricadas con un 100% de energía de compactación, nuevamente se ensayaron 10 probetas, pero en esta ocasión se obtuvieron 9 probetas con resultados válidos.

**Tabla 4.6.8** Resultados obtenidos en el ensayo a flexotracción por las probetas fabricadas con mezcla tipo G-20 reciclada con un 30% de MBR, betún de aportación B-150/200 y un 100% de energía de compactación

Probeta	Amplitud impuesta ( $\mu\text{m}$ )	Def. Unitaria ciclo 200	Módulo Dinámico ciclo 200 (MPa)	Número de ciclos final (N)
2_2_300	300	0,000281941	7106	9000
5_1_280	280	0,000278323	5906	14000
2_1_260	260	0,000311760	4785	33000
5_2_240	240	0,000249990	6210	29500
3_1_220	220	0,000231413	5724	89000
3_2_220	220	0,000215910	6887	66500
1_2_200	200	0,000185409	7016	182000
1_1_180	180	0,000198170	6036	101500
4_2_160	160	0,000155980	7327	327500
<b>Media</b>			<b>6333</b>	

Para estas probetas, las amplitudes de desplazamiento impuestas varían entre los 160 y los 300  $\mu\text{m}$ , con lo cual se observa que las mezclas tipo G-20 admiten valores de desplazamiento menores que las S-20 sin que el número de ciclos necesarios para lograr la falla de la probeta supere los límites del ensayo.

En la tabla 4.6.9 se muestran los resultados obtenidos por las probetas de mezcla reciclada tipo G-20, fabricadas con un 50% de energía de compactación, una vez más se han ensayado 10 probetas, pero en esta ocasión, todos los resultados han sido válidos.

Para esta serie de probetas se ha variado la amplitud de deformación impuesta por la prensa entre los 140 y 260  $\mu\text{m}$  con lo cual hemos conseguido que todos los resultados entren en los límites establecidos por el ensayo.

**Tabla 4.6.9** Resultados obtenidos en el ensayo a flexotracción por las probetas fabricadas con mezcla tipo G-20 reciclada con un 30% de MBR, betún de aportación B-150/200 y un 50% de energía de compactación

Probeta	Amplitud impuesta ( $\mu\text{m}$ )	Def. Unitaria ciclo 200	Módulo Dinámico ciclo 200 (MPa)	Número de ciclos final (N)
2_4_260	260	0,000323620	4332	9500
1_3_260	260	0,000305848	4918	19000
4_4_240	240	0,000277810	4450	17500
5_3_240	240	0,000258583	5103	29000
3_3_220	220	0,000227730	4806	29000
2_3_220	220	0,000201433	6352	60000
3_4_200	200	0,000202530	5648	150000
5_4_160	160	0,000175320	5522	43500
1_4_160	160	0,000158335	6286	272500
4_3_140	140	0,000145251	5944	373000
<b>Media</b>			<b>5336</b>	

En la tabla 4.6.10 se muestran los resultados obtenidos para las probetas de mezcla reciclada tipo G-20, fabricadas con un 25% de energía de compactación, una vez más se han ensayado 10 probetas, pero en esta ocasión, solo 9 resultados han sido válidos.

**Tabla 4.6.10** Resultados obtenidos en el ensayo a flexotracción por las probetas fabricadas con mezcla tipo G-20 reciclada con un 30% de MBR, betún de aportación B-150/200 y un 50% de energía de compactación

Probeta	Amplitud impuesta ( $\mu\text{m}$ )	Def. Unitaria ciclo 200	Módulo Dinámico ciclo 200 (MPa)	Número de ciclos final (N)
4_5_280	280	0,000373401	3778	8000
2_5_260	260	0,000295187	4435	14000
3_6_220	220	0,000204630	6550	68000
2_6_220	220	0,000201760	6163	75500
5_6_200	200	0,000181140	7075	157000
1_6_180	200	0,000205600	5536	22000
1_6_180	180	0,000164873	6813	167500
1_5_160	160	0,000172971	5398	218000
3_5_160	160	0,000160209	6176	315500
<b>Media</b>			<b>5769</b>	

En esta serie de probetas se ha variado la amplitud de deformación impuesta por la prensa entre los 160 y 280  $\mu\text{m}$  en las probetas que han obtenido resultados válidos.

Una vez obtenidos los resultados de las diferentes probetas ensayadas se procede a calcular las diferentes leyes de fatiga con control en desplazamiento empleando los resultados válidos que se han obtenido de las 10 probetas ensayadas para cada mezcla.

Para cada mezcla se consideran los pares de valores formados por la mitad de la amplitud cíclica de la función deformación en el ciclo 200 y el número de ciclos aplicados para llegar a ella ( $N$ ), y se aproximan por mínimos cuadrados a una función del tipo de la fórmula 4.6.8.

$$\varepsilon = a N^b \qquad \text{Fórmula (4.6.8)}$$

Dónde  $\varepsilon$  = La mitad de la amplitud cíclica de la función deformación en el ciclo 200 (adimensional),  $a, b$  = Coeficientes de la ley de fatiga en deformación (adimensionales),  $N$  = Número total de ciclos aplicados.

A continuación se presenta la tabla 4.6.11 en dónde se observan los valores más relevantes que se han obtenido en el ensayo de fatiga en flexotracción dinámica incluyendo las diferentes leyes de fatiga que se han calculado a partir de los valores mencionados en las tablas anteriores.

**Tabla 4.6.11** Resultados medios obtenidos en el ensayo a flexotracción por las mezclas recicladas con un 30% de MBR y por las mezclas de referencia, todas ellas fabricadas con betún de aportación B-150/200

Mezcla	Compactación	Densidades (gr/cm <sup>3</sup> )	Módulo Dinámico (MPa)	ϕ de desfase	Leyes de fatiga	
					$\varepsilon = a \cdot N^b$	Coficiente (R <sup>2</sup> )
S-20	100% patrón	2.479	4415	33.86	$\varepsilon = 0.0023 \cdot N^{0.182}$	0.85
	100%	2.464	5277	32.42	$\varepsilon = 0.0036 \cdot N^{0.232}$	0.97
	50%	2.440	4500	33.39	$\varepsilon = 0.0034 \cdot N^{0.222}$	0.72
	25%	2.427	4792	33.16	$\varepsilon = 0.0035 \cdot N^{0.232}$	0.87
G-20	100% patrón	2.453	4272	36.98	$\varepsilon = 0.0027 \cdot N^{0.209}$	0.84
	100%	2.450	6333	31.40	$\varepsilon = 0.0015 \cdot N^{0.171}$	0.80
	50%	2.417	5336	33.31	$\varepsilon = 0.0020 \cdot N^{0.205}$	0.71
	25%	2.386	5769	34.72	$\varepsilon = 0.0020 \cdot N^{0.201}$	0.86

El módulo dinámico disminuye a lo largo del ensayo, y la normativa no indica en que ciclo se ha de calcular el módulo para comparar las diferentes series de probetas fabricadas, en este caso se ha tomado el valor para el ciclo 200.

