

"Experiencia del empleo de las bases de alto módulo en la Autovía M-501"

1. Introducción. Origen de las Mezclas Bituminosas de Alto Modulo

Las mezclas de alto módulo fueron desarrolladas en Francia a principios de la década de los 80, [1], para evitar los fenómenos de fisuración provocados por las bases hidráulicas de grava-cemento en los denominados firmes semi-rígidos, así como para el esfuerzo de estos firmes.

Este tipo de mezclas bituminosas se caracterizan por tener un elevado módulo de rigidez, al estar fabricadas con un betún duro especial, y por una resistencia a la fatiga similar a la de una mezcla convencional. Desde su desarrollo estas mezclas se han aplicado con éxito tanto como capas de base en firmes de nueva construcción, como en refuerzos de pavimentos con insuficiente capacidad estructural.

En la actualidad se dispone de una serie de estas mezclas con diferentes módulos y resistencias a fatiga (mezclas de alto módulo, muy alto módulo, grava-betún de alto módulo y alto módulo con betún modificado) que han alcanzado tal difusión y empleo, que ya en el año 1.988 se recogía su empleo en el catálogo de estructuras de firmes francés y más recientemente en la nueva edición del « Catalogue des structures types de chaussées neuves » de 1998 del SETRA [3]. Estas mezclas fueron normalizadas como "Enrobés à module élevé, EME" en la norma NFP 98-140, en diciembre de 1.991.

2. Normativa española sobre las Mezclas Bituminosas de Alto Modulo (M.A.M.)

En nuestro país el empleo de las mezclas de alto módulo se han ido generalizado, como en el país vecino, por lo que muy recientemente, en Julio del 2001, en la nueva redacción del artículo 542 del PG-3, dedicado a las mezclas bituminosas en caliente (MBC) [4], se han incluido junto a las mezclas convencionales tipo « S, D o G », las mezclas drenantes y las mezclas de alto módulo (M.A.M.).

Se define como mezcla bituminosa en caliente, en este artículo, la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

A efectos de aplicación de este artículo, se define como mezcla bituminosa en caliente de alto módulo para su empleo en capa intermedia o de base bituminosa en espesor entre seis y doce centímetros (6 a 12 cm), aquella que, además de todo lo anterior, el valor de su módulo dinámico a veinte grados Celsius (20 °C), según la NLT-349, sea superior a once mil megapascals (11.000 MPa).

Las características de los materiales básicos y la composición de estas mezclas son las siguientes:

2.1. Áridos

El árido grueso, fino y polvo mineral para estas mezclas cumplirán con las especificaciones recogidas en el artículo 542.

2.2. Ligantes hidrocarbonados.

La puesta a punto de las mezclas de alto módulo obligó al desarrollo de un betún duro especial tipo B 10/20, o modificado con polímeros, con una estructura coloidal que le confiriera, a pesar de su baja penetración, unas propiedades reológicas, un poder aglomerante y una resistencia al envejecimiento similares a las de los betunes de destilación de uso en carreteras, ya que los betunes de esta penetración que existían en el mercado eran soplados para uso industrial, y por consiguiente inadecuados para su empleo en mezclas bituminosas.

En el artículo 542 se especifica que para mezclas bituminosas en caliente de alto módulo el tipo de ligante hidrocarbonado a emplear será el BM-1, del artículo 215 sobre betunes asfálticos modificados con polímeros, para las categorías de tráfico pesado T00 y T0 y el B13/22, del artículo 211 sobre betunes asfálticos, para las categorías de tráfico pesado T1 y T2.

También se puede emplear un betún modificado con polímeros cuando se desee una mayor flexibilidad y poder de deformación de la mezcla, como puede ser el caso de refuerzos sobre firmes semirrígidos con elevadas deflexiones.

2.3. Composición de la mezcla.

En el artículo 542 se especifica que para la formulación de mezclas bituminosas en caliente de alto módulo (M.A.M.) se empleará el huso S20 con las siguientes modificaciones, respecto a dicho huso granulométrico: tamiz 0,250 mm: 8-15%; tamiz 0,125 mm: 7-12% y tamiz 0,063 mm: 6-9%.

Las curvas granulométricas de estas mezclas son cerradas y continuas con un contenido de polvo mineral comprendido elevado entre el 7 y el 8%. Las proporciones de áridos habitualmente empleados son las siguientes:

Arido grueso (> 2,5 mm)	50-60 %
Arido fino (< 2,5 mm)	43-32 %
Polvo mineral (< 80 mm)	7-8 %

En el artículo 542 se especifica también el espesor mínimo en función de la posición de la capa en el firme, según la tabla 1.

