

Utilización de residuos de construcción y demolición en mezclas bituminosas en caliente

Javier Taibo Pose

Alumno de 5º curso de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Universidade da Coruña

ETSICCP, Campus de Elviña, s/n

CIF. Q6550005J

15071 A Coruña, A Coruña

981-167000/981-167170

Ignacio Pérez Pérez

Profesor Titular

Universidade da Coruña

ETSICCP, Campus de Elviña, s/n

CIF. Q6550005J

15071 A Coruña, A Coruña

* Persona de contacto

981-167000; EXT: 1451/981-167170/iperez@udc.es

Mar Toledano Prados

Profesora Titular

Universidade da Coruña

ETSICCP, Campus de Elviña, s/n/mtoledano@udc.es

CIF. Q6550005J

15071 A Coruña, A Coruña

981-167000/981-167170

Utilización de residuos de construcción y demolición en mezclas bituminosas en caliente

Javier Taibo Pose

Alumno de 5º curso de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Universidade da Coruña

Ignacio Pérez Pérez

Profesor Titular

Universidade da Coruña

Mar Toledano Prados

Profesora Titular

Universidade da Coruña

1. Introducción

En España se producen 13 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (**RCD**) al año, de las que se reutilizan o reciclan una cantidad inferior al 5% del total; mientras que en la Unión Europea se recicla o reutiliza, como media, un 28 % de los **RCD**. La mayor parte de estos residuos son depositados en vertederos, produciendo un impacto ecológico negativo. Por esta razón, en el año 1991, se aprobó el **Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición** [1] estableciendo como uno de sus objetivos el reciclaje del 60% de los **RCD** en el año 2006. Por otra parte, dado que la carretera es una gran consumidora de áridos, parece posible el uso de los **RCD** como material para la construcción de firmes. Sin embargo, no se conocen experiencias técnicas sobre el empleo de estos residuos en mezclas bituminosas, habiendo más información sobre su utilización como materiales granulares sin ningún tipo de tratamiento y como materiales tratados con conglomerantes hidráulicos [2, 3, 4, 5, 6]. Una excepción a lo dicho anteriormente es el trabajo realizado por Shen y Du [7], en el que evaluaron el comportamiento a la deformación permanente de mezclas bituminosas en caliente (**MBC**) fabricadas con **RCD** provenientes de Taichung (Taiwán). En general, obtuvieron unos valores adecuados de los parámetros Marshall. Posteriormente, mediante la pista de laboratorio realizaron los ensayos de la deformación permanente. Del análisis de los resultados concluyeron que, desde el punto de vista de la deformación permanente, las mezclas fabricadas con áridos reciclados (**AR**) se comportaban mejor que las mezclas fabricadas solamente con áridos naturales (**AN**). Estos investigadores no realizaron sobre las **MBC** otros tipos de ensayos como, por ejemplo, ensayos para determinar el módulo dinámico y la resistencia a la fatiga.

Por todo lo dicho anteriormente, el objetivo de esta investigación es evaluar la posibilidad de utilización de estos áridos reciclados de **RCD** en **MBC** de la norma de firmes de carreteras de España [8]. Para ello, se dosificarán mediante el método Marshall. Además del comportamiento a la deformación permanente se evaluará la rigidez y la resistencia a fatiga de las mezclas. También, se tendrá en cuenta el efecto del agua sobre la resistencia de las **MBC**.

2. Caracterización de los materiales básicos y ensayos mecánicos

Las dosificaciones de las mezclas se hicieron de acuerdo al **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes**, también denominado **PG-3** [9]. En concreto, se eligió la **G-20** (gruesa) como capa de base; mientras que como capa intermedia se eligió la mezcla **S-20**. En la tabla 1 se presentan los husos granulométricos especificados en el **PG-3** para estas **MBC**, así como las granulometrías elegidas.