Era de esperar que para una misma mezcla, los módulos disminuyeran con el grado de compactación, y en la tabla 4.6.11 se puede observar que las mezclas recicladas con el 100% de energía de compactación tienen módulos más elevados que el resto, sin embargo, aunque se ha disminuido la energía de compactación hasta en un 75% la variación del módulo no es muy grande, esto indica que en los primeros momentos de la compactación se adquiere un porcentaje muy importante de la densidad final de la probeta, por lo que las tres series de cada tipo de mezcla reciclada son muy similares.

Por otra parte, si se comparan los resultados de las mezclas de referencia con los de las recicladas se observa que las recicladas obtienen siempre un módulo más elevado debido a su comportamiento más rígido.

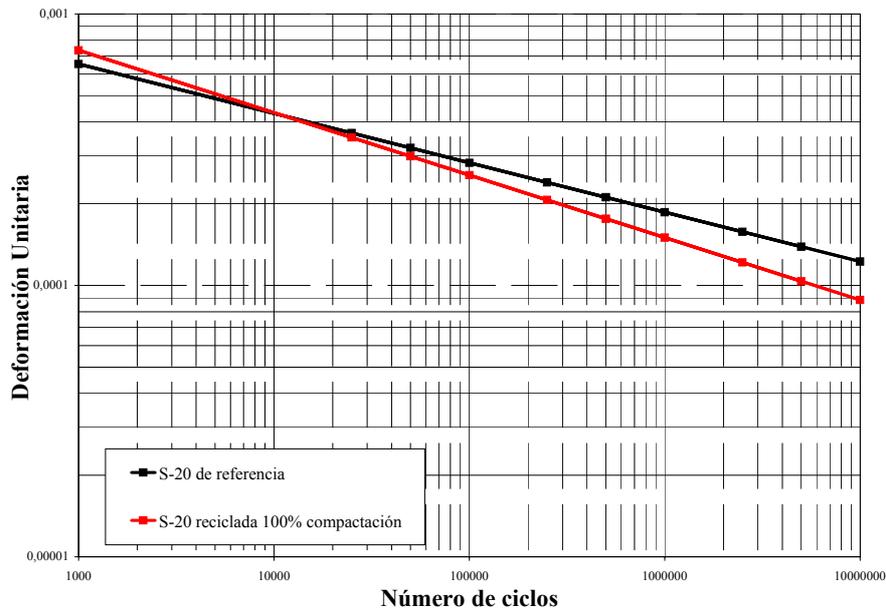
Finalmente, es importante destacar que contrariamente a lo esperado, las mezclas G-20 recicladas logran en general un módulo dinámico superior al de las mezclas S-20 equivalentes. Es muy posible que si el módulo se tomara después de un mayor número de ciclos, esta tendencia se invertiría.

El ángulo de desfase nos da una idea del predominio del carácter elástico o viscoso de la mezcla estudiada, un ángulo  $\phi = 0^\circ$  nos indica que el material es elástico, mientras que un ángulo  $\phi = 90^\circ$  nos dice que el material es viscoso.

En la tabla 4.6.10 se puede observar que para grados de compactación más elevados, predomina un comportamiento ligeramente más elástico en las mezclas, pero las diferencias son muy pequeñas, por otra parte, las mezclas de referencia presentan un comportamiento ligeramente más viscoso que las recicladas, pero los valores son del mismo orden y prácticamente iguales que los de las recicladas.

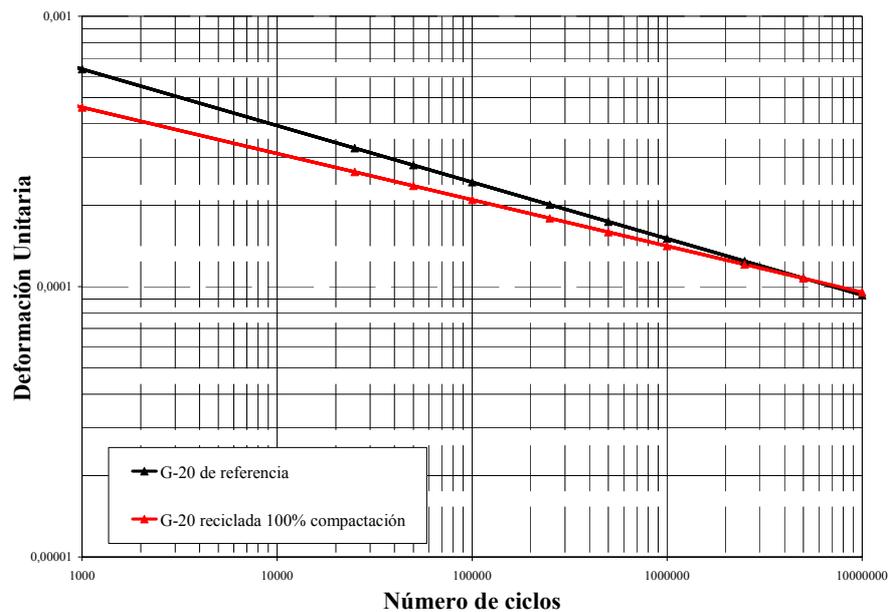
Ahora se graficarán las leyes de fatiga obtenidas para cada tipo de mezcla y grado de compactación utilizado, pero más que una presentación por separado de cada una de ellas, será más ilustrativo compararlas para ver la variación en los comportamientos entre las diferentes leyes.

En primer lugar, compararemos las leyes de fatiga obtenidas por las mezclas de referencia con las leyes de las mezclas recicladas fabricadas con un 100% de energía de compactación, en la figura 4.6.7 tenemos las mezclas tipo S-20 y en la figura 4.6.8 las mezclas tipo G-20.