(*) En el caso de que no se emplee el mismo tipo de mezcla que en la capa de rodadura de la calzada.

(* *) Las mezclas de tipo G-20 no deben ser utilizadas bajo mezclas drenantes, ni bajo mezclas bituminosas discontinuas.

(* * *) Espesor máximo de doce centíme-

TIPO DE CAPA	ESPESOR (cm)	TIPO DE MEZCLA
RODADURA	4 - 5	DI2; S12; PA12
	> 5	D20; S20
INTERMEDIA	6 - 9	D20; S20; S25; G20 (* *); MAM
BASE	9 - 15	S25; G20; G25; MAM (* * *)
ARCENES (*)	4 - 6	DI2

Tabla 1. Tipo de mezcla a utilizar en función del tipo y espesor de la capa.

tros (12 cm).

En la norma francesa NF B 98-140 se recogen dos tipos de mezclas de alto módulo (EME1 y EME2) estimándose el contenido mínimo de betún en función de la fórmula de Duriez con valores del módulo de riqueza > 2,5 para el primer tipo y > 3,5 para el segundo, si bien estos resultados se complementan con el ensayo de Duriez, Pista de Laboratorio (Orniérange) y máqui-

na giratoria (PCG). Los contenidos de betún habitualmente empleados quedan comprendidos en Francia entre el 5,5 y 6,5 % para las mezclas de alto módulo y de muy alto módulo. En el artículo 542, tabla 2, se establece un mínimo de ligante del 5,2% para MAM.

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	DOTACIÓN MÍNIMA (%)
RODADURA	DRENANTE	4,5
	DENSA y SEMIDENSA	4,75
INTERMEDIA	DENSA, SEMIDENSA y GRUESA	4,0
	ALTO MÓDULO	5,2
BASE	SEMIDENSA y GRUESA	3,5
	ALTO MÓDULO	5,2

Tabla 2. Dotación mínima (*) de ligante hidrocarbonado.

(*) Se tendrán en cuenta las correcciones por peso específico y absorción de los áridos, si son necesarias.

La granulometría de los áridos combinados, incluido el polvo mineral, por los tamices 40; 25; 20; 12,5; 8; 4; 2; 0,500; 0,250; 0,125 y 0,630 mm de la UNE-EN 933-2. Para las mezclas de alto módulo, además, el valor del módulo dinámico a veinte grados Celsius (20 °C), según la norma NLT-349, no será inferior a once mil megapascals (11.000 Mpa).

La macrotextura vendrá especificada por los valores de la tabla 3.

CARACTERÍSTICA	TIPO DE MEZCLA	
	DRENANTE	RESTO
MACROTEXTURA SUPERFICIAL (*) Valor mínimo (mm)	1,5	0,7
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (**) CRT mínimo (%)	60	65

Tabla 3. Macrotextura superficial (NTL-335) y resistencia al deslizamiento (NTL-336) de las mezclas para capas de rodadura.

(*) Medida antes de la puesta en servicio de la capa.

(**) Medida una vez transcurridos dos meses de la puesta en servicio de la capa.

3. Descripción de la sección del firme de la M-501.

La carretera M-501 o "carretera de los Pantanos", es una ruta que partiendo de la nacional V, o de Extremadura, permite el acceso a las localidades de Villaviciosa de Odón, Brunete, Boadilla del Monte y Quijorna. La obra consiste en la duplicación de la calzada de las carreteras M-511 y M-501 entre la M-40, el segundo anillo periférico de la capital, y la M-522. Esta obra ha sido adjudicada a U.T.E Pantanos constituida por las empresas FCC (Fomento de Construcciones y Contratas), Dragados y NEXO.

El importe total de la obra es de algo más de 12 mil millones de pesetas. Financiados según el método alemán.

La ejecución de la obra conlleva la aplicación de mezclas bituminosas de varios tipos:

- ♦ 18 cm. en 2 o 3 capas de mezclas tipo S-20 de alto módulo (MAM).
- ♦ 4 cm. de mezcla drenante tipo PA-12 en capa de rodadura.
- ♦ Mezclas tipo S-20 (MAM), S-12 o D-12 para vías de servicio, ramales, glorietas y entronques.