2.1. Caracterización de los materiales básicos

Para caracterizar los materiales básicos se utilizaron las normas técnicas españolas **NLT** [10] (**Ensayos de Carreteras**) del **Centro de Estudio de Carreteras** y las normas **UNE-EN** [11] de la **Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR)**. En la tabla 2 están reflejados los resultados de los ensayos de caracterización de estos materiales.

Áridos naturales.

Como se observa en la tabla 2, se caracterizaron los áridos de las granulometrías de las mezclas **S-20-3** y **G-20-2**, ambas con 100% de **AN**. Estos áridos fueron proporcionados por una cantera en fracciones 0/6, 6/12 y 12/25. Sus componentes principales son cuarzo (35 %), feldespato sódico (30 %), mica incolora o moscovita (20 %) y clorita (15 %). Como se observa en la tabla 2, cumple las especificaciones del **PG-3**, ya que todas sus caras son de fractura; presenta un índice de lajas en todas las fracciones ensayadas del árido grueso $\leq 20\%$; el coeficiente de Los Ángeles está comprendido entre 19.4 y 22.1%; el equivalente de arena es mayor del 50%. La densidad de los áridos en aceite de parafina de la mezcla es 2.69 g/cm^3 .

Áridos reciclados.

Los áridos reciclados de **RCD** tienen la granulometría requerida para rellenos en la fracción 0/40. Su composición en peso es la siguiente: hormigón (72%); Piedra (20%); Cerámico (2%) y betún (6%). Por las razones que se explicarán más adelante, se caracterizaron las granulometrías correspondientes a las mezclas **S-20-1**, **S-20-2** y **G-20-1**. En la primera de ellas se utilizaron solamente áridos reciclados; mientras que en las dos siguientes se emplearon un 50% de áridos reciclados y un 50% de áridos naturales en todas sus fracciones. En la tabla 2 puede observarse que todas sus caras son de fractura, los valores de los índices de lajas y del equivalente de arena cumplen los

requisitos del **PG-3**. Sin embargo, el valor del coeficiente de Los Ángeles no cumple los requisitos establecidos en el **PG-3**. Por otra parte, el coeficiente de absorción de los áridos reciclados es muy superior al de los áridos naturales. La densidad de los áridos en aceite de parafina de la mezcla **S-20-1** es de 2.58 g/cm^3 ; mientras que las mezclas **S-20-2** y **G-20-1** tuvieron una densidad de 2.64 g/cm^3 .

El filler utilizado en los dos tipos de mezclas fue el proveniente del proceso de trituración del árido natural. Esto se hizo así procurando que tanto el mástico de las mezclas elaboradas con áridos naturales como el de las elaboradas con áridos reciclados se comportaran de igual manera.

Betún.

Se eligió un betún de penetración 60/70, con un valor del punto de reblandecimiento de anillo y bola igual a 48.5. El índice de penetración Pleiffer es igual a -0.8. La densidad es de 1.03 g/cm^3 . Se comprobó que el betún cumple todas las especificaciones del **PG-3**.

2.2. Ensayos mecánicos

Marshall (NLT-159). Se compactaron cinco series de probetas fabricadas con distintos porcentajes de betún sobre peso de árido, calculándose la media de los siguientes parámetros: Huecos en áridos, **Ha (%)**; Huecos en mezcla, **Hm (%)**; Densidad aparente, **Da (g/cm^3)**; Deformación, **D (mm)** y Estabilidad, **E (kN)**. Las probetas fabricadas en el resto de los ensayos se dosificaron con el porcentaje de betún óptimo obtenido en este ensayo.

Pista en laboratorio (NLT-173). Se fabricaron tres probetas prismáticas de dimensiones $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}$. El ensayo consiste en someter una probeta al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. La media de la velocidad de deformación (**VD**) se midió en el intervalo que va de los 105 a los 120 minutos desde el comienzo. Este ensayo solamente es obligatorio en capas de rodadura o intermedias (tabla 3).