**Fig. 4.6.7** Leyes de fatiga en el ensayo a flexotracción obtenidas por las mezclas S-20 de referencia y S-20 reciclada con un 30% de MBR, ambas fabricadas con un 100% de energía de compactación

Se puede observar en la gráfica que las leyes de fatiga son muy parecidas en ambos casos, aunque la mezcla reciclada S-20 tiende a fatigarse un poco más rápido que la mezcla convencional equivalente.

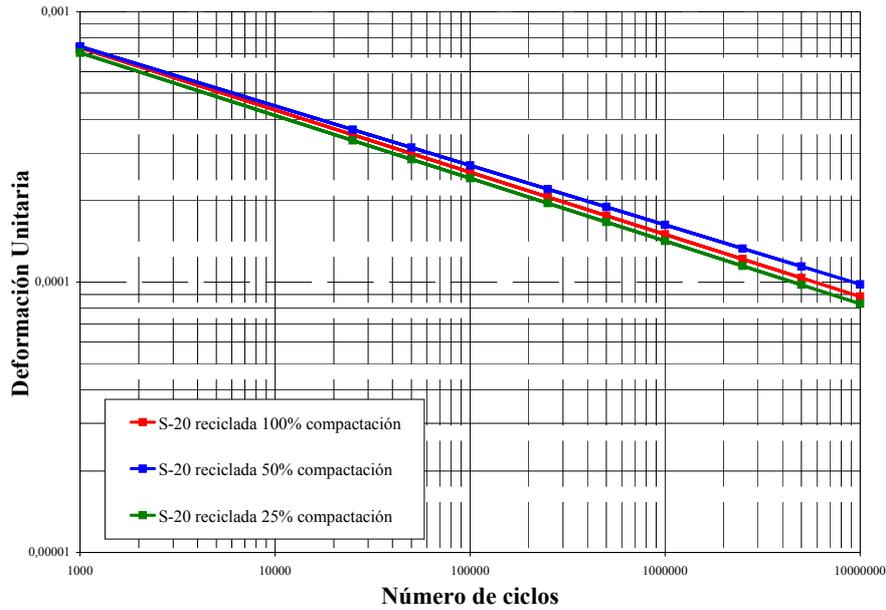


**Fig. 4.6.8** Leyes de fatiga en el ensayo a flexotracción obtenidas por las mezclas G-20 de referencia y G-20 reciclada con un 30% de MBR, ambas fabricadas con un 100% de energía de compactación

Nuevamente se observa que las leyes de fatiga de las mezclas G-20 de referencia y reciclada son similares y aunque en los primeros ciclos se observa que la mezcla de referencia presenta una deformación unitaria mayor que la reciclada cuando se aproxima a los  $1 \times 10^7$  ciclos los valores para ambas leyes son prácticamente iguales.

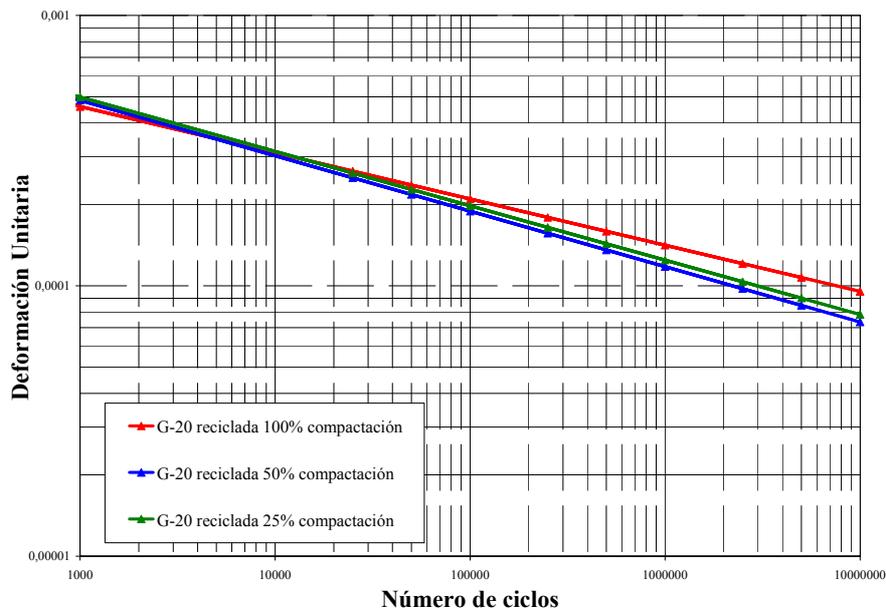
Una vez comparadas las mezclas recicladas con las de referencia y habiendo observado que su comportamiento es muy parecido, procederemos a estudiar la influencia del grado de compactación, en el comportamiento de las leyes de fatiga de cada uno de los tipos de mezcla estudiados.

En la figura 4.6.9 observamos las leyes de fatiga de las mezclas tipo S-20 recicladas con un 30% de MBR y fabricadas con diferentes compactaciones. Como ya se ha mencionado, no se lograron diferencias significativas en las densidades de las probetas fabricadas con diferentes grados de compactación, lo que en consecuencia ha hecho que las leyes de fatiga sean prácticamente iguales.



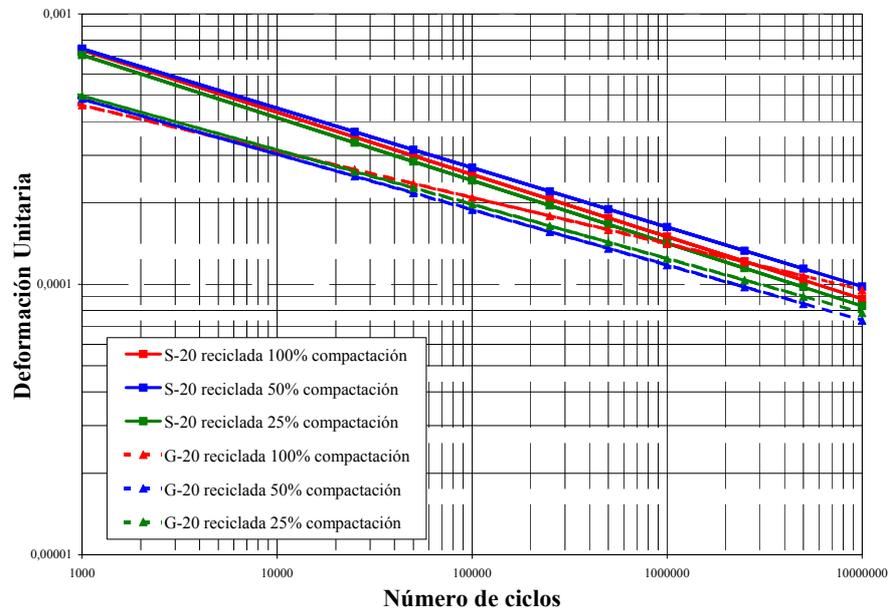
**Fig. 4.6.9** Leyes de fatiga en el ensayo a flexotracción obtenidas por las mezclas S-20 recicladas con un 30% de MBR, y diferentes energías de compactación