4. Fórmula de proyecto de la M.A.M.

La fórmula se basa en el empleo de materiales procedentes de una cantera; la arena 0/6 caliza, y materiales silíceos procedentes de "Graveras El Puente" (sociedad participada por el grupo Probisa); arena 0/6, gravilla 6/12 y gravas: 12/18 y 18/25. La composición de áridos propuesta para el huso S-20 fue la siguiente:

Arena caliza	26%
Arena silicea	26%
Gravilla 6/12	22%
Grava 12/18	12%
Grava 18/25	14%

Con esta composición se obtuvo la siguiente granulometría:

TAMICES UNE, mm	% PASA
25	100
20	91
12,5	78
10	71
5	52
2,5	37
0,63	19
0,32	15
0,16	11
0,08	7,5

La granulometría especificada para mezclas de alto módulo en el artículo 542 es la siguiente:

TAMICES UNE, mm	% pasa Huso MAM	Huso MAM inferior
25	100	100
20	95	80
12,5	79	64
8	66	50
4	50	35
2	38	24
0,5	21	11
0,25	15	8
0,125	12	7
0,063	9	6

Puede observarse que la serie de tamices ha cambiado en el nuevo artículo 542 adaptándose a las normas europeas.

La representación gráfica de esta composición se puede observar en la gráfica 1. La dosificación Marshall (NLT-159) para esta composición granulométrica y Betún 13/22 se estableció bajo las siguientes condiciones: 75 golpes por cara, temperatura de la mezcla 185°C y temperatura de compactación 175°C. Los resultados Marshall fueron los siguientes:

Los valores de inmersión-compresión (NLT-162) para el 5.5% de B13/22 fueron:

Densidad de probetas sin sumergir	2.340
Densidad probetas sumergidas	2.342
Resistencia probetas sin sumergir, kgf	9900
Resistencia probetas sumergidas, kgf	8020
Resistencia conservada, %	81

Contenido en ligante, % sobre árido				
	5,0	5,5	6,0	6,5
Estabilidad, Kg	2315	2395	2150	2065
Deformación, mm	2.3	2.8	3.2	3.6
Densidad	2.368	2.377	2.383	2.375
Huecos en mezcla %	5,0	4,0	3,1	2,9
Huecos en áridos %	15,9	16,1	16,3	17,0

Tabla 4.

Para contrastar esta fórmula de trabajo con la experiencia francesa, se envió una copia del informe y muestras de los materiales seleccionados al laboratorio de Dourdan del Grupo Eurovia.

El módulo de riqueza de esta mezcla de acuerdo con la normativa francesa es del 3.36.

Esta mezcla fue sometida al ensayo de la prensa giratoria (PCG) de norma NF P 98-252, al ensayo Duriez (norma NF P 98-251-1), al de deformación (NF P 98-253-1) y a la determinación del módulo en tracción directa (NF P 98-260-1)

El ensayo de la PCG arrojó los siguientes resultados:

V10	11.4 % de huecos
V100	4.2 % de huecos
V120	3.7 % de huecos

Las especificaciones establecen que el contenido en huecos sea menor del 6 % para 120 ciclos. Los valores de regresión obtenidos fueron V1 18.5 %, K 3.10 y un coeficiente C del 0.99745.

En el ensayo de deformación se obtuvo después de 30.000 ciclos una deformación del 5.6 % La especificación establece según la norma NF P 98-140 para mezclas de alto módulo (EME) un valor después de 30.000 ciclos inferior al 7.5 %. Basado en los siguientes valores:

Número de ciclos	Deformación real (%)	Deformación calculada (%)
300	100	100
1000	95	80
3000	79	64
10000	66	50
30000	50	35

Los valores calculados se basan en una regresión con un valor del coeficiente del 0.994. El espesor de la probeta fue de 10 cm., compactación (NF P 98-250-2) fuerte, porcentaje medio de huecos (NF P 98-250-5) y temperatura del ensayo 60° C.

En el ensayo Duriez se estableció una densidad volumétrica real de los áridos de 2.658 (t/m³) y de la mezcla de 2.456 (t/m³). La densidad volumétrica aparente fue de 2.294 (t/m³) según el ensayo del LCPC y un contenido en huecos del 6.6 %. Para esta mezcla la resistencia a compresión Duriez, 8 días a 18°C, expresada en megapascuales fue la siguiente:

Resistencia al aire	18.0
Resistencia al agua	16.9
Resistencia conservada	0.94

La especificación del valor de resistencia conservada Duriez para este tipo de mezclas establece un valor superior al 0.75.