Inmersión-compresión (NLT-161 y NLT-162). Se fabricaron 10 probetas cilíndricas de dimensiones: 101.6 mm de diámetro por 101.6 mm de alto. Cinco probetas se sumergieron en un baño de agua a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas y cinco no. Posteriormente, se sometieron a compresión simple y se determinó la media de la tensión máxima alcanzada en cada grupo. El Índice de Resistencia Conservada **IC (%)** se calcula dividiendo la resistencia del grupo que estuvo inmerso a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ entre la resistencia del grupo que no estuvo. Según, el **PG-3** el valor del **IC** en mezclas **S-20** y **G-20** debe ser superior al 75% (tabla 3).

Fatiga a flexotracción dinámica (NLT-350). Se fabricaron diez probetas prismáticas de dimensiones $300 \times 50 \times 50 \text{ mm}$., y se ensayaron en flexotracción dinámica en una prensa

servohidráulica en control de desplazamiento a una frecuencia de 10 Hz. Los valores de deformación se midieron mediante un extensómetro dinámico colocado en la parte inferior de la probeta que es donde se soportan las mayores tensiones de tracción. A partir de estos ensayos se determinó para cada mezcla el módulo dinámico, el ángulo de desfase y la ley de fatiga.

El módulo dinámico (**MD**) es una medida de la rigidez de la mezcla y se calcula como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión (T_c) y la amplitud cíclica de la función deformación (ϵ_c) en el ciclo 200. Su expresión es la siguiente: $MD = T_c / \epsilon_c$.

Por otro lado, el ángulo de desfase (ϕ) da una idea del predominio del carácter elástico o viscoso de la mezcla estudiada, un ángulo de $\phi = 0^\circ$ indicaría que el material es elástico, mientras que un ángulo de $\phi = 90^\circ$ indicaría que el material es viscoso. Se calcula mediante la expresión siguiente: $\phi = (B_t - B_\epsilon) 180 / \pi$; donde B_t y B_ϵ son los ángulos de fase de las funciones tensión y deformación.

Mediante la ley de fatiga se cuantifica el agotamiento del material por el daño acumulado ante la presencia de sollicitaciones cíclicas y, que se manifiesta en la fisuración del mismo. La ley de fatiga relaciona el número de ciclos de carga hasta la fatiga del material (**N**), con el nivel de deformación (ϵ) producida por la sollicitación cíclica. ϵ y **N** están ligados por la expresión: $\epsilon = kN^B$; donde **k** y **B** son constantes que describen el comportamiento a fatiga de la mezcla.

3. Resultados

3.1. Marshall

Los resultados obtenidos con el método Marshall evidenciaron la imposibilidad de utilizar únicamente árido reciclado en mezcla. En este sentido, se observó que la mezcla **S-20-1** tenía poca cohesión, el árido más grueso no se encontraba correctamente envuelto por el betún y, el conjunto tenía un aspecto terroso. Las probetas que contenían menores cantidades de betún acababan por disgregarse. Esto se debió a que, dada la excesiva porosidad del árido, al aumentar la superficie específica del mismo, se requieren mayores cantidades de betún para conseguir la suficiente cohesión y huecos en mezcla. La curva de huecos en áridos era cóncava, con un valor del 24.5% para un 5.91 % de betún. El valor de **Hm** era del 11.7 (%), por tanto, no se cumplió el criterio de huecos en mezcla (tabla 3). Los valores de **E** (14.6 kN) y **D** (2.8 mm) eran elevados cumpliéndose los criterios de la tabla 3. La densidad aparente **Da** (2.09 g/cm³) es muy baja para los valores habituales de este tipo de mezcla bituminosa.

Del análisis de los resultados se optó por dosificar las mezclas con **AR** utilizando solamente un 50 % de árido reciclado en cada tamaño (exceptuando el filler). En las mezclas con **AN** se eligió la cantidad de filler en función de la relación ponderal filler-

betún recomendada en el **PG-3**; mientras que en las mezclas con **AR** se tuvo que elevar la cantidad de filler hasta casi el límite superior del huso.