En la figura 4.6.10 tenemos las leyes de fatiga de las mezclas G-20 recicladas y una vez más son muy parecidas, pero en este caso, la mezcla fabricada con un 100% de energía de compactación presenta un comportamiento ligeramente mejor que las otras dos.



**Fig. 4.6.10** Leyes de fatiga en el ensayo a flexotracción obtenidas por las mezclas G-20 recicladas con un 30% de MBR, y diferentes energías de compactación

Finalmente se comparará en la figura 4.6.11 el comportamiento a fatiga de los diferentes tipos de mezcla estudiados.



**Fig. 4.6.11** Leyes de fatiga en el ensayo a flexotracción obtenidas por las mezclas S-20 y G-20 recicladas con un 30% de MBR, y fabricadas con diferentes energías de compactación

En este caso la diferencia de comportamiento entre los diferentes tipos de mezcla es más evidente ya que se puede observar que, en general, las leyes de fatiga obtenidas para la mezcla tipo S-20 quedan por encima de las leyes de la mezcla G-20. Esto significa que para una misma deformación impuesta, la mezcla semi densa necesita un mayor número de ciclos de carga para llegar a la rotura.

Sin embargo, este no es el único factor que influye en la vida a fatiga de una capa de un firme asfáltico, hace falta hacer un cálculo tomando en cuenta el mayor número de variables que influyen en la vida a fatiga de los firmes por lo cual, a continuación se realizará un cálculo analítico de la vida a fatiga de diferentes tipos de firmes utilizando los valores obtenidos por las diferentes mezclas estudiadas.

#### **4.6.5. Aplicación de los resultados obtenidos en el ensayo a flexotracción para el cálculo analítico de la vida a fatiga de diferentes secciones estructurales**

En el apartado anterior se han comparado los resultados obtenidos por las mezclas recicladas con los de las mezclas de referencia y también se ha analizado la influencia que tiene el grado de compactación y la granulometría de las mezclas en su comportamiento en el ensayo de flexotracción dinámica.

Se ha observado que los resultados del módulo dinámico y de la ley de fatiga no siempre se corresponden, ya que en la mayoría de los casos las mezclas S-20 presentaron una mejor ley de fatiga que las G-20, sin embargo las mezclas tipo G-20 han obtenido módulos dinámicos superiores que la S-20.

En vista de lo comentado anteriormente y de la necesidad de ampliar el estudio del comportamiento de las mezclas recicladas se decidió utilizar un método analítico para calcular la vida de diferentes tipos de firmes, utilizando los valores obtenidos para las mezclas recicladas y de referencia en el ensayo de flexotracción dinámica.

El dimensionamiento analítico de firmes está basado en el cálculo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos producidos por la acción de las cargas del tráfico y las condiciones climáticas existentes mediante una modelización de su comportamiento.

Los métodos analíticos de dimensionamiento constan de dos partes, un modelo de respuesta con el que se determinan las tensiones, deformaciones y desplazamientos, y un modelo de comportamiento con el que se determinan las condiciones en las que se produce el agotamiento estructural del firme.

El análisis de los resultados del modelo de respuesta, mediante la aplicación de un modelo de comportamiento, nos ayuda a determinar el número de aplicaciones de la carga tipo que la capa de mezcla puede soportar antes de llegar a la rotura.

Los métodos analíticos incorporan resultados empíricos tanto en los modelos en los que están basados como en el análisis de los cálculos, los métodos empíricos ofrecen soluciones que son el resultado de la experiencia, pero a la vez han sido comprobados por métodos analíticos.

En el mercado existen diferentes programas comerciales que nos ayudan al dimensionamiento de firmes flexibles, tal es el caso del CHEVRON™, el VESYS™ (desarrollado en el MIT), el ALIZE™ y el ÉCO-ROUTE™.

La mayoría de los programas de dimensionamiento modelizan hipotéticamente el firme como un conjunto de capas paralelas e indefinidas en el plano con un espesor determinado, apoyadas sobre un semi-espacio elástico infinito en el plano y semi-infinito en profundidad. Cada capa se considerará como un medio elástico, lineal, isótropo y homogéneo que estará representada por un módulo de Young ( $E$ ) y un coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Finalmente se ha decidido utilizar para nuestro trabajo el ÉCO-ROUTE™ como programa de cálculo para realizar el análisis analítico, debido a que es el software con el que se cuenta en esta Universidad.

El programa ÉCO-ROUTE™ utiliza como parámetros de cálculo los siguientes valores:

- Presión de una rueda gemela de 0.662 MPa.
- Área circular equivalente de radio 12.5 cm.
- No se considera adherencia entre capas.

Para obtener los resultados del modelo de respuesta es necesario ingresar una serie de parámetros en el programa que a continuación se mencionan:

- Espesor de cada capa en cm.
- Módulo dinámico de cada capa en cm.
- Coeficiente de Poisson de cada capa.

Uno de los resultados que nos proporciona el programa de cálculo es la deformación horizontal  $EH$  de la capa de mezcla bituminosa, valor que introduciremos en la ley de fatiga que se ha obtenido para cada tipo de mezcla ensayada a flexotracción y con esto se determinará el número de ciclos de carga que puede soportar la capa de mezcla bituminosa antes de llegar a la rotura.

Con el cálculo de la vida a fatiga de un firme, a partir de la ley de fatiga encontrada experimentalmente, y del valor de la deformación horizontal calculado con el ÈCO-ROUTE™ y que es función del módulo dinámico, se podrá observar cual es la mejor configuración de los firmes que estudiaremos.

### Secciones estudiadas

Se ha decidido utilizar cuatro diferentes secciones estructurales para observar como se comportan las mezclas estudiadas bajo diferentes condiciones y así poder comparar el comportamiento de las mezclas recicladas frente a las convencionales y analizar la influencia del grado de compactación de las mezclas recicladas en la vida a fatiga de diferentes tipos de firmes.

En la tabla 4.6.12 se muestran las secciones utilizadas y los espesores de cada una de las capas que los forman.

**Tabla 4.6.12** Espesores de las capas de las diferentes secciones utilizadas

		Secciones			
		021	031	321	331
Espesor de las capas (cm)	Mezcla bituminosa	35	35	18	18
	Zahorra artificial	20	---	25	---

El primer dígito de la nomenclatura de las secciones del firme indica la categoría del tráfico pesado, el segundo dígito indica la categoría de la explanada y el tercer dígito indica los materiales usados en las capas del firme, en la tabla 4.6.13 se detallan las diferentes categorías.

**Tabla 4.6.13** Diferentes categorías que definen las secciones de firmes en el catálogo de secciones de firmes (MOPU 1990)

Categoría de tráfico pesado	IMD <sub>p</sub>	Categoría de explanadas	CBR
T0	IMD <sub>p</sub> ≥ 2000	E1	5 ≤ CBR < 10
T1	2000 > IMD <sub>p</sub> ≥ 800	E2	10 ≤ CBR < 20
T2	800 > IMD <sub>p</sub> ≥ 200	E3	CBR ≥ 20
T3	200 > IMD <sub>p</sub> ≥ 50		
T4	IMD <sub>p</sub> < 50		

Último número de la sección	Materiales de las diferentes capas de la sección
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mezclas Bituminosas</li> <li>• Capas granulares</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor espesor de las capas de mezcla bituminosa</li> <li>• Mayor espesor de las capas granulares</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de suelo-cemento debajo de mezclas bituminosas</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pavimento de mezcla bituminosa</li> <li>• Base de grava-cemento</li> <li>• Sub-base de suelo-cemento</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hormigón compactado</li> <li>• Pavimento de mezcla bituminosa de espesor reducido</li> </ul>
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pavimento de hormigón vibrado</li> </ul>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pavimento de hormigón vibrado</li> </ul>

Para esta parte del trabajo se fabricaron 8 series diferentes de probetas (tabla 4.6.14) para ensayar a flexotracción dinámica cuyos resultados se utilizarán para el cálculo analítico mediante el ÉCO-ROUTE™, por lo tanto tendremos un total de 32 secciones diferentes para analizar.

**Tabla 4.6.14** Características de las diferentes series ensayadas a flexotracción dinámica

Serie	Tipo de mezcla	Betún de aportación	Porcentaje betún total	Porcentaje de MBR	Temperatura de ensayo	Grado de compactación
1	S-20	B-60/70	4.5	0	20°C	100
2		B-150/200		30		100
3		B-150/200		30		50
4		B-150/200		30		25
5	G-20	B-60/70	4.0	0		100
6		B-150/200		30		100
7		B-150/200		30		50
8		B-150/200		30		25

Otro de los valores que debemos introducir en el programa es el módulo de cada una de las capas que forman parte del firme que se va a analizar, los valores del módulo para las mezclas bituminosas son los que se han encontrado experimentalmente en el ensayo de flexotracción dinámica.

En el caso de la explanada existe una relación entre el CBR y el módulo de elasticidad  $E$  cuando se considera como un macizo semi-infinito elástico, isótropo y homogéneo, que para el caso de cargas dinámicas vale:

$$E(\text{MPa}) = 10 \text{ CBR} \quad \text{Fórmula (4.6.9)}$$

Para los casos que estudiaremos, se han tomado los valores de CBR más bajos que se tienen para cada categoría de explanada y de esta manera nos colocamos del lado de la seguridad.

En el caso de la zahorra artificial, para encontrar el módulo se define un factor por el que se ha de multiplicar el módulo de la explanada y este factor depende del tipo de explanada considerada, en la tabla 4.6.15 se muestran los módulos de las explanadas y de la zahorra artificial.

**Tabla 4.6.15** Módulos de los diferentes tipos de explanadas y de las capas de zahorra artificial

Explanada	Módulo de la explanada (MPa)	Módulo de la zahorra (MPa)
E1	50	$3 \times M(E1) = 150$
E2	100	$2.5 \times M(E2) = 250$
E3	200	$2 \times M(E3) = 400$

Otro valor importante que se debe introducir en el ÉCO-ROUTE™ es el coeficiente de Poisson de cada uno de los tipos de capa que contienen los diferentes firmes analizados, en la tabla 4.6.16 se mencionan dichos coeficientes.

**Tabla 4.6.16** Coeficiente de Poisson para los diferentes materiales empleados en las capas de los firmes estudiados

Material	Coeficiente de Poisson
Mezcla bituminosa	0.35
Zahorra artificial	0.30
Explanada	0.40

Una vez que se han definido todos los valores que serán introducidos en el programa ÉCO-ROUTE™ se presenta la tabla 4.6.17 en la que se detallan los valores que serán utilizados para el análisis de cada uno de los diferentes casos definidos para este trabajo de investigación.

En la misma tabla se mencionan los valores de deformación obtenidos por el programa con los que más adelante se calculará la vida a fatiga de cada uno de los casos estudiados utilizando las leyes de fatiga que se han encontrado mediante el ensayo de flexotracción dinámica.

**Tabla 4.6.17** Datos que se ingresan en el programa ÈCO-ROUTE™ para el cálculo de las diferentes secciones y deformaciones obtenidas para una carga tipo

Sección	Serie	Espesor de las capa		Módulo (MPa)			Coeficiente de Poisson			Deformación <i>EH</i> (Èco Route)
		Mezcla bituminosa	Zahorra	Mezcla bituminosa	Zahorra	Exp.	Mezcla bituminosa	Zahorra	Exp.	
021	1	35 cm	20 cm	4415	250	100	0.3	0.35	0.4	$-9.35 \cdot 10^{-5}$
	2			5277						$-8.07 \cdot 10^{-5}$
	3			4500						$-9.17 \cdot 10^{-5}$
	4			4792						$-8.72 \cdot 10^{-5}$
	5			4272						$-9.33 \cdot 10^{-5}$
	6			6333						$-6.96 \cdot 10^{-5}$
	7			5336						$-8.00 \cdot 10^{-5}$
	8			5769						$-7.51 \cdot 10^{-5}$
031	1	35 cm	-	4415	---	200	0.3	0.35	0.4	$-8.08 \cdot 10^{-5}$
	2			5277						$-6.98 \cdot 10^{-5}$
	3			4500						$-7.92 \cdot 10^{-5}$
	4			4792						$-7.53 \cdot 10^{-5}$
	5			4272						$-8.06 \cdot 10^{-5}$
	6			6333						$-6.04 \cdot 10^{-5}$
	7			5336						$-6.92 \cdot 10^{-5}$
	8			5769						$-6.51 \cdot 10^{-5}$
321	1	18 cm	25 cm	4415	250	100	0.3	0.35	0.4	$-2.30 \cdot 10^{-4}$
	2			5277						$-2.01 \cdot 10^{-4}$
	3			4500						$-2.25 \cdot 10^{-4}$
	4			4792						$-2.16 \cdot 10^{-4}$
	5			4272						$-2.30 \cdot 10^{-4}$
	6			6333						$-1.76 \cdot 10^{-4}$
	7			5336						$-1.99 \cdot 10^{-4}$
	8			5769						$-1.88 \cdot 10^{-4}$
331	1	18 cm	-	4415	---	200	0.3	0.35	0.4	$-1.94 \cdot 10^{-4}$
	2			5277						$-1.70 \cdot 10^{-4}$
	3			4500						$-1.90 \cdot 10^{-4}$
	4			4792						$-1.82 \cdot 10^{-4}$
	5			4272						$-1.93 \cdot 10^{-4}$
	6			6333						$-1.49 \cdot 10^{-4}$
	7			5336						$-1.68 \cdot 10^{-4}$
	8			5769						$-1.59 \cdot 10^{-4}$

El siguiente paso será colocar la deformación horizontal *EH* que ha calculado el programa ÈCO-ROUTE™ a partir de los módulos de las diferentes capas, del coeficiente de poisson y de las características geométricas de cada sección, dentro de las leyes de fatiga encontradas para cada tipo de mezcla y de esta manera obtener el número de repeticiones de carga *N* necesario para lograr la falla por fatiga de las mezclas bituminosas en las diferentes configuraciones estudiadas, en la tabla 4.6.18 se observan los valores obtenidos para cada tipo de mezcla y sección utilizados.

**Tabla 4.6.18** Cálculo del número de ciclos  $N$  que soportan las mezclas antes de la rotura mediante las deformaciones dadas por el ÉCO-ROUTE™ y las leyes de fatiga del ensayo a flexotracción

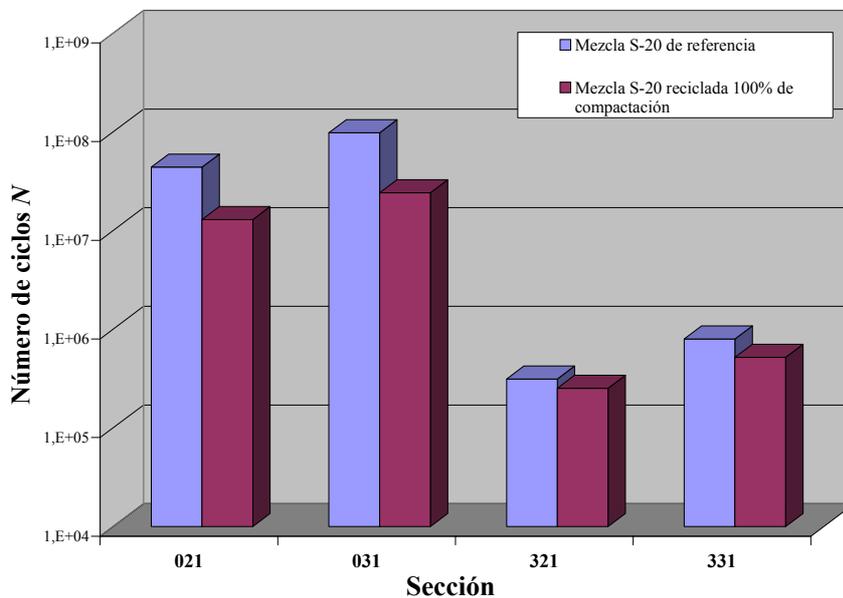
Sección	Serie	Tipo de Mezcla	Grado de compactación	Deformación $EH$	Ley de fatiga	Numero de ciclos ( $N$ )
021	1	S-20	100%	$-9.35 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.36 - 0.182 \cdot \log N$	$4.39 \cdot 10^7$
	2		100%	$-8.07 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.56 - 0.232 \cdot \log N$	$1.29 \cdot 10^7$
	3		50%	$-9.17 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.53 - 0.222 \cdot \log N$	$1.17 \cdot 10^7$
	4		25%	$-8.72 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.54 - 0.232 \cdot \log N$	$8.16 \cdot 10^6$
	5	G-20	100%	$-9.33 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.43 - 0.209 \cdot \log N$	$9.83 \cdot 10^6$
	6		100%	$-6.96 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.18 - 0.171 \cdot \log N$	$6.28 \cdot 10^7$
	7		50%	$-8.00 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.30 - 0.205 \cdot \log N$	$6.60 \cdot 10^6$
	8		25%	$-7.51 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.30 - 0.201 \cdot \log N$	$1.23 \cdot 10^7$
031	1	S-20	100%	$-8.08 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.36 - 0.182 \cdot \log N$	$9.79 \cdot 10^7$
	2		100%	$-6.98 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.56 - 0.232 \cdot \log N$	$2.41 \cdot 10^7$
	3		50%	$-7.92 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.53 - 0.222 \cdot \log N$	$2.26 \cdot 10^8$
	4		25%	$-7.53 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.54 - 0.232 \cdot \log N$	$1.54 \cdot 10^7$
	5	G-20	100%	$-8.06 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.43 - 0.209 \cdot \log N$	$1.98 \cdot 10^7$
	6		100%	$-6.04 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.18 - 0.171 \cdot \log N$	$1.44 \cdot 10^8$
	7		50%	$-6.92 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.30 - 0.205 \cdot \log N$	$1.34 \cdot 10^7$
	8		25%	$-6.51 \cdot 10^{-5}$	$\log \varepsilon = 3.30 - 0.201 \cdot \log N$	$2.51 \cdot 10^7$
321	1	S-20	100%	$-2.30 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.36 - 0.182 \cdot \log N$	$3.12 \cdot 10^5$
	2		100%	$-2.01 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.56 - 0.232 \cdot \log N$	$2.52 \cdot 10^5$
	3		50%	$-2.25 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.53 - 0.222 \cdot \log N$	$2.05 \cdot 10^5$
	4		25%	$-2.16 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.54 - 0.232 \cdot \log N$	$1.64 \cdot 10^5$
	5	G-20	100%	$-2.30 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.43 - 0.209 \cdot \log N$	$1.31 \cdot 10^5$
	6		100%	$-1.76 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.18 - 0.171 \cdot \log N$	$2.77 \cdot 10^5$
	7		50%	$-1.99 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.30 - 0.205 \cdot \log N$	$7.74 \cdot 10^4$
	8		25%	$-1.88 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.30 - 0.201 \cdot \log N$	$1.28 \cdot 10^5$
331	1	S-20	100%	$-1.94 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.36 - 0.182 \cdot \log N$	$7.96 \cdot 10^5$
	2		100%	$-1.70 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.56 - 0.232 \cdot \log N$	$5.19 \cdot 10^5$
	3		50%	$-1.90 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.53 - 0.222 \cdot \log N$	$4.39 \cdot 10^5$
	4		25%	$-1.82 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.54 - 0.232 \cdot \log N$	$3.42 \cdot 10^5$
	5	G-20	100%	$-1.93 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.43 - 0.209 \cdot \log N$	$3.04 \cdot 10^5$
	6		100%	$-1.49 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.18 - 0.171 \cdot \log N$	$7.33 \cdot 10^5$
	7		50%	$-1.68 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.30 - 0.205 \cdot \log N$	$1.77 \cdot 10^5$
	8		25%	$-1.59 \cdot 10^{-4}$	$\log \varepsilon = 3.30 - 0.201 \cdot \log N$	$2.96 \cdot 10^5$

Una vez que se cuenta con el número de ciclos  $N$  necesario para llegar a la falla de cada una de las diferentes secciones y tipos de mezcla estudiados se hará la comparativa de los resultados, en primer lugar se presenta la tabla 4.6.19 en la que se pueden comparar numéricamente los resultados.

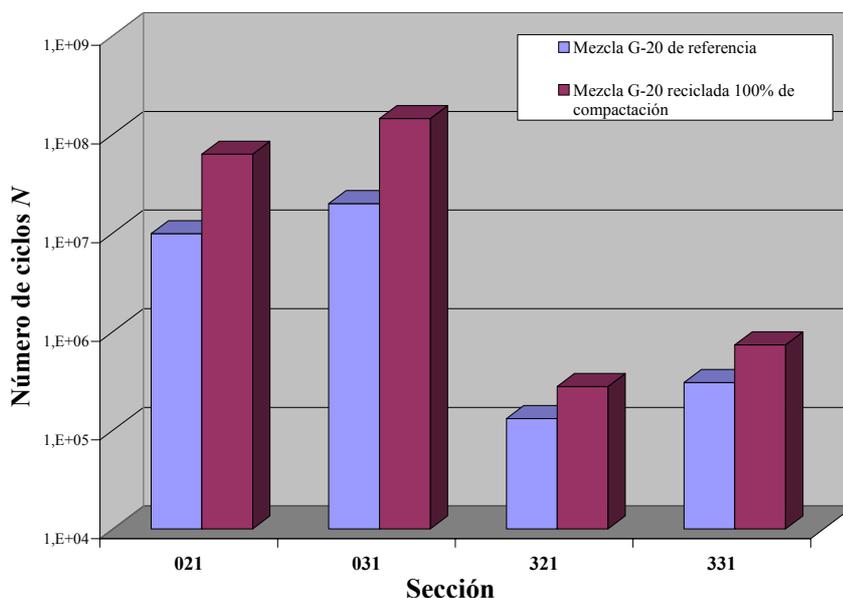
**Tabla 4.6.19** Comparativa entre el número de ciclos  $N$  necesario para llegar a la fatiga de las diferentes secciones y mezclas estudiadas

Sección	Mezclas S-20				Mezclas G-20			
	Referencia	Recicladas			Referencia	Recicladas		
	100% comp.	100% comp.	50% comp.	25% comp.	100% comp.	100% comp.	50% comp.	25% comp.
021	4,39E+07	1,29E+07	1,17E+07	8,16E+06	9,83E+06	6,28E+07	6,60E+06	1,23E+07
031	9,79E+07	2,41E+07	2,26E+07	1,54E+07	1,98E+07	1,44E+08	1,34E+07	2,51E+07
321	3,12E+05	2,52E+05	2,05E+05	1,64E+05	1,31E+05	2,77E+05	7,74E+04	1,28E+05
331	7,96E+05	5,19E+05	4,39E+05	3,42E+05	3,04E+05	7,33E+05	1,77E+05	2,96E+05

En los ensayos a fatiga en flexotracción dinámica se había observado que las mezclas recicladas obtenían un módulo más elevado que las mezclas convencionales, sin embargo, las leyes de fatiga eran más desfavorables para las mezclas recicladas, lo que nos llevó a comparar el comportamiento a fatiga de diferentes secciones que incluyeran las diferentes mezclas estudiadas, en las figuras 4.6.12 y 4.6.13 se observa el número de ciclos necesarios para llegar a la rotura de las diferentes secciones estudiadas.



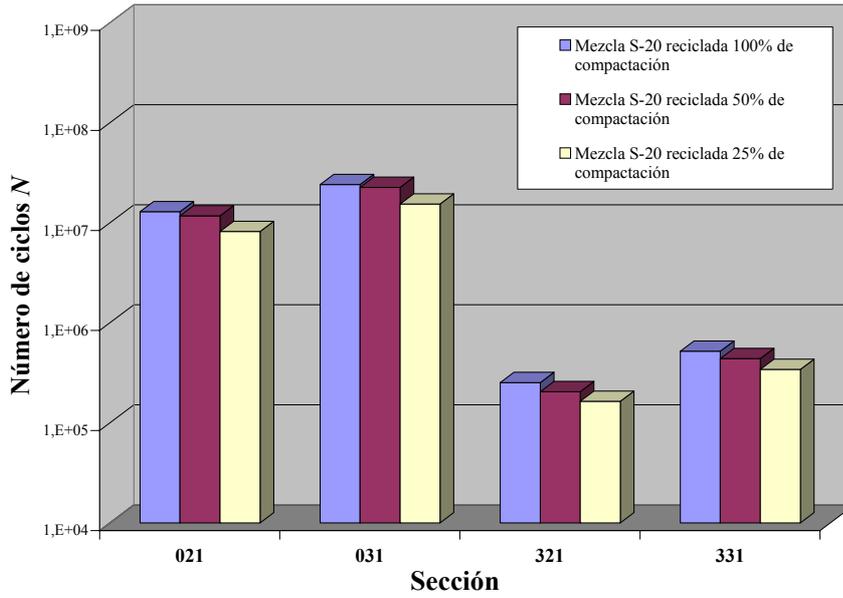
**Fig. 4.6.12** Comparativa del número de ciclos  $N$  necesarios para llegar a la rotura por fatiga de las capas bituminosas de diferentes secciones fabricadas con mezclas S-20 recicladas y convencionales



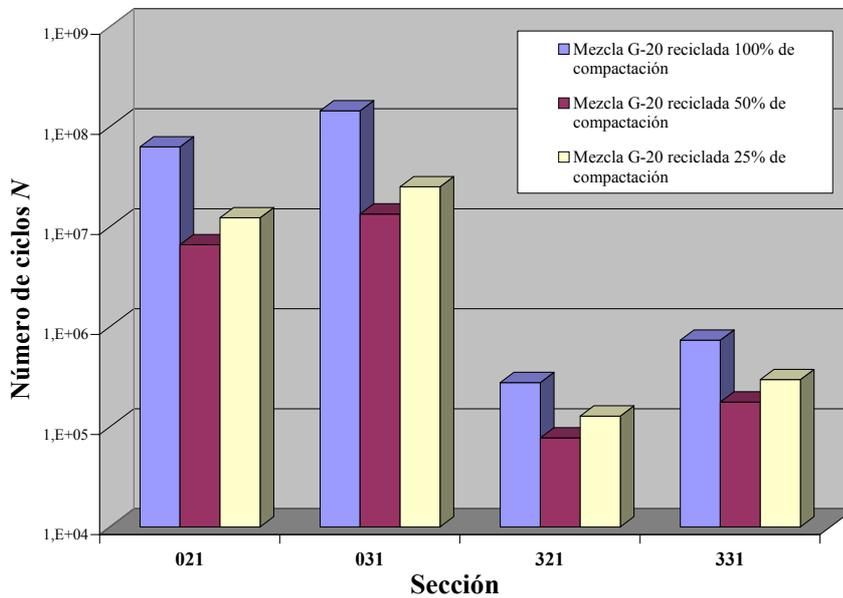
**Fig. 4.6.13** Comparativa del número de ciclos  $N$  necesarios para llegar a la rotura por fatiga de las capas bituminosas de diferentes secciones fabricadas con mezclas G-20 recicladas y convencionales

La vida a fatiga no presenta el mismo comportamiento para los dos diferentes tipos de mezclas estudiadas, en el caso de las mezclas tipo S-20 las convencionales presentan una vida a fatiga mayor que las recicladas, pero las G-20 se comportan al contrario.

La variación del comportamiento para los diferentes tipos de mezcla pueden deberse a que las mezclas de referencia presentaron unos módulos dinámicos muy bajos en el ensayo de flexotracción, sobre todo en el caso de las mezclas tipo G-20, lo que hace que la vida a fatiga de las mezclas convencionales se vea afectada negativamente, además, como ya se ha comentado anteriormente, las mezclas fabricadas con diferentes energías de compactación han presentado un comportamiento muy parecido, debido a que el proceso de compactación utilizado para la fabricación de las probetas no nos permitió conseguir una diferencia significativa en las densidades de las mezclas fabricadas con diferentes grados de compactación, en las figuras 4.6.14 y 4.6.15 se presenta el comportamiento de las diferentes secciones estudiadas que incorporan las mezclas recicladas fabricadas para este trabajo.



**Fig. 4.6.14** Comparativa del número de ciclos  $N$  necesarios para llegar a la rotura por fatiga de las capas bituminosas de diferentes secciones fabricadas con mezclas recicladas tipo S-20 fabricadas con diferentes grados de compactación



**Fig. 4.6.15** Comparativa del número de ciclos  $N$  necesarios para llegar a la rotura por fatiga de las capas bituminosas de diferentes secciones fabricadas con mezclas recicladas tipo G-20 fabricadas con diferentes grados de compactación

A pesar de que no se tienen grandes diferencias en los resultados, se observa claramente que las mezclas recicladas fabricadas con el 100% de la energía de compactación estipulada en la norma *NLT-173* presentan en todos los casos una mayor vida a fatiga que las mezclas fabricadas con un porcentaje menor de energía de compactación.

En el caso de las mezclas tipo G-20 las probetas fabricadas con un 25% de energía de compactación presentan una vida a fatiga mayor que aquellas fabricadas con el 50%, pero se debe a que estas dos mezclas no presentaban prácticamente diferencias entre sí y era de esperarse que los resultados posteriores fueran muy similares, de cualquier forma, lo importante es que se puede observar que la vida a fatiga de las mezclas recicladas se ve reducida si no se logra compactar adecuadamente las mezclas.

Contrariamente a lo esperado, en las gráficas presentadas anteriormente se observa que las mezclas tipo G-20 han obtenido una mayor vida a fatiga que las mezclas tipo S-20, de lo cual se concluye que el módulo dinámico de las mezclas ha sido el factor que ha tenido más influencia sobre el comportamiento de la vida a fatiga.

Esta claro que los módulos han afectado de gran manera los resultados de la vida a fatiga de las diferentes mezclas, por lo cual sería interesante utilizar el módulo de las mezclas después de haber soportado un mayor número de ciclos, ya que las mezclas tipo G-20 han dado unos módulos muy elevados en el ciclo 200.

Por otra parte, se observa en todos los casos estudiados, que las secciones de firme diseñadas para categorías de tráfico T0 soportan un mayor número de ciclos de carga que las diseñadas para un tráfico T3, esto es lógico ya que los espesores de las capas son superiores.

Por último se observa que las secciones formadas por capas de mezcla bituminosa apoyada directamente sobre una explanada E3 han soportado un mayor número de ciclos que aquellas formadas por la misma capa de mezcla bituminosa apoyada sobre una capa de zahorra artificial sobre una explanada de tipo E2.