El ensayo para la determinación de módulos en tracción directa (NF P 98-260-1) se realizó con una prensa M.T.S. sobre cuatro probetas, a tres temperaturas (0, 10 y 15° C) y frecuencias de 1, 3, 10, 30, 100 y 300 segundos. Los valores de los ensayos elementales fueron los siguientes:

	a 0°C	a 10°C	a 15°C
Tc (s)	Módulo (Mpa)	Módulo (Mpa)	Módulo (Mpa)
1	21561	15127	11794
3	20246	12995	9427
10	18136	10613	7263
30	16728	8933	5544
100	14396	6783	3920
300	12714	5143	2851

Tabla5.

De estos valores se obtiene que el módulo a tracción directa a 10° C y 0.02 s es de 20900 Mpa y de 18600 Mpa para 15° C y 0.02 s. La norma NF P 98-140 establece para las mezclas de alto módulo (EME) clase 2 un valor mínimo a 15°C y 10 Hz de 14000 Mpa. Por tanto, todos los ensayos de esta fórmula de proyecto satisfacen tam-

bién los requisitos de las mezclas de alto módulo (EME) de la clase 2 según las especificaciones de la norma NF P 98-140.

5. Fabricación y extensión. Plan de aseguramiento de la Calidad

El plan de aseguramiento de Calidad de la obra (P.A.C.), como viene siendo habitual en el sector, se realiza siguiendo las directrices que establece la serie de normas ISO 9000 y su contenido se redacta atendiendo a los documentos contractuales: artículos del PG-3, proyecto de la obra, especificaciones técnicas de compra (E.T.C.), etc..

Atendiendo a la E.T.C. de la U.T.E. Pantanos, los criterios exigidos para la mezcla de alto módulo fueron los siguientes:

- ♦ La determinación de la fórmula de trabajo seguirá las indicaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3/75 y de la Orden Circular 299/89 T de la Dirección de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas.
- ♦ La fórmula de trabajo deberá ser aportada, con quince días de antelación antes del inicio de los trabajos, por CTRA. PANTANOS U.T.E y la Dirección de Obra.
- ♦ La curva granulométrica de los áridos, incluyendo el polvo mineral, deberá quedar inscrita en el huso S-20, salvo en lo que se refiere a los dos últimos tamices de la serie, en los cuales los límites serán los siguientes:
- ♦ La relación ponderal aconseja entre los contenidos de filler y betún será de 1,2.

TAMIZ UNE	CERNIDO ACUMULADO (% en masa)
0,16	8-14
0,080	7-10

- ♦ Para la determinación del contenido óptimo de ligante se empleará el procedimiento Marshall, pero en ningún caso dicho contenido será, en masa, inferior al 5,5% de la masa mineral.
- ♦ La estabilidad Marshall debe ser superior a 20 kN.
- ♦ La deformación Marshall debe estar comprendida entre 2 y 3 mm.
- ♦ El contenido de huecos en mezcla estará comprendido entre el 3 y el 5%.
- ♦ La resistencia conservada en el ensayo de inmersión-compresión será superior al 75%.
- ♦ La velocidad de deformación en los últimos 15 minutos en el ensayo de pista de laboratorio será inferior a 0,010 mm/min.
- ♦ El módulo dinámico será superior a 11.000 Mpa.

La fabricación de las mezclas bituminosas de alto módulo se realiza con las plantas asfálticas habituales para aglomerado en caliente, bien sea en las centrales clásicas discontinuas o bien en las continuas de tambor secador-mezclador, teniendo que emplear temperaturas algo más elevadas como consecuencia de la mayor viscosidad del ligante.

El transporte desde la central de fabricación al extendido debe realizarse en camiones calorifugados o cubiertos con lonas para evitar el enfriamiento de la mezcla.

La compactación se realiza con maquinaria convencional con compactadores de rodillo vibratorios y neumáticos. En la tabla 6 se indican las temperaturas recomendadas para la fabricación y puesta en obra de estas mezclas.

Con estos datos y los derivados de los criterios

deducidos del PG-3, respecto al uso restringido sobre la fórmula de trabajo aprobada por la Dirección de Obra se compuso el P.A.C. y se especificaron los criterios de aceptación y rechazo.