Se seleccionaron los % de **Bo** para cada tipo de mezcla, que cumpliera los requisitos del **PG-3** para las diferentes categorías de tráfico (tabla 3). En la mezcla **S-20-2** el % de **Bo** es igual a 5.91, confirmándose todos los requisitos desde **T1** hasta **T4**. En la mezcla **S-20-3** el % de **Bo** adoptado es igual a 5. Con esta dosificación cumple para las categorías de tráfico **T3** y **T4**. En la mezcla **G-20-1** el % de **Bo** es igual a 4.75%; aquí el comportamiento es peor, ya que solamente se cumplen todos los requisitos de la categoría **T4**. Finalmente, para la mezcla **G-20-2** el % de **Bo** adoptado es igual a 4.25, por tanto, se verifican todos los requisitos de los **T3** y **T4**. Los resultados de los parámetros del ensayo Marshall para las dosificaciones seleccionadas se incluyen en la tabla 4.

3.2. Deformación permanente

Los resultados de la media de las **VD** de las probetas de las mezclas **S-20** se presentan en la tabla 4. En la mezcla **S-20-3**, la velocidad **VD** es igual a 19.29 $\mu\text{m}/\text{min.}$; y en la mezcla **S-20-2** es igual a 15.07 $\mu\text{m}/\text{min.}$ Ambas cumplen el límite de 20 $\mu\text{m}/\text{min.}$, (tabla 3). Las mezclas **G-20** no fueron ensayadas por que no es preceptivo. En la figura 1 se representan las curvas deformación- tiempo. Obsérvese que la mezcla **S-20-3** presenta una elevada deformación al principio del ensayo, pero a medida que éste discurre se va estabilizando, para incrementarse ligeramente hacia el final. En cambio, en la mezcla **S-20-2**, al principio del ensayo la deformación es menos elevada que en el caso anterior. En la mezcla **S-20-3** la estabilización de **VD** se produce antes que en la **S-20-2**. Hacia el final del ensayo la deformación se va incrementando ligeramente en la **S-20-3**, mientras que van decreciendo en la **S-20-2**. De no variar esta tendencia, la **S-20-3** podría ser poco resistente a largo plazo a las deformaciones plásticas. La mezcla **S-20-2** se comporta mejor frente a las deformaciones plásticas.

3.3. Índice de resistencia conservada

Los resultados del índice de resistencia conservada **IC (%)** se presentan en la tabla 4. La mezcla **S-20-3** arrojó un resultado del 76.99 %; mientras que la mezcla **G-20-2** dio un valor del 79.34 %. Estos valores son ligeramente superiores al límite inferior marcado en la tabla 2. Por otro lado, la mezcla **S-20-2** arrojó un valor del 63.72%. Cabe señalar que esta mezcla presenta un valor de huecos en mezcla no excesivamente alto. Por tanto, la entrada de agua en el interior de la misma debería ser parecida al de otras mezclas con la misma cantidad de huecos. Una posible explicación a este resultado sería que dada la naturaleza de los áridos reciclados, que contiene entre ellos materiales arcillosos y hormigón, podría haber favorecido la retención de agua en su interior, desplazando el betún y disminuyendo consecuentemente la resistencia. La mezcla **G-20-1** arrojó un

resultado del 50.26 %. Una explicación de este resultado podría residir en que al existir un valor tan elevado de huecos en mezcla se pudo incrementar el efecto ocurrido con la mezcla **S-20-2**. En consecuencia, se produjo una disminución de la resistencia del a la mitad del valor inicial.