Temperatura de almacenamiento °C	140
Temperatura del betún para la envuelta °C	160-180
Temperatura de mezcla	175-190
Plantas discontinuas °C	170-185
Plantas continuas °C	
Temperatura de compactación °C	145-175
Temperatura mínima de compactación °C	140

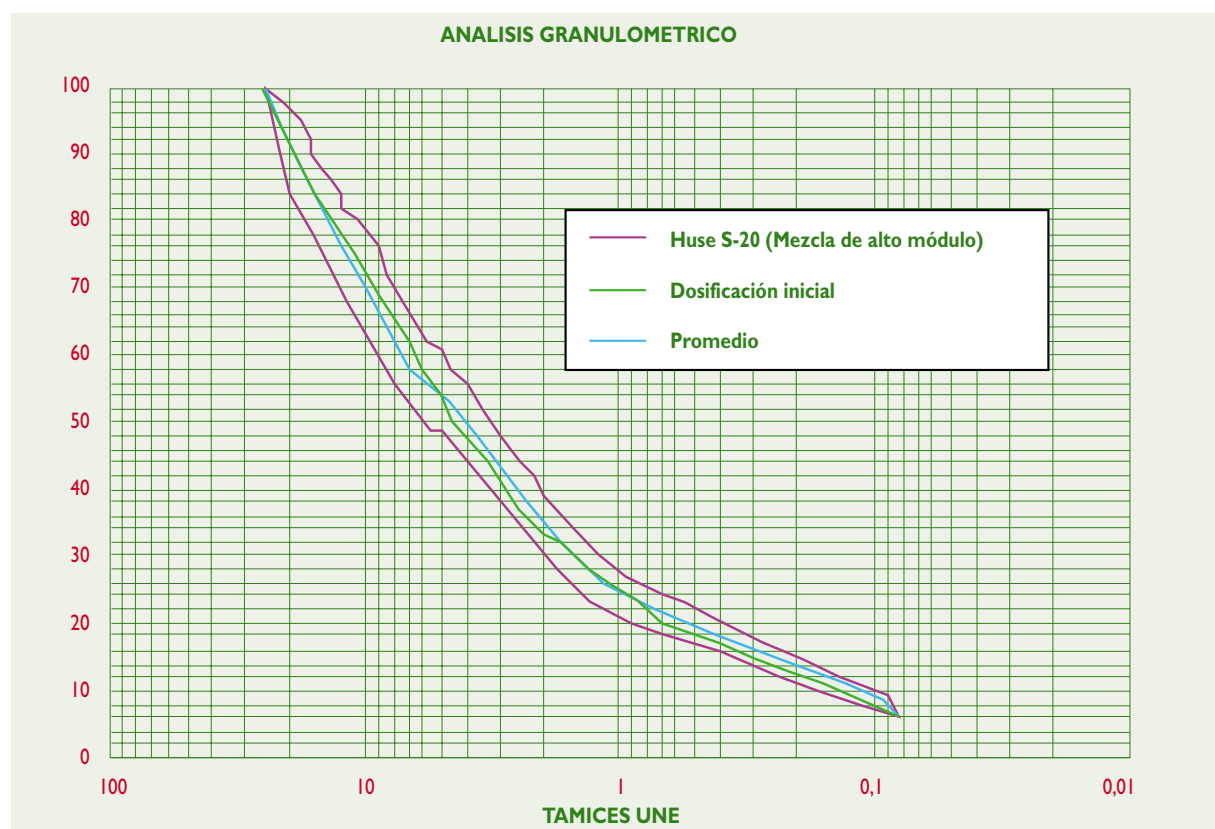
Tabla 6. Temperaturas de fabricación y puesta en obra

6. Control durante la ejecución

En el momento de redacción de este texto la obra se encuentra en plena ejecución y se han suministrado más de 250.000 toneladas de MAM. La aplicación de los 18 cm de MAM se está realizando en tres extensiones de 6 cm. para asegurar la regularidad superficial, y conseguir los valores de IRI que indica el artículo 542 del PG-3.

El Índice de Regularidad Internacional (IRI), según la NLT-330, deberá cumplir lo fijado en la tabla 3.

Figura 1.