3.4. Ensayos dinámicos

Módulos y ángulos de desfase

Los valores de los módulos dinámicos se presentan en la tabla 4. En España los valores del módulo dinámico de las mezclas **S-20** con betún 60/70 se encuentran dentro de un intervalo usual de 6000 ± 1000 MPa [12]. En este sentido la mezcla **S-20-3** ofrece un valor ligeramente inferior al módulo usual para este tipo de mezclas. Sin embargo, la mezcla **S-20-2** está dentro de ese intervalo. Por otra parte, el intervalo de valores de los módulos para las mezclas **G-20** con un betún 60/70 es de 5500 ± 1000 MPa. En este sentido la mezcla **G-20-2** está por debajo de ese intervalo y la mezcla **G-20-1** está dentro del mismo. Se obtienen mezclas de mayor rigidez cuando se añade **AR**. Las rigideces concuerdan de manera razonable con la capacidad de soportar las cargas de las mezclas, reflejado en los valores de estabilidad obtenidos en los ensayos Marshall. Estos módulos bajos ponen de manifiesto un punto de debilidad de las mezclas fabricadas con **AN**. Al no ser lo suficientemente rígidas, con el paso del tráfico, se deformarían de forma excesiva al no absorber de forma adecuada las tensiones. Ello podría favorecer una fisuración temprana de la mezcla más superficial al tener una capa de base poco rígida.

Por otra parte, como es sabido, el ángulo de desfase da una idea del predominio del carácter elástico o viscoso de la mezcla estudiada, un ángulo de $\varphi=0^\circ$ indicaría que el material es elástico, mientras que un ángulo de $\varphi=90^\circ$ indicaría que el material es viscoso. En la tabla 4 se exponen los resultados del ajuste de las funciones tensión y deformación en el ciclo 200. Por último, comentar que estos valores de desfase se encuentran dentro de lo normal, resultando muy parecidos a los obtenidos por otros autores [12]. La mezcla **S-20-2** es la más elástica (tiene además el mayor módulo); mientras que la mezcla **S-20-3** (con el menor módulo de todas) es la más viscosa.

Leyes de fatiga

Los valores experimentales de ε y N para las mezclas estudiadas están representados en escala logarítmica en la figura 2. Se observa que tanto la mezcla **G-20-2** como la mezcla **G-20-1** presentan un comportamiento a fatiga muy similar. Esto se refleja en que sus pendientes (**B**) y coeficientes (**k**) son similares (tabla 4). Por otra parte, puede observarse que la mezcla **S-20-3** y la mezcla **S-20-2** presentan un comportamiento a fatiga diferente. La mezcla **S-20-2** tiene una pendiente (**B**) mucho más pronunciada que la mezcla **S-20-3**. Además, los coeficientes (**k**) no son similares. Esto significa que para una misma deformación unitaria impuesta, la mezcla **S-20-3** necesita un mayor número de ciclos

para llegar al agotamiento, por tanto, tiene un mejor comportamiento a la fatiga que la mezcla **S-20-2**. Por último, cabe decir que los parámetros de estas leyes son similares a los obtenidos por otros investigadores en España [12].

6. Conclusiones

- Los parámetros que más influyen en el comportamiento mecánico de las **MBC** fabricadas con áridos reciclados de **RCD** son el elevado % de huecos de estas mezclas y la gran absorción de agua de éstas. Estos parámetros inciden negativamente en la pérdida de resistencia de las **MBC** fabricadas con **RCD**.
- Para dosificar **MBC** con áridos reciclados de **RCD** es necesario reducir el % de huecos utilizando mezclas de granulometría cerrada, procurando emplear filleres de aportación.
- Si no se ven afectadas por el agua las **MBC** dosificadas con áridos reciclados de **RCD** tienen una mayor rigidez y resistencia mecánica que las **MBC** dosificadas con áridos naturales.
- Las **MBC** dosificadas con áridos reciclados de **RCD** se comportan bien frente a la deformación permanente, cumpliendo los valores exigidos en la normativa española.
- Las **MBC** dosificadas con áridos reciclados de **RCD** experimenta una razonable resistencia a la fatiga, obteniéndose, además, unos valores razonables, aunque algo bajos, del módulo dinámico.
- De todo lo dicho anteriormente se deduce que es posible utilizar los **RCD** en la fabricación de **MBC** de firmes de carreteras. Para ello, hay que investigar y mejorar las cuestiones planteadas anteriormente.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Medio Ambiente: Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006. BOE nº 166 (2001). pp. 25305-25313.
- [2] T. C. Hansen. Recycling of Demolished Concrete and Masonry. Report of Technical Committee 37-Drc Demolition and Reuse of Concrete (Rilem Report nº 6).p. 296, Spon E&FN, UK, 1992.
- [3] T. Park: Application of Construction and Building Debris as Base and Subbase Materials in Rigid Pavement. Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, nº 5 (2003), pp-558-563.
- [4] A. Ruiz: Experiencia en España con la utilización de residuos y materiales secundarios en carreteras. Carreteras, nº 118 (2001), pp. 8-25.
- [5] T. Bennert, W. Papp, A. Maher, N. Gucunski: Utilization of construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications. Transportation Research Record, nº 1714 (2000), pp.33-39.

- [6] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). UNE146131, Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales de firmes, Anexo A (informativo), Áridos reciclados. Madrid, 2003.
- [7] Der-Hsien Shen, Jia-chong Du. Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials* 18, 2004, pp 391-397.
- [8] Dirección General de Carreteras. Secciones de firme de la Instrucción de Carreteras IC. p. 36. Ministerio de Fomento. Ediciones Liteam, Madrid, 2002.
- [9] Dirección General de Carreteras. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3. Ministerio de Fomento. Ediciones Liteam, Madrid, 2002.
- [10] Dirección general de Carreteras. Normas NLT. Ensayos de carreteras. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 2ª Edición, Madrid, 1992.
- [11] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Manual de normas técnicas UNE-EN. Serie construcción. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras. p. 526. Madrid, 2001.
- [12] J. García. Caracterización de módulos, fatiga y otros ensayos dinámicos. Jornada sobre caracterización y control de mezclas bituminosas. p. 21. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 2000.

Tabla 1. Husos y curvas y granulométricas.

Mezclas		Tamaños de los tamice UNE-EN-933-2 (mm.)										
		Árido grueso					Árido fino					Filler
		25	20	12.5	8	4	2	0.500	0.250	0.125	0.063	
Semidensa S-20	Huso	100	80-95	64-79	50-66	35-50	24-38	11-21	7-15	5-10	3-7	
	S-20-1	100% AR	100	95	78	63	40	30	15	12	8	5.5
	S-20-2	50% AR + 50% AN	100	95	78	63	40	30	15	12	8	6.5
	S-20-3	100% AN	100	95	78	63	40	30	15	12	8	5.5
Gruesa G-20	Huso	100	75-95	55-75	40-60	25-42	18-32	7-18	4-12	3-8	2-5	
	G-20-1	50% AR + 50% AN	100	95	75	60	37.75	28.5	13	10	7	4.75
	G-20-2	100% AN	100	95	75	60	37.75	28.5	13	10	7	4.25

Tabla 2. Características de los materiales básicos.

Ensayo	MBC con 100% AN		MBC con 50% AR+50% AN		
	S-20 -3	G-20-2	S-20-1	S-20 -2	G-20- 1
Caras de fractura (%): (UNE-EN933-5)	100	100	100	100	100
Índice de lajas (%): (UNE-EN933-3)	17.2	19.4	16.2	17.1	18.3
Coefficiente de los Ángeles (%): (UNE-EN1097-2)	19.4	22.1	39.65	25.6	24.8
Equivalente de arena (%): (UNE-EN933-8)	75.4	70.1	87.2	85.4	88.1
Coefficiente de absorción (%): (UNE-83-133-134)	0.17	0.19	6.1	4.59	4.82
Densidad relativa en aceite de parafina (g/cm ³): (NLT-167)	2.69	2.69	2.58	2.69	2.69
Ensayo	Betún				
Penetración (0.1 mm): (NLT-124)	69				
Punto de reblandecimiento de anillo y bola: (°C) (NLT-125)	48.5				
Índice de penetración Peiffer: (NLT-181)	-0.8				
Densidad (g/cm ³): (NLT-122)	1.03				

Tabla 3. Criterios de dosificación preceptivos en el PG-3.

Característica		Categoría de tráfico pesado ⁺				
		T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes	T4	
Marshall	Estabilidad (kN)	>15	>12.5	>10	8-12	
	Deformación (mm.)	2-3	2-3.5		2.5-3.5	
	Huecos en mezcla (%)	Capa intermedia S-20	4-6	5-8	4-8	4-8*
		Capa de base G-20	5-8	6-9	5-9	---
Huecos en áridos (%)		>14				
Índice de resistencia conservada IC (%)		>75				
Velocidad de deformación VD (□m/min)	Capa intermedia S-20	<20				
	Capa de base G-20	---				

⁺T00 (IMD_p≥4000); T0 (2000≤IMD_p<4000); T1 (800≤IMD_p<2000), T2 (200≤IMD_p<800); T3 (50≤IMD_p<200) ; T4 (IMD_p<50); (IMD_p=Intensidad media diaria de vehículos pesados).

*vías de servicio.

Tabla 4. Resultados de los ensayos mecánicos.

Mezcla	Ensayo Marshall						IC (%)	VD ($\mu\text{m}/\text{min}$)	Ley de fatiga			MD (MPa)	ϕ
	Bo (%)	Ha (%)	Hm (%)	D (mm)	E (kN)	Da (g/cm^3)			k	B	R^2		
S-20-1	5.91	23.5	11.7	2.8	14.6	2.09	---	---	---	----	----	----	----
S-20-2	5.91	20.2	8	2.9	12.6	2.28	63.72	15.07	0.0051	-0.2716	0.9697	5016	35.05
S-20-3	5.00	15	4	2.6	10.8	2.4	76.99	19.29	0.0029	-0.1903	0.8575	3866	45.85
G-20-1	4.75	20.9	11	2.5	11	2.22	50.26	----	0.0045	-0.2823	0.9502	4675	37.05
G-20-2	4.25	18	8.9	2.8	11	2.3	79.34	----	0.0060	-0.3064	0.8620	4086	37.71

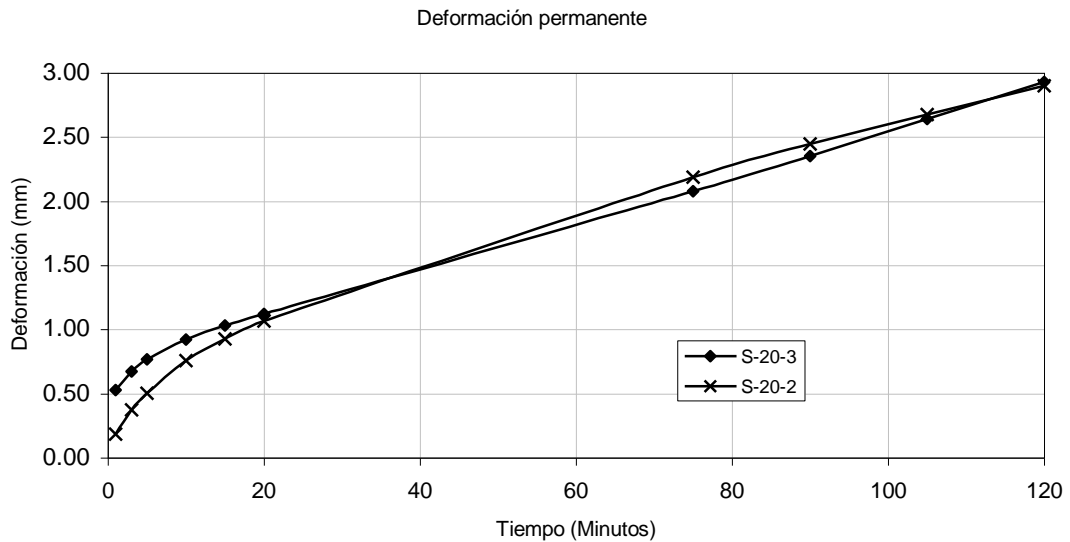


Figura 1. Deformación permanente

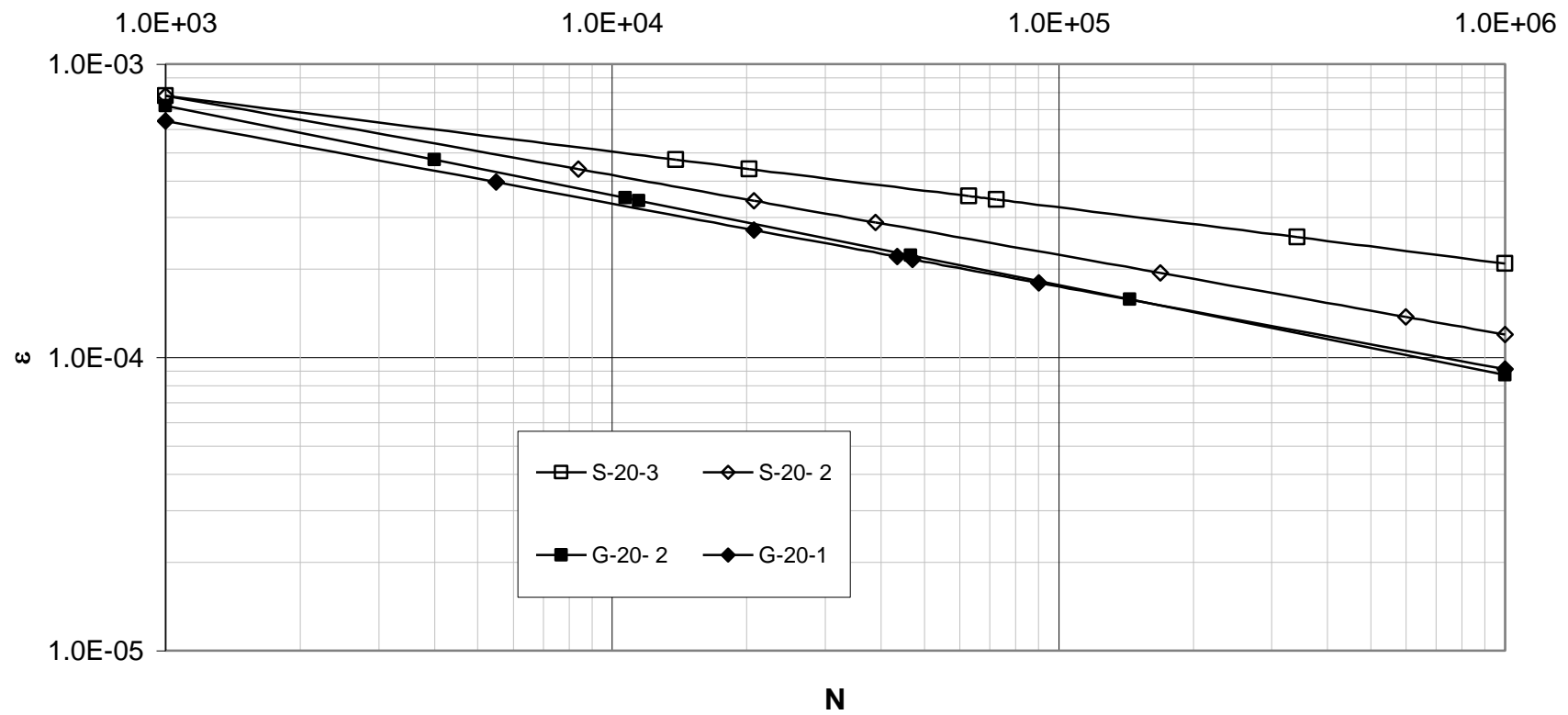


Figura 2. Leyes de fatiga.