TIPO DE CAPA			
PORCENTAJE DE HECTÓMETROS	RODADURA INTERMEDIA		OTRAS CAPAS BITUMINOSAS
	TIPO DE VIA		
	CALZADA DE AUTOPISTAS Y AUTOVÍAS	RESTO DE VIAS	
50	< 1,5	< 1,5	< 20
80	< 1,8	< 2,0	< 2,5
100	< 2,0	< 2,5	< 3,0

Tabla 7. Índice de Regularidad Internacional (IRI) (dm/hm) para firmes de nueva construcción

Una segunda planta discontinua de 250 toneladas/hora ha sido ubicada junto al tajo para aumentar la capacidad de producción y de ahí ese valor máximo de 2.527 toneladas, correspondiente a uno de los últimos días de agosto de 2001.

La estadística de control de la ejecución hasta la fecha arroja los siguientes resultados:

Control de Proceso	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio	Desv. Standard
Producción diaria (t)	2.527	151	1.032	511
Temperatura del betún (C°)	200	165	177	6,3
Temperatura de mezcla (C°)	197	173	184	6,3
Temperatura de compactación	185	165	172	4,0
Temperatura de fin compactación	175	142	160	6,2

Tabla 8.

El control de producción, en el artículo 542 del PG-3, establece unas tolerancias máximas admisibles de:

- ♦ $\pm 3\%$ para tamices superiores al tamiz de 4 mm,
- ♦ $\pm 2\%$ para tamices comprendidos entre el tamiz de 4 mm y el de 0.063 mm,
- ♦ $\pm 1\%$ para el tamiz de 0.063 mm,

Los datos de la estadística acumulada después de más de 250.000 toneladas son los siguientes:

Control de Granulometría	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio	Desv. Standard
20 mm	97	83	91	3,1
12.5 mm	84	70	76	3,3
10 mm	79	62	70	3,6
6.3 mm	64	49	57	3,0
5 mm	63	47	54	3,1
2.5 mm	44	33	39	2,4
1.25 mm	30	23	27	1,7
0.63 mm	23	17	21	1,4
0.32 mm	18	14	16	1,0
0.16 mm	14	11	12	0,8
0.08 mm	8,4	6,3	7,3	0,37

Tabla 9.

Los datos de control de probetas extraídas de obra se detallan a continuación:

Rotura Marshall y Módulo de la MAM	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio	Desv. Standard
Ligante % b/a	6,00	5,00	5,53	0,195
Filler / betún	1,49	1,16	1,32	0,066
Estab KN	38,05	22,50	30,93	3,57
Def., mm.	3,9	1,8	2,8	0,34
Dens, gr/cm ³	2,395	2,293	2,358	0,0208
Huecos mezcla, %	6,5	2,3	4,4	0,91
Resist. Seco, N	9.950	7.715	8.753	700
Resist. Cons. %	98	83	88	5,5
Pista V105/120	0,006	0,001	0,002	0,002

Tabla 10.

Como puede observarse todos los criterios cumplen las especificaciones establecidas para este tipo de mezclas (MAM) y confirman que los valores medios resultan claramente superiores a los de las mezclas convencionales. En particular resulta muy significativo más incluso que el valor a rotura Marshall medio, casi 31 KN, el valor de la Resistencia en seco medio, 8.753 N. Estos altísimos valores son compatibles con valores de deformación Marshall convencionales.

Respecto a los valores de módulo a 20° C (NLT-349) obtenidos durante la ejecución de la obra, se observa que en todos los casos se ha cumplido el criterio de módulo mínimo a 20° C del artí-

culo 542. El valor medio obtenido es de 13.187 Mpa.

Módulo Dinámico de la MAM	MPa
Valor máximo	16.066
Valor mínimo	11.019
Valor medio	13.187

Desviación standard	1.274
---------------------	-------

Tabla 11.

7. Bibliografía.

1. J.J. Potti y B. Rubio "Mezclas bituminosas de alto módulo". Revista "Carreteras" número 63 páginas 61- 69. Febrero 1993.
2. J.J Potti y Mª del Mar Colás. "Resultado de los ensayos dinámicos de la mezcla de alto módulo Rigibit". Comunicación nº 8 XX Semana de la Carretera.3-7 Octubre 1994. Alicante (España).
3. Catalogo de estructuras del SETRA para calzadas de nueva construcción. Edición 1998.
4. Artículo 542 del PG-3 sobre "Mezclas bituminosas en caliente". Orden circular 5/2001, de julio de 2001, sobre "Riegos auxiliares, mezclas bituminosas y pavimentos de hormigón". Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento.