



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**EFFECTO DE LA UTILIZACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS  
CON POLVO DE NEUMÁTICO SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS  
FUNCIONALES DEL PAVIMENTO.**

722-TES-CA-3392

### Autor/a

JOSEP M. GRUAS I PAULS

### Tutor/a

RODRIGO MIRÓ I RECASENS

### Departament

INFRAESTRUCTURES DEL TRANSPORT I TERRITORI

### Data

MARÇ 2009

## RESUMEN

Uno de los problemas medioambientales que preocupa desde hace años, tanto a las Administraciones como a los mismos ciudadanos, son los neumáticos fuera de uso (NFU's). La legislación tanto a nivel Europeo como a nivel nacional se ha hecho eco de esta problemática con la publicación de diferentes directivas que impulsa el reciclaje y prohíbe el vertido de neumáticos enteros y/o troceados a partir del 1 de enero de 2006. En España, además de contar con el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, en los artículos 542 y 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento, establece que siempre que sea técnica y económicamente viable se priorizará la utilización de NFU's en las mezclas bituminosas.

Estudios experimentales realizados en todo el mundo avalan la posibilidad de utilizar, en circunstancias delimitadas, polvo de neumático procedente de la trituración de neumáticos fuera de uso en las mezclas bituminosas.

El objetivo principal de la presente tesina es analizar el efecto que tiene la adición de polvo de neumático en un microaglomerado sobre sus características funcionales, especialmente textura, resistencia al deslizamiento y sonoridad, a partir de las medidas realizadas sobre diferentes tramos experimentales a escala real.

Los tramos fueron contruidos con una misma mezcla tipo M-10, en la que se han utilizando cuatro tipos de ligantes. La primera mezcla se ha realizado con un betún BM-3c, sin presencia de caucho en la composición, que es la que se utilizará como referencia para las demás. La segunda tipología de mezcla se ha realizado con un betún BMPN que incorpora polvo de neumático por vía húmeda con una proporción de caucho del 10 % del peso del ligante. En la tercera mezcla se ha utilizado el mismo betún BMPN al que además se le adiciona polvo de neumático por vía seca del 1% del peso de los áridos. Finalmente, la cuarta mezcla utiliza el betún BMPN anteriormente descrito con la adición de polvo de neumático por vía seca del 2% del peso de los áridos mediante el procedimiento de vía seca. Las fórmulas de trabajo se determinaron en un trabajo previo realizado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Los tramos experimentales están ubicados en la carretera B-140, entre Sabadell y Santa Perpetua de Mógoda comprendido entre los puntos kilométricos 2+660 a 4+680, y sobre ellos se ha medido la textura y el coeficiente de rozamiento transversal (CRT) mediante el SCRIM, y los niveles de ruido mediante una cámara semi-anecoica (método CPX o de proximidad).

Entre los resultados se destaca la gran influencia que tienen las condiciones de ejecución y servicio sobre las características superficiales de los pavimentos, así como que, en general, la adición de polvo de neumático por vía seca, a pesar de disminuir la textura, puede influir positivamente sobre el CRT y el ruido de rodadura.

## ABSTRACT

One of the environmental problems, which has worried Administrations and individuals alike over the past years, is the disposal of used tires. The European Union legislation and Spanish national legislation have proposed and published, the 1st of June 2006, a set of directives that prohibit disposal of whole or trimmed used tires and promote recycling in order to solve the issue. In Spain, on top of the "Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso" (National Plan for Used Tires), articles 542 and 543 of the "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y puentes (PG3)" (Set of technical prescriptions for road and bridge works) of the "Ministerio de Fomento" (Civil Engineering Ministry), establish that, if technically and economically viable, the use of used tires in bituminous compounds is prioritized.

Worldwide experimental studies have proven that, under limited conditions, the dust originating from blended used tires can be used in bituminous compounds.

The objective of this thesis is to analyze the effect of the tire dust addition on the functional properties of a micro-agglomerate, especially on the texture, grip and sonority, by studying the measurements taken in different experimental sections of real scale roads.

The studied sections were all built with a type M-10 conglomerate but using different bases. The first mixture, which has been used as the reference for all other tests, used BM-3c without any tire dust in the conglomerate. The second mixture used BMPN that incorporates tire dust using the humid method with a proportion of 10% of the bases' weight. The third mixture used BMPN with an addition of 1% tire dust to the total weight of the aggregates using the dry method. Finally, the fourth mixture used BMPN with a 2% tire dust using methods described for method three. The working formulas were previously determined in an investigation study by the "Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Catalunya" (Technical University of Catalonia's Civil Engineering Laboratory).

The experimental stretches are located on the B140 from Sabadell to Santa Perpetua de Mògoda, between PK 2+660 and 4+680. The measurements realized on these stretches are those of texture, transversal grip (CRT) using the SCRIM, and noise level with a semi-anechoic camera using the CPX or proximity method.

From the results we may highlight the great influence that the building conditions and service conditions have on the pavement surfaces. Furthermore, en general, the addition of used tire dust using the dry method, although reduces the texture, can influence positively on the CRT and the sonority.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>9</b>
1. LA PROBLEMÁTICA DEL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU).....	9
2. MARCO NORMATIVO DEL NFU'S.....	11
3. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU).....	13
3.1. Descripción del material.....	13
3.2. Trituración y molienda de los NFU's.....	14
3.3. Aplicaciones de los neumáticos.....	16
4. INCORPORACIÓN DE POLVO CAUCHO EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.....	17
4.1. Procedimientos de incorporación del caucho en las mezclas.....	17
4.2. Vía húmeda.....	17
4.2.1. Antecedentes vía húmeda.....	17
4.2.2. Tramos realizados en España con el procedimiento de vía húmeda.....	18
4.2.3. Aspectos técnicos de la interacción betún-polvo de neumático.....	19
4.2.4. Tipología de ligantes que incorporan polvo de neumático.....	21
4.3. Vía seca.....	21
4.3.1. Antecedentes vía seca.....	22
4.3.2. Tramos realizados en España con el procedimiento de la vía seca.....	22
4.4. Vía mixta.....	24
4.5. Mejoras que aporta a las mezclas la incorporación de polvo de neumático....	24
4.6. Tipos de mezclas en las que se emplea el polvo de neumático.....	26
5. CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DE LOS PAVIMENTOS.....	28
5.1. Textura y resistencia al deslizamiento.....	29
5.1.1. Concepto de resistencia al deslizamiento y textura.....	29
5.1.2. Factores que influyen en el valor de la medida de la adherencia.....	31
5.1.3. Técnicas de medida.....	33
5.2. Ruido de rodadura.....	34
5.2.1. Fuentes y mecanismos que generan el ruido de rodadura.....	34
5.2.2. Técnicas y métodos de medida del ruido.....	35
5.3. Estudios realizados de las características funcionales de pavimentos que incorporan polvo de neumático en las mezclas bituminosas.....	38
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....</b>	<b>44</b>
1. ESTUDIOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO.....	44
1.1. Objetivo del estudio.....	44
1.2. Material utilizado.....	45
1.3. Propiedades mecánicas analizadas.....	46
2. TRAMOS DE ENSAYO A ESCALA REAL.....	51

2.1. Situación y características de los tramos experimentales.....	52
2.2. Características de los materiales empleados.....	57
2.3. Descripción de los trabajos realizados.....	57
2.3.1. Fabricación de la mezcla.....	57
2.3.2. Transporte.....	60
2.3.3. Extensión.....	61
2.3.4. Compactación.....	62
2.3.5. Limpieza, señalización y puesta en servicio.....	63
2.3.6. Fallos prematuros una vez puesta la carretera en servicio.....	64
3. AUSCULTACIÓN DE LOS TRAMOS DE ENSAYO.....	66
3.1. Equipo de medida del CRT.....	66
3.2. Medidas del CRT.....	69
3.3. Equipo de medidas acústica.....	71
3.4. Medidas del ruido de rodadura.....	74
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>80</b>
1. CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA UTILIZADA EN LOS TRAMOS EXPERIMENTALES.	80
2. EDAD DE LAS MEZCLAS.....	83
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
4. CORRELACIONES OBTENIDAS.....	92
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>98</b>
<b>ANEJOS.....</b>	<b>102</b>
Anejo I: Características de los betunes y polvo de neumático utilizados en obra....	102
Anejo II: Caracterización de la mezcla.....	112
Anejo III: Medidas de CRT y textura.....	121
Anejo IV: Ruido de rodadura.....	128

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

## 1. INTRODUCCIÓN.

En los últimos años, se ha venido produciendo una importante evolución tecnológica tanto de los métodos y procedimientos de construcción de capas de firmes, como en el empleo, utilización y o reutilización de una gran variedad de materiales. Así, debido a las necesidades actuales de aprovechamiento y reutilización de todo tipo de materiales, y la importancia cada vez mayor del impacto medioambiental que generan los materiales, es necesario estudiar diferentes procedimientos y métodos para poder utilizar estos materiales, y que a su vez cumplan las especificaciones técnicas necesarias, para su empleo y utilización en la obra.

La constante evolución y la necesidad de incrementar la competitividad de los pavimentos, hace necesario mejorar las características de las mezclas bituminosas mediante el uso racional y técnica de los modificadores.

Desde hace más de dos décadas España ha conocido una época de apogeo de los betunes modificados con polímeros. Se han empleado sobre todo en capas de rodadura, particularmente en mezclas porosas y en microaglomerados en caliente de granulometría discontinua para capas delgadas.

La novedad ahora está en el polímero que se utiliza: caucho procedente de la trituración de neumáticos que han llegado al final de su vida útil, lo que oficialmente ha dado en llamarse neumáticos fuera de uso (NFU's).

La problemática ambiental que desde hace tiempo ha preocupado tanto a las Administraciones como a los propios ciudadanos por los millones de neumáticos en desuso que se rechazan en todo el mundo, han hecho que se buscaran soluciones para encontrar salida a este residuo. La gestión eficaz de estos residuos es primordial para preservar y mejorar las condiciones ambientales actuales.

La Directiva Europea 1999/31/CE marcó un antes y un después en la gestión de este tipo de residuo ya que en ella prohíbe el vertido de neumáticos enteros en vertedero a partir del 16 de julio de 2003 en todos los países que forman parte de la Unión Europea. Por este motivo, en España se publicó el 5 de Octubre de 2001 el Plan Nacional de neumáticos de fuera de uso donde establece la prohibición de vertido de NFU's troceados a partir del 1 de enero de 2006. Además, en el plan y en los artículos 542 y 543 del PG 3 establece que siempre que sea técnica y económicamente viable se priorizará la utilización de NFU's en las mezclas bituminosas.

Varios estudios en todo el mundo ponen de manifiesto la posibilidad de utilizar el polvo de neumático en las mezclas bituminosas y en esta tesina en concreto, se analizará cómo afecta la utilización del polvo de neumático sobre las características superficiales del pavimento, en concreto de una mezcla discontinua M-10.

Las demandas de la sociedad respecto de las características superficiales de los firmes han evolucionando de una manera muy notable en el transcurso de los últimos cincuenta años. Hace medio siglo los estudios sobre la resistencia al deslizamiento estaban en sus comienzos, la preocupación de los ingenieros por la regularidad superficial se limitaba a reparar los baches y nadie se planteaba hablar del ruido de rodadura.

El panorama hoy día ha cambiado, y tanto los ciudadanos, en general, como las Administraciones de Carreteras se van volviendo más exigentes en cuanto a las características superficiales de los pavimentos.

En muchos países del mundo cada vez es mayor la preocupación de la población por la contaminación acústica. Según el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), la principal causa de la contaminación acústica en una ciudad es el tráfico y la principal contribución a esta contaminación, en general, procede de la interacción de los neumáticos de los vehículos que circulan a velocidades superiores de 40 km/h y la superficie de rodadura.

La preocupación es tal que hace mucho tiempo que se aportan adelantos tecnológicos en el campo de los firmes silenciosos. Se están llevando a cabo estudios de investigación sobre las aplicaciones de mezclas bituminosas en caliente con el objeto de mejorar sus prestaciones técnicas y reducir el ruido de rodadura, utilizando polvo de neumáticos usados en su fabricación. Se buscan dos objetivos claros: por un lado, la revalorización de un residuo como son los neumáticos fuera de uso y por otro la reducción de la contaminación acústica.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que las mezclas fabricadas con polvo de neumático, especialmente las destinadas a capas de rodadura, deben mantener las condiciones de servicio que tienen las mezclas originales. Es decir, es necesario asegurar que estos pavimentos asfálticos no empeoren la calidad de las carreteras

sino que además de cumplir con las especificaciones necesarias le aporten mejoras a las características superficiales del firme.

## 2. OBJETIVOS

El principal objetivo de esta tesina es analizar el efecto que la adición de caucho procedente de la trituración de neumáticos fuera de uso en un microaglomerado tiene sobre sus características funcionales, especialmente la textura, la resistencia al deslizamiento y la sonoridad, a partir de las medidas realizadas sobre diferentes tramos experimentales a escala real. Los tramos están contruidos con una mezcla tipo M-10 de composición fija, en la que se han utilizado tres tipos de ligantes: un betún modificado con polvo de neumático incorporado en planta por vía húmeda, el mismo betún anterior al que se incorporará diferentes contenidos de polvo de neumático por vía seca y un betún modificado con polímeros BM-3c, que servirá de referencia.

El interés del estudio radica en:

1. Realizar el seguimiento de la fabricación, extendido y compactación de una mezcla M-10 con diferentes tipos de betún, a partir de las formulaciones de trabajo estudiadas en el laboratorio, utilizados en los diferentes tramos experimentales que se ejecutaran.
2. Analizar el comportamiento de los diferentes tramos mediante la auscultación que se realizaran al cabo de varios meses de la ejecución de los tramos.



# CAPÍTULO II.

## ESTADO DEL ARTE

---

### **1. LA PROBLEMÁTICA DEL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S).**

Muchas son las inversiones económicas que destinan empresas, universidades y organismos gubernamentales en la investigación para desarrollar nuevas técnicas y nuevos materiales para la construcción o rehabilitación de firmes que garanticen la durabilidad, el confort y la seguridad.

En los últimos años, ha tomado mucho protagonismo en la sociedad que vivimos el deterioro que está sufriendo el medio ambiente debido al crecimiento de las ciudades y a la intensificación de la actividad humana. La tecnología y el ritmo con que han disminuido los recursos naturales no renovables han influido enormemente en la concienciación ecológica de la población a nivel mundial. Por este motivo se ha creado una necesidad de aprovechamiento y reutilización de todo tipo de materiales.

Uno de los problemas que ha tomado mucha fuerza es la gran cantidad de neumáticos que se generan a nivel mundial y que una vez llegan al final de su vida útil hay que gestionar de forma eficaz.

A finales de los años 90 este material procedente del transporte por carretera, los neumáticos fuera de uso (NFU's), ha pasado a primera plana en la unión europea y en nuestro país. En efecto, se ha estimado que la unión europea genera cada año unos dos millones y medio de toneladas de neumáticos de desecho. En España se generan

cada año unas 300000 toneladas de NFU's, poco más o menos, de las que el 80% están constituidas por caucho, y el resto por fibra textil y cables de acero. Las directivas europeas, la normativa española y la continua investigación han ido abordando desde distintos frentes la problemática de un residuo que crece con los progresivos niveles de motorización de un país.

El enorme incremento de NFU's que se acumulan en todo el mundo ocasiona un serio problema medioambiental. Aunque los NFU no constituyen en sí un residuo ni tóxico ni peligroso, los volúmenes en que se producen, las dificultades de almacenabilidad, su forma favorecedora de almacenar agua a cierta temperatura creando un ambiente propicio a la proliferación de insectos, la toxicidad de los gases que se producen en caso de incendio, etc., obliga a que se tomen medidas para su aprovechamiento y eliminación.

La valorización es hoy en día una opción deseada para todos los residuos. Para cada tipo de residuo, esta valorización es distinta; reciclaje, reaprovechamiento, incineración con recuperación energética, etc.

A pesar de la amplia gama de posibilidades de empleo, en nuestro país no se aprovecha todo el potencial que tienen los NFU y las cantidades consumidas en aplicaciones de reutilización, reciclado y recuperación energética son todavía inferiores al volumen generado. En la siguiente tabla, se incluye las toneladas y el porcentaje que representan éstos respecto a la generación de este residuo tanto en la UE como en España:

Año 2004	UE de los 15		España	
	T NFU	%	T NFU	%
Generación	2.796.000	100	305.718	100
Recauchutado	325.000	12	37.173	12,2
Reciclado de material	852.000	30	42.500	13,9
Valorización energética	901.000	32	52.500	17,2
Vertido	414.000	15	153.787	50,3
Exportación y reutilización	304.000	11	19.758	6,4

Tabla 2.1 Modalidades de tratamiento de los NFU en España y la UE de los 15 (2004). [Ref.3]

Este alto porcentaje de vertido es indicativo de la especial dificultad de gestión de residuo, sobre todo como se verá más adelante, en donde se han redactado directivas que afectan directamente a los neumáticos fuera de uso (NFU).

Con el fin de fomentar y mejorar la gestión de los NFU's, y aprovechar adecuadamente las ventajas que aportan estos residuos, la Administración Española, tanto la Central como Autonómica, ha emitido los instrumentos legislativos y normativas técnicas que regulan las condiciones de utilización del neumático.

## 2. MARCO NORMATIVO PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS NFU'S

La legislación tanto a nivel Europeo como a nivel nacional se ha hecho eco de la problemática ambiental que se está viviendo desde hace tiempo.

La primera referencia obligada a las directivas europeas que afectan directamente a los NFU es la Directiva 75/442/CEE, de 15 de Julio de 1975, sobre residuos, modificada por las Directivas 91/156/EEC, de 18 de marzo de 1981, 91/692/EEC, de 23 de diciembre de 1991 y por la Decisión de la Comisión Europea 96/350/EC, de 24 de mayo de 1996. Se trata de la Directiva fundamental de la legislación sobre residuos, en la que se establecen los criterios y la metodología para su correcta gestión.

La Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999, sobre vertido de residuos, prohíbe el vertido de neumáticos enteros en vertederos a partir del 16 de julio de 2003 y troceados a partir del 16 de julio de 2006. En ambos casos se excluyen los neumáticos de bicicleta y los neumáticos cuyo diámetro exterior sea superior a 1.400 mm.

La Directiva 2000/53/CE, de 18 de septiembre de 2000, relativa a los vehículos al final de su vida útil, regula la retirada de los neumáticos de los vehículos fuera de uso para fomentar el reciclado, asegurando con ello que no acaban en los vertederos.

La primera referencia española es La Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos que regula lo relativo a la producción y gestión de los residuos, (y por lo tanto a los NFU). El criterio básico de esta ley es el llamado "principio de jerarquía". Tal como consta en su artículo 1, esta Ley tiene por objeto *prevenir* la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión y fomentar, por este orden, su *reducción*, su *reutilización*, *reciclado* y otras formas de *valorización*.

Dicha ley, en su artículo 5 dicta que la Administración General del Estado, mediante la integración de los respectivos planes autonómicos de residuos, elaborará diferentes planes nacionales de residuos, en los que se fijarán los objetivos específicos de reducción, reutilización, reciclado, otras formas de valorización y eliminación; las medidas a adoptar para conseguir dichos objetivos, los medios de financiación y el procedimiento de revisión.

Algunas Comunidades Autónomas han establecido programas concretos de gestión de neumáticos fuera de uso: Asturias, Castilla y León, Castilla-La Mancha, Islas baleares, Extremadura, Navarra y Aragón entre otras. En general estos programas aplican las disposiciones contenidas en la Ley 10/1998 de residuos.

El segundo documento legislativo que afecta a los NFU's es el Real Decreto 1383/2002, de 20 de diciembre, sobre gestión de Vehículos al Final de su Vida Útil, que contiene requisitos reguladores para la gestión de los NFU's que proceden del desmontaje de los mencionados vehículos.

El tercer instrumento legal es el Real Decreto 1481/2001, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero, que contiene las prohibiciones del vertido de los NFU's antes mencionadas.

El Real decreto 1619/2005 sobre la gestión de neumáticos fuera de uso establece las directrices para la gestión de residuos de NFU. En este decreto se impone a los productores la obligación de hacerse cargo de la gestión de los residuos derivados de

sus productos garantizando su recogida y gestión, de forma individual o participando en sistemas integrados de gestión.

El primer Plan Nacional aprobado el 5 de octubre de 2001 [Ref.3], prioriza el reciclado de este residuo respecto a su valorización energética y prohíbe expresamente el vertido de neumáticos enteros o troceados a partir del 1 de enero de 2006. Además, en el plan se establece que: *“En las obras públicas en que su utilización sea técnica y económicamente viable se dará la prioridad a los materiales procedentes del reciclaje de NFU.”*

Actualmente se cuenta ya con el Plan Integrado de residuos, que contiene, en su Anexo 4, un segundo Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (2007-2015). Uno de los objetivos fijados en el II Plan es el reciclado del 50 % en peso de los NFU generados, correspondiendo el 40% de la cantidad total a su utilización como materiales constituyentes de mezclas bituminosas para pavimentos de carreteras y el 10% restante a la utilización en otras aplicaciones industriales [Ref. 3]. En el anterior plan el objetivo fijado para el reciclado era el 25%. El plan se revisa de forma periódica actualizando las cifras y los objetivos.

Hasta el momento actual se han constituido dos Sistemas Integrados de Gestión (SIG), uno de ellos denominado "SIGNUSEcovalor", constituido legalmente el 19 de mayo de 2005, al que están adheridos la mayor parte de los productores de neumáticos del mercado nacional, y el otro "Tratamiento de Neumáticos Usados - TNU" del que su entidad gestora es ASINME, constituido legalmente el 13 de julio de 2006, en el que participan gran parte de los importadores de neumáticos. Las entidades gestoras de ambos Sistemas son empresas sin ánimo de lucro que tienen como finalidad cumplir las obligaciones derivadas del Real Decreto sobre Neumáticos Fuera de Uso en nombre de sus clientes.

Por su parte, en octubre de 2002 la Dirección General de Carreteras publicó la Orden Circular 5bis/2002 en la que se modificaban los apartados correspondientes de los artículos del PG.3 relativos a mezclas bituminosas y lechadas (540, 542 y 543) de manera que "en las obras públicas en que su utilización sea técnica y económicamente viable se dará prioridad a los materiales procedentes del reciclaje de neumáticos".

En el año 2007 el Ministerio de Fomento ha publicado la Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y las mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso. Esta Orden Circular establece las condiciones para la utilización de polvo de caucho y hace referencia a directrices complementarias incluidas en *“El Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas”*.

El Manual es un documento que resultó de un encargo del Ministerio de Medio Ambiente al CEDEX, y que su redacción fue acordada con el Ministerio de Fomento. En el documento participaron también, además del CEDEX el Ministerio de Fomento y el Ministerio de Medio Ambiente, Universidades (Politécnica de Catalunya y Politécnica de Madrid), empresas fabricantes de betún (Repsol y Proas), aplicadores (Probisa, Asfaltómeros, Collosa y Pas), trituradores (Renecal), Laboratorios(CIESM), y el Consorcio del caucho. El Manual pretende recoger el estado del arte en cuanto a conocimientos y experiencias de nuestro país en este campo, para ayudar a los técnicos y Administraciones responsables de carreteras a utilizar adecuadamente este material, definiendo las condiciones técnicas que permitan su empleo.

### 3. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL.

Los neumáticos generalmente son estructuras radiales en su mayoría. Están constituidos por una banda de rodamiento elástica, una cintura prácticamente inextensible, una estructura de arcos radialmente orientados sobre una membrana inflada y acabando en unos aros inextensibles que sirven de fijación para las llantas de la rueda. [Ref.22]

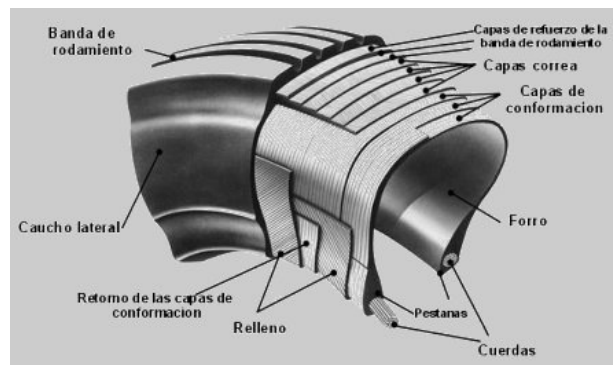


Fig. 2.1 Estructura neumático. [Ref. 22]

El grado de estudio y perfeccionamiento alcanzado en los neumáticos para cumplir mejor las misiones para las que fue diseñado, ha llevado a hacer coincidir en cada uno de ellos diferentes composiciones para cada una de sus partes.

Los neumáticos son estructuras muy complejas elaboradas con más de doscientos componentes. El principal componente es el caucho, que es casi la mitad de su peso y puede ser de distintos tipos: natural o sintético. Las proporciones son variables dependiendo del destino o la aplicación que vaya a tener el neumático. El caucho natural normalmente proporciona elasticidad, mientras que los sintéticos lo que aportan es estabilidad térmica. A pesar de sus diferencias, todos los cauchos tienen algo en común y es que son polímeros elastoméricos.

Durante la fabricación del neumático, los cauchos se someten al proceso de vulcanización consistente en entrelazar las cadenas de polímeros con moléculas de azufre mediante la acción de altas presiones y temperaturas. Los enlaces así formados son muy estables lo que hace que el proceso de desvulcanización sea difícil.

Otro componente que entra en proporciones altas es el negro de humo como carga de refuerzo y mejoras de la resistencia de los cauchos a la oxidación. El acero y material textil constituyen el tercer y cuarto componente en magnitud del neumático, con la misión de ser el esqueleto del mismo y soportar y transmitir las cargas y esfuerzos que sobre él se producen durante la circulación de vehículos. El óxido de zinc como catalizador de la reacción de vulcanización y otra serie de productos químicos que actúan como plastificantes, adhesivos, etc., terminan de darnos la composición de un neumático.

La clasificación de los neumáticos puede hacerse según el tipo de vehículos que los utiliza. Los de automóvil o camioneta generalmente tienen un radio de hasta 600 mm de diámetro exterior y pesan aproximadamente unos 8 kg mientras que los de

camiones tienen un diámetro hasta 1400mm y pesan aproximadamente unos 65 kg. Los neumáticos de motocicleta, bicicleta y otros tipos de vehículos cabría clasificarlos en apartado distinto.

La diferenciación entre neumáticos de turismo y camión es debida al distinto contenido de caucho. En los turismos el contenido de caucho natural es del orden del 65 % del caucho total y en los neumáticos de camión es aproximadamente del 72 %.

En un neumático de tipo medio, las proporciones de los componentes pueden variar en función del tipo de neumático y del fabricante, aunque generalmente se aproximan a las que se exponen a continuación en la tabla 2:

Material	Turismo/Servicios	Camión
Caucho	48	45
Negro de carbono y sílice	22	22
Metal	15	25
Textil	5	-
Óxido de cinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	5

Tabla 2.2 Composición aproximada de los neumáticos. [Ref. 11]

### 3.2 TRITURACIÓN Y MOLIENDA DE LOS NFU.

Como se ha comentado anteriormente, la Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999, sobre vertido de residuos, prohíbe el vertido de neumáticos enteros en vertederos a partir del 16 de julio de 2003 y troceados a partir del 16 de julio de 2006. Por este motivo, las políticas de gestión del residuo consideraron la necesidad de la trituración de los neumáticos y de investigar nuevas alternativas para aprovechar adecuadamente las ventajas que aportan estos residuos. Además, muchas de las posibles aplicaciones de los NFU, que se describirán más adelante, exigen una trituración previa. Este proceso es muy dificultoso ya que los NFU coordinan elasticidad con resistencia a la perfección y además están ayudados por su componente de acero.

En cualquiera de los procesos que se describen es necesario un *paso previo de trituración* del neumático fuera de uso hasta tamaños de 10-20 cm. Esto se realiza a través de trituradoras formadas por dos o más ejes paralelos de cuchillas que giran a distintas velocidades, que no suelen superar las 15 r.p.m, para favorecer la incorporación del neumático. Las cuchillas que tienen espesores de aproximadamente 10 cm., tienen en sus bordes salientes en forma de garfio que ayudan también a la introducción del neumático.

La separación de los ejes nos define el tamaño de los trozos conseguidos, pudiendo realimentar los más gruesos para obtener tamaños inferiores. Trituradores de este tipo existen varios en España ya que es un paso previo importante en centros de recogida para disminuir el volumen de los neumáticos.



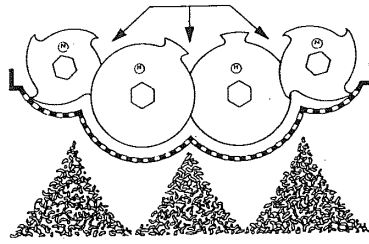


Fig.2.3 Reja de control de tamaños. [Ref. 11]

Si lo que se desea son tamaños inferiores a varios mm es necesario pasar a un *proceso de molienda*. Normalmente se puede hacer: por molido a temperatura ambiente o por criogénesis. [Ref. 11 y 21]

◆ Molido a temperatura ambiente.

Se trata de hacer pasar el triturado por molinos clásicos constituidos por un rotor y el estator que lo rodea. Previamente al molido ha habido que separar el componente metálico para evitar daños al molino, lo que normalmente se hace con separadores magnéticos dispuestos sobre las cintas. Se trata de equipos más ligeros que los trituradores, tanto en peso como en potencia, y su rendimiento es más bajo. Todo el proceso se realiza a temperatura ambiente, aunque la energía transmitida al caucho durante la molienda eleva su temperatura hasta 80 ° C.

La molienda que procede de este tipo posee mayor superficie específica y por tanto es más reactiva y absorbente con el betún, produciendo en menor tiempo y a menor requerimiento de temperatura, mayores propiedades de viscosidad. En contra, para llegar a tamaños de partícula más reducidos, se requiere mayor consumo energético y mayor desgaste de la maquinaria empleada; por lo que es más caro.

◆ Molido por criogénesis.

Consiste en enfriar el NFU a temperaturas por debajo de los - 60° C para conseguir rigidez y poder molerse con molinos clásicos de impacto y bolas. El enfriamiento se consigue, haciendo entrar en contacto el neumático troceado con nitrógeno líquido existiendo diversas formas de hacerlo.

Según varios expertos, la partícula procedente de este tipo de molido no es la más adecuada para la utilización en los betunes debido a las características de corte angular, que le confieren una superficie específica menor; necesitando mayores tiempos de reacción o "digestión", mayor temperatura y produciendo menores viscosidades al betún. Además, debido a la baja temperatura se favorece la condensación del vapor de agua presente en el ambiente, con lo que el polvo de caucho obtenido debe secarse antes de su almacenamiento.

Por lo tanto, podemos decir que tanto la forma de trituración, la granulometría de las partículas y el contenido de contaminantes metálicos y textiles afectan a las propiedades del polvo de caucho. Además, según las especificaciones técnicas propuestas en el Manual, para la utilización en mezclas bituminosas, se precisa que el caucho reciclado tenga tamaños inferiores a los 2 mm.

### 3.3 APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS

Una vez que el neumático ha cumplido su ciclo de vida útil para el que fue diseñado, tiene diferentes caminos a seguir como son: el recauchutado, tratamientos para obtener materias primas utilizadas en otros procesos de producción industrial o ingeniería civil y la valoración para la generación de energía.

➤ Recauchutado

Es una práctica bastante extendida que permite disponer de neumáticos seminuevos ya que mantienen del antiguo la carcasa y se aplica una banda nueva de rodadura. Es más ventajoso para los neumáticos de camión que para los de los turismos.

➤ Tratamientos para obtener materias primas utilizadas en otros procesos de producción industrial o ingeniería civil

Sin sufrir ninguna transformación pueden ser empleados en: arrecifes artificiales, defensas de muelles y embarcaciones, barreras sonoras, etc. Si los neumáticos están en trozos o en tiras como: rellenos ligeros, drenaje de gases en vertedero, recogida de lixiviados... Como material granulado o polvo en: campos de fútbol, pistas de atletismo, pistas ecuestres, calzado, decoración, parques, baldosas, camas para ganado, carreteras, etc.

➤ Valoración para la generación de energía.

Los neumáticos pueden utilizarse como combustible en instalaciones de producción de energía, cementeras, industrias papeleras, etc. Esto es posible debido al poder calorífico que tiene los neumáticos, superior al del carbón y menos contaminante al contener menor porcentaje de azufre. Aunque los mayores obstáculos que se suelen mencionar son el temor a provocar emisiones gaseosas no autorizadas y la escasa ventaja económica de los neumáticos en comparación al fuel.

Además del rechazo que produce la implantación de una de estas instalaciones en la población local, el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso aprobado el 5 de octubre de 2001 prioriza el reciclado a la valoración energética. Esto es debido a que muchos consideran que la incineración es la forma más insostenible y peligrosa de tratar los residuos, puesto que no los elimina, sólo los traslada y dispersa, especialmente a través de la atmósfera.

Actualmente, se están desarrollando otros sistemas más limpios y menos contaminantes, cuya eficacia debe ser mejorada para convertirse en una alternativa de gestión. Estos tratamientos están integrados en el II PLAN NACIONAL DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (2007-2015). Estas tecnologías, como la pirolisis y la termólisis se encuentran en vías de investigación y desarrollo. Hasta la fecha, existen dudas sobre si las materias primas que son susceptibles de obtenerse, como aceites y negro de humo, tienen la calidad deseada, ni si las inversiones que son necesarias realizar están justificadas.

Las técnicas con mayor potencial de consumo de neumático son la valoración energética y el empleo del NFU en las capas asfálticas. Es esta última la que se está



impulsando con mayores esfuerzos por parte de las Administraciones tanto por su capacidad de consumir grandes cantidades de material reciclado como por tener mayor aceptación e interés medioambiental, aunque se deben considerar ciertas precauciones de empleo.

En este sentido, la utilización del polvo de neumático en las mezclas bituminosas constituye una solución interesante, además de las experiencias que tanto en nuestro país como en el resto del mundo abalan esta práctica.

## **4. INCORPORACIÓN DE POLVO DE CAUCHO EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.**

### **4.1 PROCEDIMIENTOS DE INCORPORACIÓN DEL CAUCHO EN LAS MEZCLAS**

Como se ha comentado anteriormente, se ha publicado en la Orden Circular 21/2007 el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y las mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso. En dicha Orden se contempla los dos sistemas clásicos de incorporación de polvo de caucho en las mezclas: *la vía húmeda y la vía seca*.

### **4.2 VÍA HÚMEDA**

Es la técnica que consiste en la mezcla previa del polvo de caucho con el betún para su posterior empleo como ligante en la mezcla bituminosa. El betún que ha estado modificado o mejorado con polvo de neumático es conocido como betún-caucho, y es el resultado de la interacción de los dos materiales. A continuación se comenta cómo ha ido evolucionando esta técnica hasta hoy en día.

#### **4.2.1 Antecedentes de la vía húmeda**

Los betunes con caucho procedentes de NFU para mejorar sus propiedades se conocen desde 1840 según M.A Heitzaman [Ref.21]. La incorporación del polvo de caucho procedente del triturado de neumáticos de desecho en betunes, se desarrolló comercialmente en EEUU en los años 60 con la patente de Charles McDonald para su aplicación en tratamientos superficiales y bacheos. En 1985, en Arizona y California comenzó a generalizarse el empleo de ligantes con caucho en mezclas bituminosas.

En los años 70 en Europa, especialmente en Bélgica y Francia, empezaron las pruebas con betún modificado de alta viscosidad con caucho en mezclas, pero la falta de plantas de trituración y el desarrollo de los ligantes modificados con polímeros (SBS, EVA, etc.) limitaron su empleo.

En nuestro país, se reinició la experimentación con este tipo de betún a mediados de los años 90 con algunos tramos experimentales en Sevilla y Madrid. Fue el primer betún con polvo de caucho de NFU a escala industrial y se realizó en central. Esencialmente se trataba de formular betunes modificados de acuerdo al artículo 215 del PG-3 utilizando contenidos medios (8-12%) de polvo de neumático reciclado.

Aunque los resultados fueros buenos, no hubo un desarrollo significativo debido a la dificultad para asegurar un abastecimiento uniforme de polvo de neumático.

Con la publicación del Plan de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006 se impulsó nuevamente el empleo de polvo de caucho en la fabricación de mezclas bituminosas. En el año 2002 se empezaron a utilizar dos equipos de fabricación "in situ" de betún con polvo de caucho, uno de los cuales fabricaba betunes del tipo BMAVC (Betunes modificados de Alta Viscosidad con Caucho). Con ellos se construyeron tramos en Cádiz, Madrid y Castellón. También se desarrolló un betún modificado con caucho estable que se utilizó en el tramo de Madrid. Ese mismo año se publicó la Orden Circular 5bis/02, en la que se prescribía la prioridad de empleo de los materiales procedentes del reciclaje de neumáticos en las mezclas bituminosas, siempre que su uso fuese técnica y económicamente viable. Es a partir del año 2004 cuando se han construido numerosos tramos con mezclas bituminosas fabricadas con betunes modificados/mejorados con caucho.

#### 4.2.2 Tramos realizados en España con el procedimiento vía húmeda

A continuación se adjuntan las tablas 3 y 4 con los tramos de prueba realizados y con sus características hasta el Diciembre del 2005. La primera tabla hace referencia a tramos donde el betún está fabricado en centrales de betún y en la segunda la mezcla está fabricada en el lugar de empleo.

Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de capa (cm) y tipo de mezcla	Caucho en el betún (%)	Betún (%)
C-433: Sevilla a Cazalla de la Sierra SE-30	1996	0,300	T2	3	-	5,7
	1996	0,300	T1	3	-	5,7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey	1996	0,330	T2	5	-	4,9
M-221 y M-222: Valdaracete a Brea de Tajo	2002	12	T3	5 (S-20)+ 5 (D-20)	10	5,6
Travesía de Badarán (La Rioja)	2004	0,7	-	-	-	-
Travesía de Argamasilla de Calatrava (Ciudad Real)	2004	0,5	-	-	-	-
A-6: Tordesillas	2005	0,8	T0	6 (S-12)	9	5,0

Tabla 2.3 Tramos realizados por "vía húmeda" con betún fabricado en central de betunes. [Ref.16 ]

Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de capa (cm) y tipo de mezcla	Caucho en el betún (%)	Betún (%)
A-372 y A-372: Ubrique - El Bosque	2002	16	T3	5 (S-20)+ 2,5 (F-10)	13%- 0,4mm	5,5
M-221 y M-222: Valdaracete AP-7	2002	12 +	T3	5 (S-20)+ 5 (D-20)	13	5,6
	2002	1,8	T1	4 y 6 (Abierta-12,5)	20	9
	2004	4,2		6 (Abierta-12,5)	20	9
	2005	11,4		6 (Abierta-12,5)	20	9
		11,0		5 (Abierta-12,5)	20	9
	2,1		3 (Abierta-12,5)	20	9	
VA-20: Ronda Este de Valladolid	2004	0,300	T0	6 (S-20)	13	5,5
ZA-611: Toro a Venialbo	2004	4	T2	4 (S-20)	13	5,5
VA-404: Medina del Campo a Matapozuelos	2004	0,820	T3	6 (S-12)	13	5,5
VA-113: Valladolid a Santovenia de Pisuerga	2004	0,150	T2	5	13	5,7
S-444: Revilla de Camargo - Puente Arce	2004	7,7	T2	3 + 6 (Abierta-12,5)	20	9
Urbano: P <sup>o</sup> Canalejas (Salamanca)	2004	7	-	4 (Abierta-12,5)	20	9
Urbano: Calle Soto. (Valladolid)	2004	1,2	-	4 (Abierta-12,5)	21	9
A-4: Tembleque	2004	1,2	T0	5 (abierta-12,5)	20	9
Ronda Este de Valladolid	2004	0,3	-	6 (S-20)	13	5,15
ZA-611: Toro-Venialbo	2004	4		4+4 (S-20)	13	5,2
				4 (S-20)	13	5,2
LE-420: Carrizo de la Ribera a Hospital de Órbigo	2004	4	T2	6 (S-12)	13	5,6
		0,3		6 (S-12)	20	6,6
Urbano: Paseo Juan Carlos I de Valladolid	2004	0,4	-	3 (M-10)	13	5,6
N-610: Becilla de Valderaduey -Benavente	2005	1,5	T1	5 (S-12)	13	5,5
A-6: Tordesillas	2005	0,8	T0	6(PA-12)	9	5,0
LE-232 Sahagún-Almanza	2005	1	T3	4	13	5,5

Tabla 2.4 Tramos realizados por “vía húmeda” fabricando el ligante en el lugar de empleo. [Ref. 16]

#### 4.2.3 Aspectos técnicos de la interacción betún-polvo de neumático.

Cuando el betún y el polvo de caucho se mezclan juntos hay una interacción entre ambos materiales. Esta interacción, definida como reacción betún-caucho, está afectada por distintas variables. Especialmente, la reacción está influenciada por:

- ◆ Temperatura de mezclado.
- ◆ El tiempo durante el que la temperatura permanece elevada.
- ◆ El tipo y cantidad de energía mecánica aplicada.
- ◆ El tamaño y textura del polvo de caucho.

La temperatura de mezclado, el tiempo y la energía mecánica son parámetros del proceso de producción que pueden ajustarse, dentro de unos límites, para obtener el producto deseado.

Según diversas investigaciones [Ref.17 y Ref.18] cuando el polvo de caucho se incorpora a un betún a elevada temperatura, las partículas del caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del betún (los aceites aromáticos) y se hinchan. La reacción no termina con una fusión del polvo en el betún, sino que se puede asimilar a la de una esponja seca, dura y comprimida que se coloca en un baño de agua. A medida que la esponja absorbe agua se hincha y ablanda. El polvo de caucho se comporta de una manera similar: a medida que interacciona con el betún se va hinchando y ablandando también. Y, además, las partículas que han reaccionado se hacen más pegajosas y desarrollan una cierta capacidad adhesiva.

Con el hinchamiento disminuye la distancia entre partículas y el ligante se hace más viscoso, lo que es deseable para algunas aplicaciones de los betunes. Este fenómeno de hinchamiento se suele denominar "*digestión o maduración*".

Una forma de controlar el proceso es midiendo la viscosidad aunque hay que tener en cuenta que es la mezcla entre un sólido y un líquido.

Los mismos investigadores aseguran que la mezcla de betún con polvo de caucho es inestable y para que el caucho no se segregue la mezcla de betún y caucho debe estar en continua agitación. Hay dos variantes de mezclado dependiendo de si se hace en la planta de fabricación de mezclas bituminosas o en central de fabricación de betunes.

### **EN PLANTA**

En planta, para evitar la segregación se mezclan ambos componentes "in situ". En este caso la planta de fabricación del betún modificado se interpone entre el depósito del betún y la central de fabricación de mezcla bituminosa en caliente. De esta manera el ligante se añade a la mezcla inmediatamente después de su fabricación sin dar tiempo a que se segregue. En este caso, el contenido de caucho añadido al betún oscila entre el 18 y 23 % en masa sobre el peso del betún. El producto resultante presenta una viscosidad muy elevada pero no es estable al almacenamiento, por lo que se debe alimentar directamente al mezclador de la planta para la fabricación de la mezcla.

### **EN CENTRAL DE FABRICACIÓN**

Otra forma de realizar la mezcla es en las centrales de fabricación de betunes modificados convencionales, en cuyo caso deben ponerse los medios para estabilizar el betún modificado/mejorado de forma que se pueda trasladar a obra y almacenar sin que se segregue. Actualmente, hay empresas españolas que han desarrollado varios betunes con polvo de caucho que cumplen los requisitos de estabilidad al almacenamiento exigidos en los pliegos a los betunes modificados con polímeros. Pero para conseguir esta estabilidad al almacenamiento y transporte, el contenido de polvo de neumático debe ser inferior a los anteriores. Aproximadamente, los contenidos oscilan entre 5 y 15 %.

#### 4.2.4 Tipología de ligantes que incorporan polvo de neumático

Aunque existen numerosas variantes y sistemas, patentados o no, de producción de ligantes mejorados/modificados con caucho, parece haber un cierto consenso sobre la clasificación de los tipos de ligantes que incorporan polvo de neumático. Estos son: betunes modificados de alta viscosidad con caucho, betunes modificados con caucho y betunes mejorados con caucho.

➤ **BETUNES MODIFICADOS DE ALTA VISCOSIDAD CON CAUCHO (BMAVC).**

Se define como betunes modificados de alta viscosidad con caucho el ligante resultante de la interacción físico-química de un porcentaje igual o superior al quince por ciento (15%, en peso del ligante combinado) de polvo de caucho, procedente de la trituración de neumáticos fuera de uso, y en su caso de otros aditivos, con un betún asfáltico de los definidos en el artículo 211 del PG-3.

Se caracterizan esencialmente por su alta viscosidad a temperaturas elevadas, un elevado punto de reblandecimiento y unos valores de retorno elástico moderados. Existen tres tipos de BMAVC correspondientes con las tres penetraciones más bajas (15/30,35/50 y 55/70) de los betunes modificados del artículo 215 del PG-3. A menor penetración, mayor sería la viscosidad a alta temperatura y el punto de reblandecimiento. Por el contrario, los mejores valores de recuperación elástica y punto de fragilidad corresponderían al tipo de mayor penetración.

➤ **BETUNES MODIFICADOS CON CAUCHO (BMC)**

Se define el betún modificado con polvo de caucho como aquel ligante resultante de la interacción físico-química de betún asfáltico, polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso y, en su caso, aditivos, que cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3. El contenido de polvo de caucho suele ser superior al 12 % e inferior al 15 % en peso de la mezcla total.

➤ **BETÚN MEJORADO CON CAUCHO (BC)**

Se define el betún mejorado con polvo de neumático como aquel ligante resultante de la interacción físico-química de betún asfáltico, polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso y, en su caso, aditivos, que no cumple las especificaciones de los betunes modificados del artículo 215 del PG-3, pero sí las especificaciones de la tabla propuesta por el Manual. El contenido de polvo de caucho de estos betunes suele ser superior al 8% e inferior al 12 % en peso de la mezcla total.

De este modo se pretende recoger la gama de posibilidades de obtención de betunes con polvo de caucho que se utilizan en la fabricación de mezclas bituminosas, tanto fabricadas en central como in situ.

### 4.3 VÍA SECA

Es la técnica que consiste en la incorporación del polvo de caucho procedente del NFU directamente en la amasadora de la planta de fabricación de la mezcla

bituminosa, como si de un árido mineral se tratara, pero las partículas más finas interactúan con el betún modificando sus propiedades, consiguiendo mejorar el comportamiento de la mezcla bituminosa. Este proceso se utiliza cuando se quiere utilizar polvo de neumático como sustituto de una pequeña parte del árido fino. A diferencia del proceso de vía húmeda, este no requiere ningún equipo especial; solamente necesita de un sistema de alimentación (silo) que proporcione la cantidad deseada de polvo y que se incorpore en el momento en que los áridos lleguen a una cierta temperatura y antes de añadir el betún.

#### 4.3.1 Antecedentes de la vía seca.

Las primeras noticias sobre adición de trozos de caucho a una mezcla asfáltica, directamente en el mezclador de la central de fabricación, como si se tratase de una fracción más de árido, proceden de Suecia [Ref.16 y 21]. A finales de los años 60, ingenieros de ese país incorporaban por primera vez caucho en capas de rodadura. El procedimiento empleaba un 3 o 4 % en peso de la mezcla de granos de caucho de tamaños entre 1 a 6 mm. Su primer objetivo fue conseguir un aumento del coeficiente de rozamiento neumático-pavimento, pero además se observó que la adición del caucho suponía en la práctica una excelente técnica para limitar la formación de las frecuentes placas de hielo. La experiencia tuvo tal éxito que pronto se extendió y se patentó. En 1978 esta tecnología fue patentada en Estados Unidos como PlusRide. A finales de los años 80, Takellou desarrolló un sistema alternativo al PlusRide llamado TAK genérico. Este sistema no está patentado. Se trataba de mezclas con contenidos de caucho del 1-3% sobre peso de mezcla. Contenían dos fracciones de caucho bien diferenciada, una de gruesa de varios milímetros y otra más fina.

En 1994, mediante las primeras experiencias de Takellou y los tramos experimentales norteamericanos efectuados con este método, se construyeron unos tramos en Cataluña (Vacarisses y Constantí) a instancias de la Junta de Residuos de la Generalitat. Esta fue la primera experiencia que se hizo en España donde se utilizó polvo de neumático por vía seca. Las recomendaciones fueron consumir la mayor cantidad de polvo posible sin que ello entrañara riesgos. Se puso en obra una mezcla D-12 con un 2% de polvo de NFU y 5,7 % de betún. [Ref.14]

#### 4.3.2 Tramos realizados en España con el procedimiento de la vía seca.

A continuación se adjunta la relación de tramos experimentales que se han ejecutado en España con diferentes tipos de mezcla y diferentes dosificaciones tanto del ligante como de polvo de caucho hasta el año 2005 recogidos en el “Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas” del CEDEX.

Tramo	Año	Longitud	Tráfico	Espesor de capa (cm) y tipo de me	Caucho en el betún (%)	Betún (%)
Vacarisses	1994	2,6 km	T3	4 cm (D-12)	2%	5,5%
B-140 Sabadell-Mollet	1997	830 m	T0	5,8 cm (S-12)	2%	6,2%

Tabla 2.5. Tramos realizados por vía seca en Catalunya. [Ref.16]



Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de capa (cm) y tipo de mezcla	Caucho en el betún (%)	Betún (%)
C-433: Sevilla a Cazalla de la Sierra	1996	0,3	T2	3 (F-10)	1	5,7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey	1996	0,33	T2	3 (F-10) 5 (D-20)	1 1	6,1 5,2
Ayuntamientos de Alicante, Altea, Elche, Murcia, Orihuela y Torreveja (varios tramos)	1998 a 2005	65	-	3 (M-10)	0,5	5,2
Autovía del Noroeste	2003 a 2005	11	-	3 (F-10)	0,5	5,2
Generalitat Valenciana	1996 a 2004	18,5 4,5		3 (M-10) 5 (S-12)	0,5	5,2
Diputación de Alicante	1999 a 2002	15		3 (M-10)		
N-344: Travesía de Caudete	1999	1,1	-	3 (M-10)		
N-332: Favara	2004	2		3 (M-10)	0,5	5,2
Carretera de Castraz	2004	1,5	T2	5 (S-12)	1	5,34

Tabla 2.6. Tramos realizados por vía seca en España. [Ref.16]

Es importante destacar que aunque este proceso aún está en continua investigación, podemos decir que actualmente se conocen dos técnicas según el tamaño máximo del polvo de neumático:

- a) La que utiliza tamaños máximos de hasta 2mm. Como la superficie del polvo de neumático es reducida y el periodo de interacción es limitado, no hay tiempo suficiente para que la maduración se desarrolle en toda la masa de las partículas más gruesas del caucho. Por un lado, las partículas finas, las que pasan por el tamiz 0,5mm interaccionan con el betún a elevada temperatura y modifican la reología mediante un proceso parecido al de vía húmeda. Por otro lado, las partículas gruesas se comportan como un árido dentro del esqueleto mineral y se crea una interfase betún/caucho que cohesiona ambos materiales.
- b) La que utiliza tamaños máximos de 0,5mm y en menor proporción. El polvo de neumático actúa como modificador del betún añadido al mezclador. Es un sistema menos crítico que la primera técnica.

En la tecnología que se utiliza en España se va a tamaño reducido de partículas de caucho; generalmente inferior a 1mm y en muchos más casos inferiores a 0,5 mm.

Se debe tener en cuenta el hecho de que el caucho se hincha en contacto con el betún y debe esperarse un cierto tiempo para su puesta en obra. Con los tamaños de partículas que se están utilizando ahora en España la reacción se produce durante el transporte, aunque hay que comprobar cada caso antes de la puesta en obra.

#### 4.4 VÍA MIXTA

Existe una tercera vía, mucho menos experimentada y que no está recogida en el Manual del CEDEX ni en la Orden Circular 21/2007, como es la vía mixta, donde se emplea betún modificado/mejorado con caucho y la adición además de polvo en el mezclador. Parte del estudio de esta tesina es describir el comportamiento a escala real de unos tramos experimentales que parten de un estudio realizado en el Laboratorio de Caminos de la UPC en el que se caracterizó para una mezcla tipo M-10 con diferentes tipos de ligantes, de los cuales dos, eran con este tipo de procedimiento.

#### 4.5 MEJORAS QUE APORTA A LAS MEZCLAS LA INCORPORACIÓN DEL POLVO DE NEUMÁTICO.

El Departamento de Transportes de California (CALTRANS) en el artículo “Asphalt Rubber Usage Guide” publicado el 2003 recoge las siguientes ventajas que presentan los betunes modificados con caucho de alta viscosidad (BMAVC), que son los más utilizados en los estados de California, en las mezclas [Ref.7]. Éstas son las siguientes:

- ❖ Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión de las capas inferiores, que las mezclas fabricadas con betún convencional, debido a los elevados contenidos de ligante que permite esta técnica.
- ❖ Menor susceptibilidad a la temperatura que las mezclas bituminosas fabricadas con betún convencional.
- ❖ Mejor resistencia a las roderas que las mezclas que utilizan betún convencional, por su elevada viscosidad, punto de reblandecimiento y resiliencia (ligante más elástico y viscoso a las temperaturas altas de servicio).
- ❖ Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación que las mezclas convencionales, por el hecho de utilizar mayores dotaciones de ligante y por la presencia de los antioxidantes del caucho de neumáticos.
- ❖ Se consigue mejorar las características de las mezclas, con la consiguiente reducción de costes de mantenimiento y de interrupción del tráfico por reparaciones en el firme.
- ❖ Mantienen durante más tiempo el contraste con las marcas viales debido a que permiten introducir más betún y dura más el color negro de la superficie.

Es importante destacar que con los ligantes modificados convencionales se consiguen ventajas similares que con los ligantes modificados/mejorados con caucho (BMC, BC). Pero conviene tener en cuenta que con los precios actuales, los betunes con caucho permiten aumentar la viscosidad de una manera más económica que los polímeros nuevos; de manera que se hace posible la aplicación de betunes muy viscosos, con los que no se contaba hasta ahora por cuestión de precio.

Además, si se emplean en el rango de viscosidades medias, usuales de los ligantes modificados convencionales, los betunes con caucho no alcanzan el grado de



modificación reológica de estos ligantes, pero es suficiente para algunas aplicaciones y se reduce el coste, de manera que permiten un uso más amplio de tales betunes.

Como se ha comentado anteriormente, esta incorporación de polvo de neumático se puede hacer mediante procesos de vía seca y vía húmeda. En la modificación de las mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca se pueden conseguir una serie de ventajas y también hay que tener en cuenta lo siguiente:

UTILIZACIÓN VIA SECA	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tecnología accesible a las empresas fabricantes de mezclas bituminosas y no sólo a las que fabrican betunes modificados.</li> <li>✓ Trabajar directamente con el polvo de caucho de la zona sin costes de traslados adicionales.</li> <li>✓ Proceso que puede consumir gran cantidad de neumáticos.</li> <li>✓ Se obtienen mezclas bituminosas más baratas que con betunes modificados además de aprovechar un residuo (ventaja medioambiental).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Necesita procesos específicos de fabricación y condiciones controladas de ejecución (temperatura, extendido, compactación...).</li> <li>✗ Se precisan empresas adiestradas y con control de calidad riguroso.</li> <li>✗ No se garantiza la homogeneidad de la mezcla</li> <li>✗ Aumento de costes (polvo de caucho, incremento de la dotación de betún, equipos adicionales, incremento de la temperatura de fabricación) en comparación a las mezclas convencionales pero hay que compararlos con los beneficios obtenidos.</li> </ul>

Tabla 2.7 Ventajas e inconvenientes de utilizar procedimientos por vía seca.

Análogamente al proceso de vía seca, podemos ver en la tabla siguiente una serie de requisitos que hay que tener en cuenta a la hora de decantarse por la utilización del procedimiento de la vía húmeda.

UTILIZACIÓN VIA HÚMEDA	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Se puede suministrar a los productores de mezclas asfálticas como si se tratara de betunes modificados con polímeros.</li> <li>✓ Existencia de economía de escala, ya que una sola central suministra varias plantas asfálticas</li> <li>✓ Posibilidad de someterlo a control de calidad.</li> <li>✓ Estables al almacenamiento y transporte.</li> <li>✓ Mejora las características de las mezclas de forma económica y medioambiental.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Requiere inversiones de equipos adicionales.</li> <li>✗ Aumento de costes (polvo de caucho, incremento de la dotación de betún, equipos adicionales, incremento de la temperatura de fabricación) en comparación a las mezclas convencionales pero hay que compararlos con los beneficios obtenidos</li> <li>✗ Las altas temperaturas empleadas en algunos procesos puede aumentar las emisiones durante la fabricación. Hay estudios en USA [Ref.16] que demuestran estar dentro de los límites autorizados.</li> </ul>

Tabla 2.8 Ventajas e inconvenientes de utilizar procedimientos por vía húmeda.

#### 4.6 TIPOS DE MEZCLAS EN LAS QUE SE EMPLEA EL POLVO DE CAUCHO.

La experiencia que hay actualmente en nuestro país con mezclas bituminosas con polvo de neumático es mayoritariamente en capas de rodadura, tanto por vía seca como por vía húmeda. Aunque también hay experiencias con capas intermedias y con capas anti-fisuras [Ref.13]. Por tanto, debido a que el estudio de esta tesina es en capa de rodadura con mezclas discontinuas, en especial M-10, me centraré en este tipo de mezclas; aunque hay investigaciones tanto en mezclas drenantes como en mezclas densas y semidensas [Ref. 1 y 21]. Una mezcla discontinua es un tipo de mezcla bituminosa que está normalizada en el artículo 543 del PG-3. La particularidad de este tipo de mezclas es que elimina los áridos de los tamaños intermedios (entre 2 y 4 mm), con los que se consigue un esqueleto mineral en el que los gruesos se apoyan entre sí y los finos rellenan los huecos dejados por éstos. Se obtiene una mezcla de gran macrotextura y resistente a las roderas, aún con elevadas dotaciones betún. Los espesores acostumbran a ser de 3 cm. Estas mezclas se pueden aplicar en firmes de nueva construcción y en rehabilitaciones superficiales de todo tipo (zonas deslizantes, superficies envejecidas, para reducir el ruido...). En las mezclas bituminosas el aumento de la dotación de ligante significa retrasar el envejecimiento y, por tanto, prolongar la vida de servicio. Además, el hecho de incorporar el polvo de caucho permite conseguir mezclas mejoradas para capas de rodadura de todo tipo (discontinuas, drenantes o convencionales) en las que la resistencia a las deformaciones plásticas y el elevado contenido de betún son factores esenciales para conseguir mezclas bituminosas duraderas.

## VÍA HÚMEDA

A partir de la experiencia que se tiene con los BMC y BC en capa de rodadura, el Manual recomienda para los distintos tráficos:

Mezclas bituminosas en capa de rodadura	Tráfico	Tipo de betún recomendado
Drenante	T00 y T0	BMC (entendiendo como tal aquel que cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3), en todas las opciones expresadas en las tablas 542.1 y 543.1 del PG-3
Discontinua	T1 Y T2	BMC (entendiendo como tal aquel que cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3), en las mismas condiciones que los betunes de penetración indicados en las tablas 542.1 y 543.1 del PG-3
		BC (entendiendo como tal aquel que NO cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3 pero sí cumple las especificaciones definidas en el Manual), en las mismas condiciones que los betunes de penetración indicados en las tablas 542.1 y 543.1 del PG-3
Densa o semidensa	T3 Y T4	BC (entendiendo como tal aquel que NO cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3 pero sí cumple las especificaciones definidas en el Manual), en las mismas condiciones que los betunes de penetración indicados en las tablas 542.1 y 543.1 del PG-3

Tabla 2.9 Aplicación recomendada de los ligantes modificados/mejorados con caucho en capa de rodadura [Ref.16]

## VÍA SECA

Del mismo modo que se ha hecho con la vía húmeda, se han hecho tramos de prueba con el procedimiento de la vía seca. Las experiencias que se han llevado a cabo recomiendan que para las capas de rodadura drenantes, discontinuas densas o semidensas, los tráficos adecuados para un buen comportamiento de las mezclas son los que están comprendidos entre T2 a T4.

Los tramos que se han ejecutado hasta la fecha en nuestro país con distintas dosificaciones y distintos tamaños de polvo de caucho para este tipo de tráficos són:

### ◆ Mezclas densas y semidensas

Con este tipo de mezclas se han hecho tramos con 2% de caucho y de 2 mm de tamaño máximo. Los contenidos de betún están entre el 5,7 y 6,2%. Las particularidades de este tipo de mezclas es que necesitan tiempos elevados de espera entre la fabricación y el extendido; además de una compactación prolongada hasta que el material está a temperaturas de 70°C.

También se han ejecutado tramos con el 1% de polvo de neumático con tamaños inferiores a los 0,5 mm. Estos tramos se ejecutaron en Castilla y León con una mezcla tipo S-12 con un porcentaje de betún del 5,3%. Estas mezclas necesitaron unos tiempos de espera de fabricación y extendido algo inferiores.

♦ Mezclas discontinuas tipo M y F y mezclas drenantes.

Este tipo de mezclas son las que cuentan con más kilómetros de prueba en Alicante y Murcia. Se utilizaron contenidos del 0,5 % de polvo de neumático de tamaños inferiores al 0,5 mm y con porcentajes entre 5,2 y 5,7% dependiendo de los casos y de las mezclas utilizadas. La particularidad de este tipo de mezclas es que los tiempos tanto de espera como la prolongación de la compactación se reducen considerablemente.

Varios de estos tramos están incluidos en la 2.5 y 2.6 expuestas anteriormente en el apartado 4.3.

## 5. CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DE LOS PAVIMENTOS

Normalmente, los técnicos cuando proyectan un firme le prestan mucha atención a la función estructural de éste y a veces no tanta al aspecto funcional. Sin embargo, esta característica del firme es primordial a medida que se exige mayores niveles de calidad.

Desde el punto de vista de la seguridad de la circulación, la propiedad superficial más importante es, sin duda, la resistencia al deslizamiento en tiempo de lluvia. El peligro que representa una falta de adherencia suficiente de los neumáticos a un pavimento mojado es particularmente importante y debe evitarse, para reducir los accidentes.

Otra característica superficial que cada vez se valora más en las carreteras principales de la red es la regularidad longitudinal.

La irregularidad del firme repercute, sobre todo, en la falta de comodidad del usuario; aunque también, en casos extremos, puede llegar a afectar a su seguridad. Además, también puede repercutir en los costes de circulación y en la durabilidad del firme debido a los efectos dinámicos de las cargas de los vehículos pesados, que pueden acelerar su deterioro.

La falta de regularidad transversal que proporcionan las roderas es un problema que fue muy importante años atrás. Actualmente y gracias a las continuas investigaciones que se han ido haciendo a lo largo de estos años que han posibilitado la mejora de las mezclas bituminosas, no suele darse más que en casos raros. Si las roderas llegan a aparecer, producen molestias e incluso inseguridad en la conducción.

Desde hace ya un tiempo y debido a la demanda de la sociedad de una mayor calidad de vida, el ruido de contacto neumático-pavimento o ruido de rodadura es una propiedad que se está exigiendo cada vez más, en las zonas próximas a las áreas urbanas. Se ha demostrado en algunos estudios que un pavimento ruidoso puede influir no sólo en la comodidad del usuario, sino en la salud de los habitantes próximos a las vías. En cambio, el ruido no tiene una incidencia directa en la seguridad de la circulación.

Otras características superficiales, como las propiedades ópticas de los pavimentos (la mayor o menor visibilidad nocturna) y la eliminación rápida del agua superficial que evite salpicaduras (que dificultan la visibilidad, sobre todo, en el caso de adelantamiento a camiones), han adquirido también cada vez más importancia, por su influencia en la comodidad y en la seguridad del usuario. La eliminación rápida del agua de lluvia y una buena impermeabilidad superficial repercuten también en la función estructural, ya que la preservan en cierto modo.

En la figura 2.4 se indica la influencia de las principales características superficiales de los pavimentos en la seguridad y comodidad de los usuarios de la carretera, así como en el entorno y en la economía de la circulación y explotación.

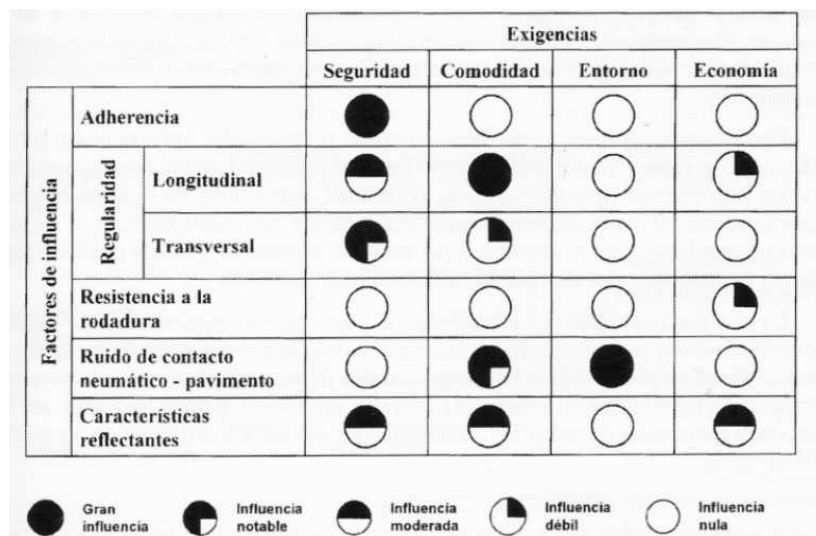


Fig.2.4 Relación entre las exigencias de los pavimentos y los factores de influencia. [Ref.28]

De entre todas las características que se han mencionado anteriormente se analizaran con más detalle aquellas que se han medido en el presente estudio como son: la textura, la resistencia al deslizamiento y el ruido de rodadura.

## 5.1 TEXTURA Y RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

La seguridad en la circulación de los vehículos a cualquier velocidad y a diferentes situaciones climatológicas son aspectos que preocupan tanto a los usuarios como a los técnicos que diseñan las carreteras. La pérdida de control que ocasiona el accidente por deslizamiento se debe normalmente a un conjunto de diversos factores. El comportamiento del conductor, el vehículo y sus componentes, la carretera en todo su conjunto y diversas influencias exteriores (visibilidad, temperatura, humedad...) son factores que son difíciles de cuantificar cuáles son más importantes en cada situación. Pero de todos ellos, uno de los que han puesto más empeño los técnicos es la influencia de la falta de adherencia del neumático al pavimento en los accidentes por deslizamiento.

### 5.1.1 Concepto de resistencia al deslizamiento y textura.

La resistencia al deslizamiento es el parámetro que permite evaluar la fricción entre el neumático del vehículo y la superficie de rodadura. Conseguir que haya suficiente

adherencia del neumático al pavimento tiene una doble finalidad: disminuir lo máximo posible la distancia de parada y permitir que el vehículo conserve en todo momento la trayectoria que quiere el conductor. Por ello, se exige a las carreteras dos tipos de adherencia, longitudinal y transversal, caracterizados por sus coeficientes de rozamiento (CRL y CRT). Un alto coeficiente de rozamiento longitudinal permitirá reducir la distancia de parada cuando se frena. El coeficiente de rozamiento transversal entra en funcionamiento en las curvas y en caso de derrape.

Las características del firme que contribuyen a la resistencia al deslizamiento son las pequeñas rugosidades o irregularidades superficiales de primer y segundo orden. Estas irregularidades son conocidas como microtextura y macrotextura. La microtextura, son irregularidades de longitud de onda inferior a 0,5 mm y sirve para definir la aspereza del pavimento. La macrotextura son las irregularidades comprendidas entre las longitudes de onda de 0,5 y 50 mm y está asociada a la rugosidad del pavimento.

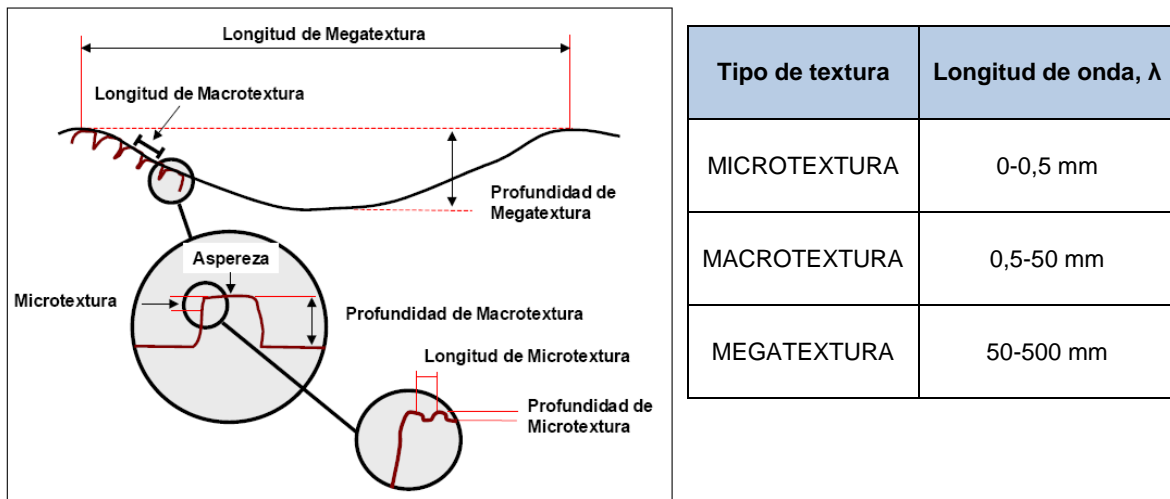


Fig. 2.5 Tipos de textura de un pavimento (Highways Agency, 1999)

Para que un pavimento ofrezca suficiente adherencia a cualquier velocidad de los vehículos, debe tener una macrotextura que ayude a la expulsión del agua y una microtextura que garantice la adherencia.

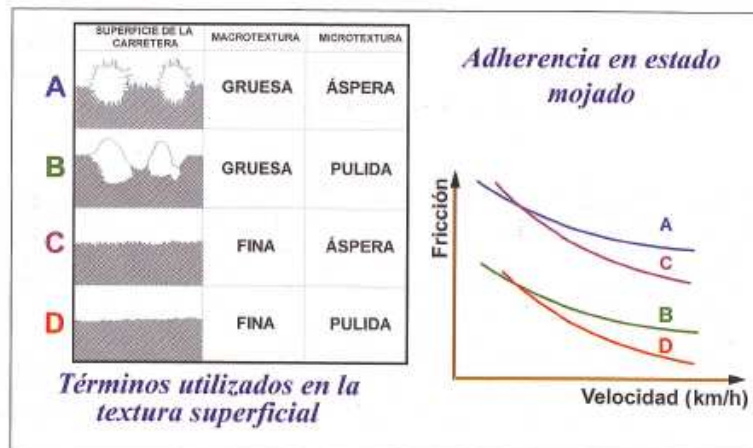


Fig.2.6 Textura superficial y su influencia en la adherencia del neumático al pavimento. [Ref.28]

Conociendo estas propiedades de la superficie para garantizar la adherencia entre el neumático y el pavimento, se comprende que para evaluar la capacidad de resistencia al deslizamiento, se puede proceder de dos formas distintas:

- Midiendo directamente el coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento mojado.
- Analizando la macrotextura o la capacidad de drenaje superficial del pavimento, para estimar la reducción de adherencia que se produce al aumentar la velocidad.

El coeficiente de fricción a baja velocidad depende del número de puntos de contacto seco entre el neumático y los áridos del pavimento que se producen tras la ruptura de la película de agua residual producida por la microtextura (mayor cuanto más áspera sea). Al aumentar la velocidad, disminuye la fricción. Esta disminución es menor cuando mejor sea la capacidad de evacuación del agua que proporciona la macrotextura (mayor cuanto más gruesa sea). Por lo tanto, es importante buscar el equilibrio entre las dos texturas para conseguir un buen comportamiento del firme.

### **5.1.2 Factores que influyen en el valor de la medida de la adherencia**

Además de la influencia de la microtextura y macrotextura que se ha comentado anteriormente, hay que tener en cuenta que los valores de la adherencia están influenciados, en mayor o menor medida, por una serie de factores.

Un primer factor, es el tipo de equipo que se utiliza para medir la fricción. Como se verá más adelante, hay una serie de equipos que miden la resistencia al deslizamiento, y cada uno tiene unos procedimientos a seguir y unos factores de calibración concretos que deben determinarse cuando se quiere contar con un valor estándar de resistencia. Otro factor, es la velocidad de medida. La mayoría de equipos de auscultación pueden utilizarse a distintas velocidades. A mayor velocidad, se obtiene menores valores de la fricción. Por este motivo, cuando la velocidad del equipo en el momento de la medición es distinta de la velocidad de referencia de cada equipo, se debe aplicar una corrección al CRT que está normalizado en cada ensayo.

La temperatura de medida también es otro factor que influye normalmente en el valor de la fricción, por lo que en muchos casos habrá que emplearse una corrección de la medida especificada en la norma de ensayo para llegar a un valor estándar.

Aunque el equipo y las condiciones de medida se encuentren estandarizados, las características del pavimento, coeficiente de rozamiento y textura, influyen además en los valores de su resistencia al deslizamiento. Los factores principales que hay que considerar, con relación a esto, son el tipo de superficie de rodadura, de la textura que tiene el pavimento (rugosa, fina, porosa) y el tamaño y forma de los áridos.

Otros factores importantes que tienen mucho que ver en la evolución de la resistencia del firme al deslizamiento son la edad de servicio del pavimento, el tráfico pesado que soporta y el grado de limpieza del pavimento. Para poder estimar estos factores y cuánto afectan al valor del CRT, habría que hacer estudios específicos en cada caso.

Para acabar, comentar que las condiciones ambientales, tanto en el momento de la medida como en un cierto periodo de tiempo anterior a ella, son también determinantes de la adherencia real que ofrece el pavimento. Los cambios de



temperatura y los periodos de humedad y sequedad hacen fluctuar los valores de las medidas (F. Achútegui, 1996).

En los años 80, Hosking y Woodford llevaron a cabo un estudio en donde demostraron que la temperatura ambiente influía en los valores obtenidos con péndulo; en cambio, con el SCRIM daba un conjunto de puntos de los que era difícil concretar algo. Pero, se dieron cuenta de lo que realmente influía en los valores de CRT era la variación de invierno a verano según una experiencia hecha en Inglaterra.

La subida inicial del valor del CRT se debe a la eliminación superficial de la película de ligante que envuelve los áridos y que se produce en un plazo de pocas semanas por efecto de la acción del tráfico.

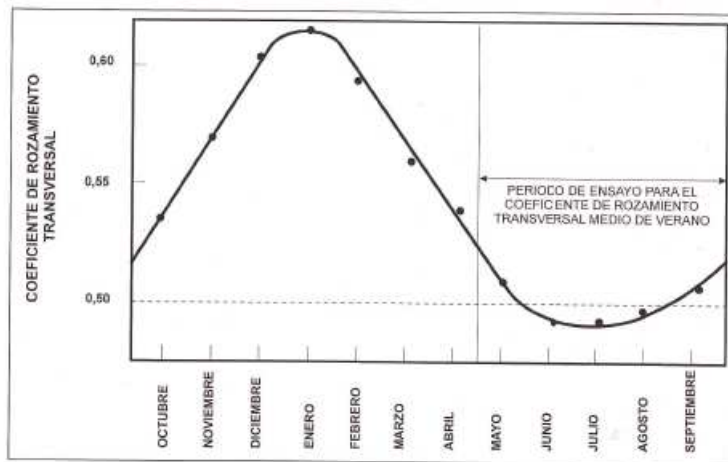


Fig.2.7 Variación estacional del CRT [Ref. 28]

A continuación, la disminución del valor del CRT que sigue se debe al pulimento de los áridos. El valor final que tiende el coeficiente de rozamiento es función tanto del coeficiente de pulimento de los áridos como de la IMD de vehículos pesados.

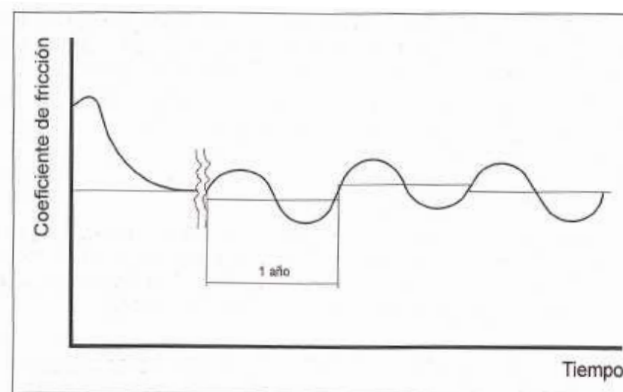


Fig. 2.8 Variación del coeficiente de rozamiento en el tiempo [Ref.28]

Por lo tanto, podemos ver que hay una serie de factores que se deben tenerse en cuenta antes y después de la toma. Por este motivo, el valor de una medición debe considerarse como indicativo de la resistencia al deslizamiento existente en las



condiciones de medida y siempre se deberá realizar un análisis interpretativo de los resultados.

### 5.1.3 Técnicas de medida

Las técnicas de medición están asociadas al tipo de equipo empleado. La variedad de equipos y de procedimientos en la medida, hace que éstos se clasifiquen de distintas maneras.

Hay equipos que miden la fricción, otros que miden la textura y otros que miden las dos características a la vez (equipos de doble función). También se pueden clasificar, dependiendo del modo de desplazamiento, como: manuales, remolcados o incorporados a un vehículo.

La diferenciación más importante entre ellos es que hay equipos que son estacionarios y otros que son móviles. Esta diferenciación es básica a la hora de elegir el tipo de equipo que se necesita, ya que los equipos estacionarios se utilizan para estudios de un tramo de investigación y tienen el inconveniente que se debe cerrar el tráfico de ese tramo. En cambio, los equipos móviles se utilizan tanto para los tramos de investigación como para las auscultaciones de las carreteras, ya que son equipos que no interfieren tanto en la circulación habitual de la carretera.

Los equipos de medida de la fricción pueden ser: equipos con zapatas deslizantes o equipos con ruedas deslizantes.

#### a) Equipos con zapatas deslizantes

Este tipo de equipos son los que miden el coeficiente de rozamiento que se produce cuando una zapata de goma desliza sobre un pavimento en unas condiciones prefijadas. El más conocido en nuestro país es el péndulo portátil que está recogido en la normativa NLT-174 y NLT-175. El inconveniente de este tipo de equipo es que es estacionario y requiere cortar el tráfico en el tramo que se está ensayando.

#### b) Equipos con ruedas deslizantes

Dentro de este grupo, podemos diferenciar los que realizan la medida con la rueda oblicua en el sentido de la marcha y los que la realizan con la rueda bloqueada.

De los primeros, aunque hay diferentes modelos recogidos en la AIPCR/PIARC, el más conocido y extendido es el SCRIM. Son equipos que determinan el coeficiente de rozamiento transversal de un modo continuo. Las características principales del método y como realiza las medidas está detallado en el apartado 3.2 del capítulo III de esta tesina.

En cuanto a los equipos que realizan la medida con la rueda bloqueada en el sentido de la marcha, éstos determinan el coeficiente de fricción longitudinal. Estos equipos se utilizan para determinar la adherencia de los pavimentos a altas velocidades.

## 5.2 RUIDO DE RODADURA

El ruido constituye una de las principales molestias que tiene que soportar la población, sobre todo en las grandes ciudades. Como consecuencia de la veloz y creciente urbanización urbana y del desarrollo de las infraestructuras viarias urbanas, los ingenieros viarios han llevado a cabo, desde hace más de 20 años, diversas investigaciones con el objetivo de reducir el ruido de rodadura neumático-pavimento, que constituye la principal fuente sonora a partir de que la velocidad del vehículo supera los 40 km/h.

### 5.2.1 Fuentes y mecanismos que generan el ruido de rodadura

Son varias las fuentes que producen el ruido debido al tráfico de los vehículos en carretera. Se pueden distinguir tres tipos de ruido: el que está originado por la propulsión del vehículo, el de origen aerodinámico del vehículo con el aire y el ruido de rodadura. En nuestro caso, el que más interesa al ingeniero civil es el ruido de rodadura y saber cuáles son los mecanismos que generan este tipo de ruido y como poderlo reducir.

Uno de los factores que influye en el ruido de rodadura es el tipo de firme que tengamos, ya que dependiendo de la textura, porosidad, rugosidad... cada firme se comportará de forma distinta.

Otro factor que influye decisivamente en la generación del ruido de rodadura es la velocidad del vehículo. Como norma general se puede indicar que, en el caso de vehículos ligeros circulando hasta 50 ó 60 km/h, la influencia en la generación el ruido es preponderantemente de tipo mecánico; a velocidades más altas, es de rodadura. Este límite es de 70 u 80 km/h para los vehículos pesados. [Ref. 24]

La relación neumático/pavimento se ha demostrado que afecta también al ruido de rodadura. El diseño y tipo de material del neumático con el pavimento produce una serie de mecanismos de generación de ruido. Estos mecanismos se pueden clasificar en dos grupos: vibratorios y aerodinámicos.

Los mecanismos vibratorios comprenden los impactos y la adhesividad neumático-pavimento. Las vibraciones se deben al choque de los tacos del neumático contra el pavimento. Son vibraciones locales y suelen ser la causa de las emisiones del ruido de baja frecuencia (<1000 Hz) y son importantes en el caso de superficies de rodadura rugosas, es decir, las que tienen alta megatextura.

Al pisar y abandonar el pavimento, los tacos del neumático se comprimen/descomprimen más o menos en función del impacto debido a la velocidad del vehículo y a la rigidez de los compuestos de la goma.

Las vibraciones tangenciales se producen por la movilización de los tacos del relieve del neumático en la dirección de marcha.

Los mecanismos de adhesividad neumático-pavimento corresponden al efecto de pegado-despegado (*efecto stick-snap*), similar al efecto ventosa, entre superficie de pavimento y relieve del neumático. Se producen movimientos tangenciales de los tacos del relieve del neumático al pisar el pavimento y derrapar ligeramente (*efecto stick-slip*).

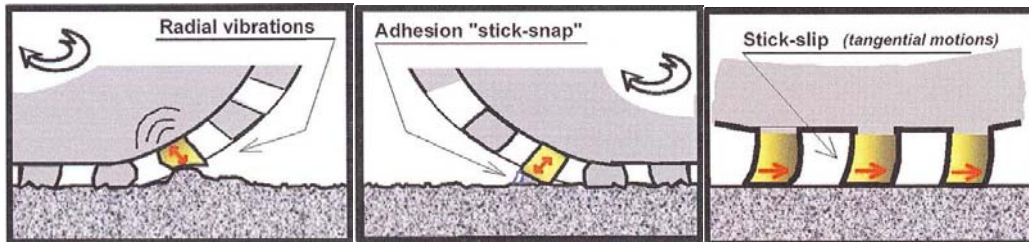


Fig.2.9 Mecanismos que producen ruido de rodadura. [Ref.27]

Los mecanismos aerodinámicos de generación de ruido de rodadura (*air pumping*) corresponden al bombeo del aire debido a las compresiones y dilataciones del aire atrapado en las cavidades limitadas por la banda de rodadura del neumático y la superficie del pavimento.

Estos mecanismos originan la amplificación y también la reducción del ruido de rodadura (efecto bocina). Estos mecanismos son los responsables de las frecuencias medias y altas (> 1000 Hz) del ruido de rodadura. El nivel de ruido producido en el bombeo de aire aumenta cuando las superficies de las capas de rodadura son lisas y disminuyen cuando son rugosas dentro de un cierto límite.

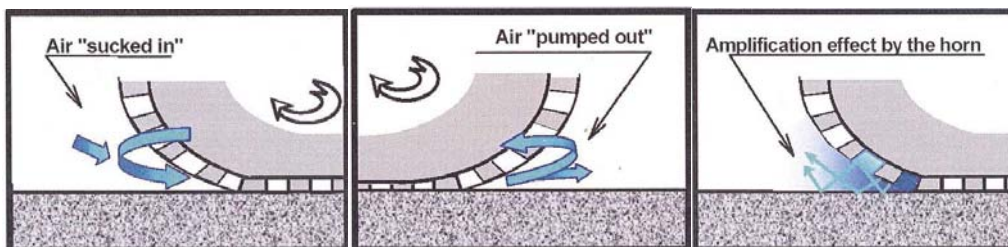


Fig.2.10 Mecanismos que producen ruido de rodadura. [Ref.27]

## 5.2.2 Técnicas y métodos de medida del ruido

Los métodos de medida del ruido se pueden clasificar en tres grandes grupos: métodos de medición directa, métodos de medida en laboratorio y métodos semiempíricos de estimación.

### MÉTODOS DE MEDICIÓN DIRECTA

En los métodos de medición directa en carretera se utilizan sonómetros que registran las señales que recogen uno o varios micrófonos y las tratan de diferentes maneras según el valor que se quiera obtener. El micrófono o micrófonos pueden estar fijos en la carretera o bien desplazarse a lo largo de ella.

#### 1.- MICRÓFONOS FIJOS

Con este tipo de condiciones de ensayo podemos distinguir los siguientes métodos:

##### A) Medidas con tráfico real

Las medidas de ruido con tráfico real sirven para resolver problemas concretos de contaminación acústica; pero no tienen gran interés desde el punto de vista

de las características superficiales ya que el ruido está fuertemente influenciado por la intensidad del tráfico.

B) Medidas al paso de un vehículo de ensayo en aceleración (método APB)

Este método, conocido en inglés como *Acceleration Pass-By* es el que históricamente se desarrolló primero. El método está recogido en la norma ISO 362:1998 y las condiciones de la superficie del tramo de ensayo están recogidas en la norma ISO 10844:1994.

Este método consiste en que el vehículo se aproxima a una velocidad constante hasta que llega a la zona marcada donde acelera a fondo hasta sobrepasar el tramo, tal como se ve en la figura 2.11

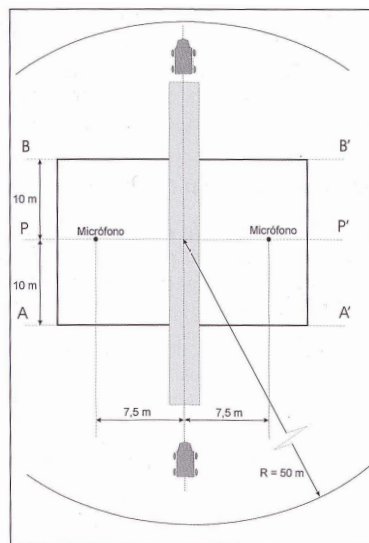


Fig.2.11 Medida del ruido con el método APB. [Ref.28]

Se registra el máximo nivel de ruido en varias pasadas del vehículo, y el valor medio se toma como representativo del ruido del vehículo en aceleración. En esta medida se superponen los ruidos del motor, escape, de origen aerodinámico y el de rodadura.

C) Medida al paso del vehículo de ensayo en punto muerto (método CB)

Este método, *Coast By*, es una variante del método anterior; se apaga el motor antes de llegar a la línea de medición y se pasa con el vehículo en punto muerto. Este es un método que caracteriza bastante bien el ruido de rodadura con el inconveniente que las medidas pueden estar influenciadas por el tráfico de fondo; por lo que hay que repetir las medidas varias veces para obtener resultados admisibles.

D) Medida al paso de un vehículo de ensayo a velocidad constante (método CPB)

Otra variante del anterior es el *Controlled Pass-By* que se ha utilizado mayoritariamente en Francia. Consiste en seleccionar unos pocos vehículos que cumplen una serie de especificaciones y se hacen pasar uno a uno, a velocidad constante y con el motor en marcha por el tramo a ensayar. En este

caso, para evitar la influencia del resto del tráfico, se acostumbra a hacer de noche o se cierra el tramo de ensayo, con las molestias que esto repercute.

#### E) Método estadístico del paso de vehículos (método SPB)

Este método se utiliza para caracterizar la influencia del pavimento sobre el ruido de la circulación que perciben los ciudadanos y compararlos con tráficos distintos. El *Statistical Pass-By* está estandarizado en la UNE-EN ISO 11819-1:2002. El método está basado en la medida del ruido emitido por un número significativo de vehículos representativos a distintas velocidades (vehículos ligeros, pesados con dos ejes y pesados con más de dos ejes).

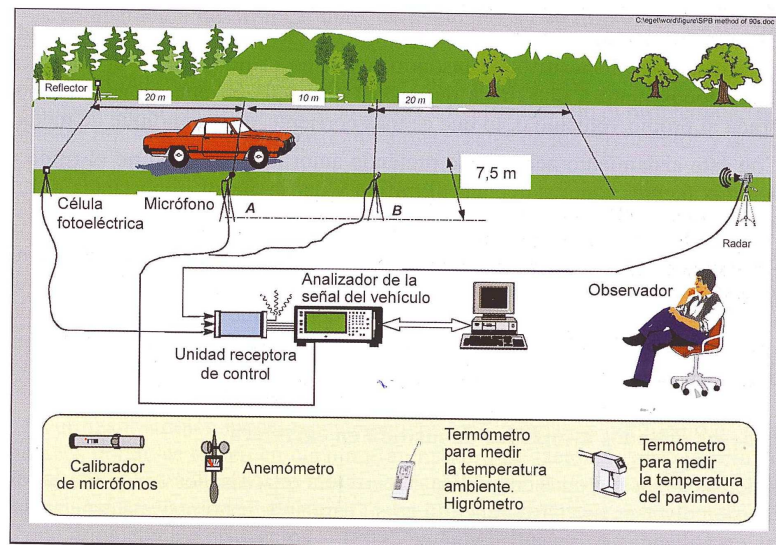


Fig.2.12 Esquema del método de medida SPB. [Ref. 27]

Con los valores medidos se determina el índice de ruido SPBI. Es un método muy adecuado en investigación y en estudios de comparación de puntos determinados y de la modificación de las propiedades sonoras del pavimento bajo distintas condiciones atmosféricas y de tráfico. Sin embargo, es un procedimiento de medida lento que sólo proporciona datos de un lugar concreto.

## 2.- MICRÓFONOS MÓVILES:

### A) Medidas de proximidad (método CPX)

Este método es el que caracteriza mejor el ruido de rodadura. Se disponen uno o varios micrófonos cerca de la superficie de contacto del neumático con el pavimento. La posición de estos micrófonos puede ser en la misma rueda del vehículo, en una cámara insonorizada al propio vehículo o, en un remolque insonorizado. Este último es conocido como cámara semi-anechoica que se detallará más adelante, ya que es el método que se ha utilizado para las auscultaciones de los tramos experimentales.

### **MÉTODOS DE MEDIDA EN LABORATORIO**

El método más utilizado en pruebas de laboratorio es el tubo de impedancia. El procedimiento de este método está normalizado en la EN ISO 10534-2:2001. El tubo de impedancia consiste en un instrumento en forma de tubo que mide la absorción acústica. Se emiten unas ondas que viajan a lo largo del tubo y son reflejadas o absorbidas por la muestra. Los micrófonos que se encuentran en las paredes del tubo miden el sonido resultante que, después de procesarlo, da el coeficiente de absorción. Este coeficiente de una superficie de rodadura depende del espesor de la capa, de la cantidad de huecos y de la interconectividad entre ellos. Esta medida también se puede hacer "in situ" donde se emplea un útil especial que adapta el tubo de impedancia a la superficie de la calzada.

### **MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DE ESTIMACIÓN**

Estos métodos de evaluación de los niveles de ruido de la circulación, no son métodos de medida, sino de previsión del ruido con sistemas más o menos sencillos de cálculo. Todos estos métodos son muy aptos para la elaboración de mapas de ruido y para el planeamiento, pero no consideran de forma precisa las características superficiales de los distintos pavimentos que hay.

### **5.3 ESTUDIOS REALIZADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE PAVIMENTOS QUE INCORPORAN POLVO DE NEUMÁTICO EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.**

Muchos son los estudios que se han llevado a cabo durante años a nivel estatal e internacional de los firmes, en especial de los firmes bituminosos ya que son los que más se han construido a nivel mundial. En este caso, se aportarán investigaciones que hagan referencia a las características superficiales que se han descrito anteriormente.

En los Estados Unidos de América es donde se han llevado a cabo más investigaciones de este tipo. El Departamento de Transporte de Kansas elaboró un estudio de ruido en el que se usó betún modificado con polvo de neumático en la fabricación de las mezclas asfálticas. En este estudio se midió el porcentaje de disminución de ruido que se obtuvo en los diferentes tramos.



TRAMO	AÑO CONSTRUCCIÓN	SECCIÓN con ASFALTO con polvo de neumático (%)	SECCIÓN con ASFALTO(%)
US-75 Project Osage County	1990	6,3	5,5
K-2 Project Sedgwick County	1990	7,4	5,75
Spec. (1990 Stand spec.)	1991	6,9	5,25
US-24 Project Jefferson County	Open graded	8,9	5,25

Tabla 2.10 Comparación de asfalto con polvo de neumático y asfalto normal. [Ref. 29]

El procedimiento utilizado para medir el ruido de rodadura fue el CPB (Controlled Pass-By), que en España es conocido como método de medición de vehículos de ensayo a velocidad constante. La velocidad de ensayo fue 55 mph.

Los laboratorios Volpe de la Federal Highway Administration (FHWA) hicieron una gran cantidad de mediciones de ruido mediante el método SPB a una velocidad de 88 km/h en distintos tramos de carretera. Una vez analizados los resultados, llegaron a las siguientes conclusiones:

- Los firmes de hormigón son 3 dB(A) más sonoros que las mezclas bituminosas densas.
- Los firmes de granulometría abierta son aproximadamente 1.5 dB(A) más silenciosos que las mezclas densas.
- Con camiones, los firmes de hormigón son 2dB(A) más sonoros y los de granulometría abierta son 0.5 dB(A) más silenciosos que los pavimentos con mezclas densa.

La Federal Highway Administration, en el 2002 a través de la National Center for Asphalt Technology (NCAT), realizó un estudio para correlacionar las mediciones del CPX con las realizadas a distancia. Para este estudio, diseñaron dos equipos. Uno para el Arizona Department of Transportation (ADOT) y el otro para la NCAT. Era un equipo con remolque que consistía en un vehículo y una cámara semianecoica.



Fig. 13 Equipo NCAT [Ref. 29].

La primera parte del estudio consistía en ver cómo influía el dibujo del neumático en la generación de ruido.

Tire Type	CPX Noise Level dB(A)
ASTM Slick	91.2
UniRoyal Tiger Paw	92.4
ASTM 501- Ribbed	93.8
Firestone FR 380	93.9
MasterCraft Glacier Grip	94.7
Goodyear Aquatread	94.9
Michelin Rain Forest	95.2

Tabla 2.11. Resumen resultados del CPX con los distintos neumáticos [Ref.29].

La segunda parte del estudio, fue realizar mediciones a distintas capas de rodadura de la zona Metropolitana de Phoenix y se compararon con las del equipo de la ADOT. Había una necesidad de evaluar la repetibilidad de los dos dispositivos, es decir, para determinar si los mismos resultados se obtenían con los dos remolques. Los resultados obtenidos fueron los que se muestran en la tabla 2.11.

Pavement Surface	Aquatred dB(A)		Michelin dB(A)		UniRoyal dB(A)	
	NCAT	ADOT	NCAT	ADOT	NCAT	ADOT
1 - PCCP	101.5	99.9	103.9	104.0	104.0	101.8
2 - ARFC	93.2	93.6	96.4	95.4	96.7	94.6
3 - PEM	96.7	95.9	98.6	97.8	98.2	95.8
4 - SMA	96.8	95.5	99.0	97.2	98.6	96.9
Average	97.0	96.2	99.5	98.6	99.3	97.2

**PCCP**= Portland Cement Concrete Pavement, **ARFC**= Asphalt Ruber Friction Coarse

**PEM**= Poursous European Mix, **SMA**= Stone Matriz Asphalt

Tabla 2.12 Comparación de resultados [Ref. 29].

Como se puede ver, la capa de rodadura ARFC es la que obtuvo menores valores de ruido. Esta capa de rodadura era un pavimento con un betún modificado con polvo de neumático.

Otro apartado del mismo estudio, fue realizar mediciones de CPX a diferentes mezclas de granulometría abierta, densa y másticos asfálticos. En la tabla 2.13, se ven las medidas realizadas en los estados de New Jersey, Maryland, Colorado y Virginia donde se relaciona los niveles de ruido con el tamaño máximo de árido en las mezclas. Se ve claramente que a medida que se aumenta el tamaño máximo del árido, y concretamente la textura, también aumenta el ruido. Estas mezclas son másticos asfálticos (Stone Mástic Asphalt), muy usados en EUA.



State	Noise Level dB(A)	Mix	Date Placed
NJ	100.5	19 mm	-
MD	95.5	9.5 mm	2002
MD	97.7	12.5 mm	2003
MD	98.9	12.5 mm	2003
MD	99.0	19 mm	1994
CO	96.2	12.5 mm	2002
CO	96.3	19 mm	2003
CO	96.9	19 mm	2002
VA	100.0	12.5 mm	2003
VA	99.6	12.5 mm	2003
VA	98.8	12.5 mm	2003
VA	97.6	9.5 mm	2003
VA	97.4	9.5 mm	2003
VA	98.4	12.5 mm	2003
VA	99.4	12.5 mm	2003
VA	99.6	12.5 mm	2000
VA	98.8	12.5 mm	2003

Tabla 2.13 Medidas de ruido en función del tamaño máximo de árido en las mezclas SMA. [Ref. 29]

En Italia se realizó una investigación comparando los niveles de ruido de pavimentos con mezclas de granulometría abierta y densa llegando a disminuir 3dB(A) las primeras. En este estudio también se destaca que en las mezclas de granulometría abierta se dan mayores niveles de ruido a bajas frecuencias y que está directamente relacionado con la macrotextura [Ref.30].

En Dinamarca se realizó una investigación sobre varios firmes flexibles de granulometría abierta donde se realizaron medidas del ruido con el método de pass-by. En la tabla 2.14 se adjunta las características de las mezclas.

<i>Descripción</i>	<i>Años</i>	<i>Textura (mm)</i>	<i>Coef. De Fricción</i>	<i>Espesor (cms)</i>	<i>Vacíos (%)</i>
Mezcla Abierta	3	0.139	0.68-0.71	2.7	9.3
Mezcla Abierta	3	0.119	0.72-0.77	3.5	8.7
Mezcla Abierta	3	0.197	0.69-0.74	4.0	5.2
Mezcla Densa con Caucho	2	0.069	0.70-0.78	3.1	3.3
Mezcla Abierta	4	0.125	0.78-0.83	-	3.3
Mezcla Densa	4	0.079	0.79-0.84	2.0	5.7
Mástico Asfáltico	4	0.108	0.73-0.76	5.0	3.5

Tabla 2.14 Características de capas de rodadura estudiadas en Dinamarca [Ref.30]

Las conclusiones a las que se llegó fueron que había unas variaciones de 2 a 3 dB entre las distintas carreteras y que las superficies de granulometría abierta con tamaños máximos de entre 8 y 12 mm presenta una reducción de 1 dB cuando se compara con una superficie de granulometría densa.

La FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories) desde su creación en 1989, emprendió un proyecto de gran magnitud que participan laboratorios y centros de investigación de diferentes países como: Austria, Alemania, Bélgica,

Holanda, Dinamarca, Francia, Suecia, Italia, Noruega, Reino Unido y Polonia es el conocido con el nombre de SILVIA (SILenda VIA) [Ref. 31]. Este proyecto tiene como finalidad proporcionar a las autoridades instrumentos que les permita planificar las medidas de control de ruido ocasionados por el tráfico de vehículos. Una de las medidas, entre muchas, es la investigación de pavimentos de bajo-ruido.

De entre todas las mezclas que se presentan en el estudio, destacar las mezclas poro-elásticas como un tipo de mezcla que tiene un alto contenido de vacíos interconectados y además tiene una cualidad elástica debido a la incorporación de granos de caucho, fibras u otros productos elastoméricos. En el 2005, Ulf Sandberg y Björn Kalman presentaron un informe de un estudio de unos tramos de prueba en Suecia en donde la capa de rodadura era poro-elástica. Eran tres mezclas distintas. Las dos primeras, mezcla Tokai y mezcla Rosehill, eran mezclas prefabricadas en paneles de 1x1 m<sup>2</sup> importadas desde Japón y U.K respectivamente. La tercera, mezcla Spenta, es una mezcla que se fabricó in situ.



Fig. 2.14 Mezclas poro-elásticas. Fuente: Proyecto SILVIA [Ref.31].

Los resultados que se obtuvieron con los dos procedimientos de medida, CPX y CPB demostraron que las mezclas que obtenían mejor resultado de absorción de ruido eran las spentab.

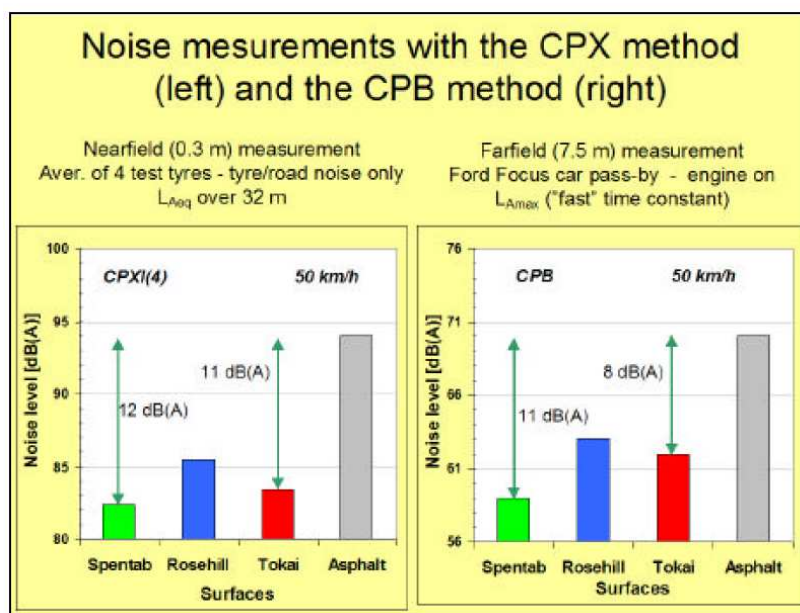


Fig. 2.15 Medidas de ruido de las diferentes mezclas [Ref. 31].

Aunque las mezclas no presentaron ni desprendimientos ni peladuras, si mostraron una pérdida de adherencia con la capa base. También añadieron el alto coste económico de este tipo de mezclas.



Fig.2.16 Detalle de la falta de adherencia entre capas [Ref. 31]

En España, la empresa COLLOSA [Ref.26] con colaboración con el CEDEX y la Fundación CIDAUT realizó y auscultó unos tramos de prueba en unas de las calles más transitadas de Valladolid con el objetivo de reducir la contaminación acústica. Las medidas de ruido se tomaron antes y después de la ejecución de los tramos con los métodos CPX y pass-by. Las características de las mezclas son:

	TRAMO1	TRAMO2	TRAMO 3
	Mezcla S-12 betún 60/70	Mezcla M-10 betún-caucho	Mezcla M-10 betún BM-3c
% Betún sobre áridos	4,97	4,95	4,86
Estabilidad Marshall / % cántabro vía seca	1.914	10,8	14,9
Deformación Marshall / % cántabro vía húmeda	2,48	16,4	21,3
% huecos mezcla	5,87	18,74	20,17
% huecos áridos	16,44	27,96	29,06
Inmersión-compresión (%)	87		
Ensayo en pista (µm/min)	14,2	2,2	9,5

Fig.2.17 Características de las mezclas utilizadas en los tramos de prueba. [Ref. 26]

Las conclusiones a las que se llegaron fueron que con la mezcla proyectada en el tramo 2 (mezcla M-10 con betún caucho) con el método CPX se alcanzaba una mejora media de 1dB (A) respecto al tramo 1. Mientras que si se comparaban las mezclas de los tramos 2 y 3 (con y sin caucho) presentaban valores similares comportándose desde el punto de vista acústico mejor la mezcla con caucho. Con el método pass-by la reducción de ruido del tramo 2 respecto al tramo 1 también es de 1dB (A).

# CAPÍTULO III.

## METODOLOGÍA

---

### **1. ESTUDIOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO.**

Esta tesina forma parte de un proyecto que se está realizando en el Departamento de Infraestructura del Transporte y Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña. Esta tesina parte de unos ensayos previos que se hicieron en el Laboratorio de Caminos donde se realizó una caracterización mecánica de una mezcla bituminosa tipo M-10 con la adición de polvo de neumático para después construir unos tramos de ensayo a escala real. A continuación se describen los objetivos, los procedimientos y los resultados que se obtuvieron en el laboratorio.

#### **1.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO.**

El objetivo del estudio fue determinar la fórmula de trabajo de la mezcla de un microaglomerado M-10 en función de su comportamiento mecánico al emplear cuatro betunes diferentes. Los ligantes que se seleccionaron para la investigación fueron:

- Betún modificado con polvo de neumático incorporado en planta (BMPN) por vía húmeda.

- Betún modificado con polvo de neumático incorporado en planta (BMPN) y la adición del polvo de neumático por vía seca del 1% de su peso correspondiente.
- Betún modificado con polvo de neumático incorporado en planta (BMPN) y la adición del polvo de neumático por vía seca del 2% de su peso correspondiente.
- Betún modificado con polímeros tipo BM-3c que sirvió de referencia.

El estudio planteaba distintos porcentajes de betún para elaborar las mezclas (4, 5 y 6 %) y mediante los ensayos Cántabro (seco y húmedo), el ensayo de tracción indirecta y el ensayo de pista donde se analizaron las propiedades de cohesión, adhesividad, resistencia a la tracción directa y resistencia a la deformación plástica de cada una de las mezclas fabricadas.

## 1.2 MATERIAL UTILIZADO

El material granular utilizado en el estudio es de origen granítico y calizo, que tienen una densidad relativa conjunta de 2.672 g/cm<sup>3</sup>. A continuación se adjunta la curva granulométrica

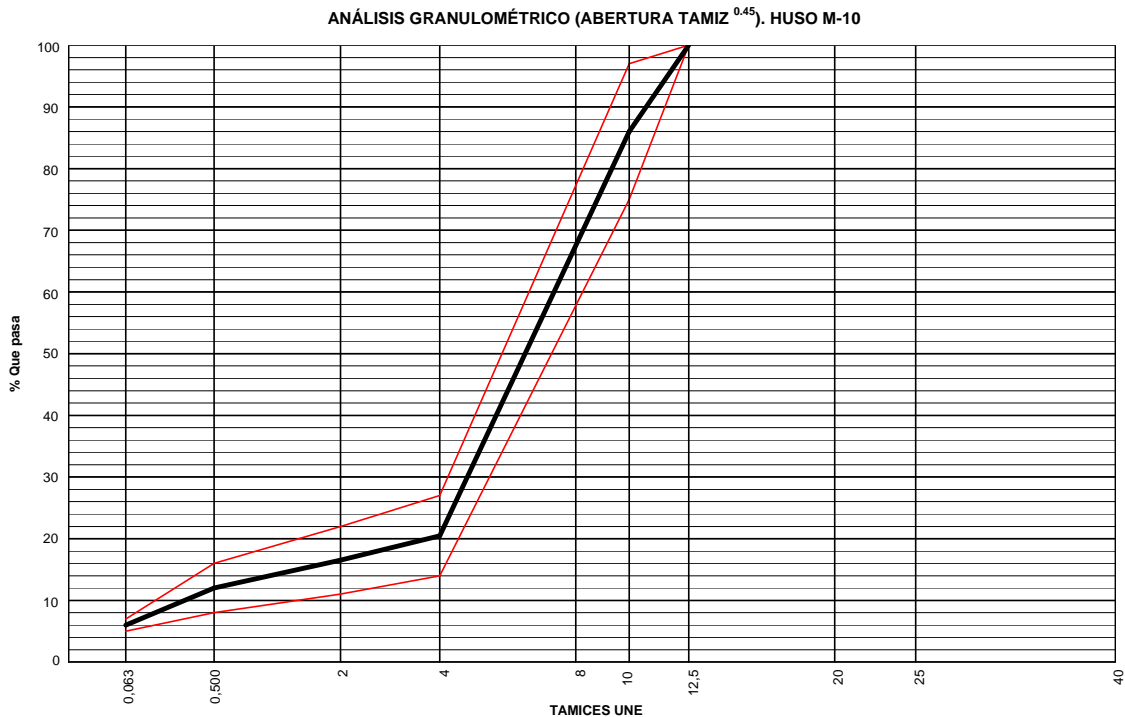


Fig. 3.1 Granulometría M-10 usada en el estudio

TAMAÑO TAMIZ UNE	Huso M10 inf	Huso M10 sup	PASA (%)
12,5	100	100	100
10	75	97	86
4	14	27	20,5
2	11	22	16,5
0,5	8	16	12
0,063	5	7	6

Tabla 3.1 Huso curva granulométrica M-10.

Como filler se utilizó un 4% de carbonato cálcico y un 2% de cemento Portland. Los betunes que se utilizaron son los comentados anteriormente con las siguientes características:

Características	Unidades	Tipo de ligante	
		BM-3c	BMPN
Penetración	1/10 mm	56	65
Punto de Reblandecimiento, A y B	°C	67,2	58,7
Índice de Penetración	--	2,7	1,5
Punto de Fragilidad Fraass	°C	-17	-19
Recuperación elástica	%	76	42
<b>Residuo TFOT</b>			
Variación en masa	%	-0,24	-0,07
Penetración retenida	1/10 mm	59	78
Aumento Punto de Reblandecimiento	°C	8,4	3,3

Tabla 3.2 Características principales de los betunes.

### 1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS ANALIZADAS

#### ▪ COHESION Y ADHESIVIDAD

Para analizar estas propiedades se usó el ensayo cántabro en seco y en húmedo. En la figura 3.2 se muestran los resultados medios de los huecos de las mezclas ensayadas.

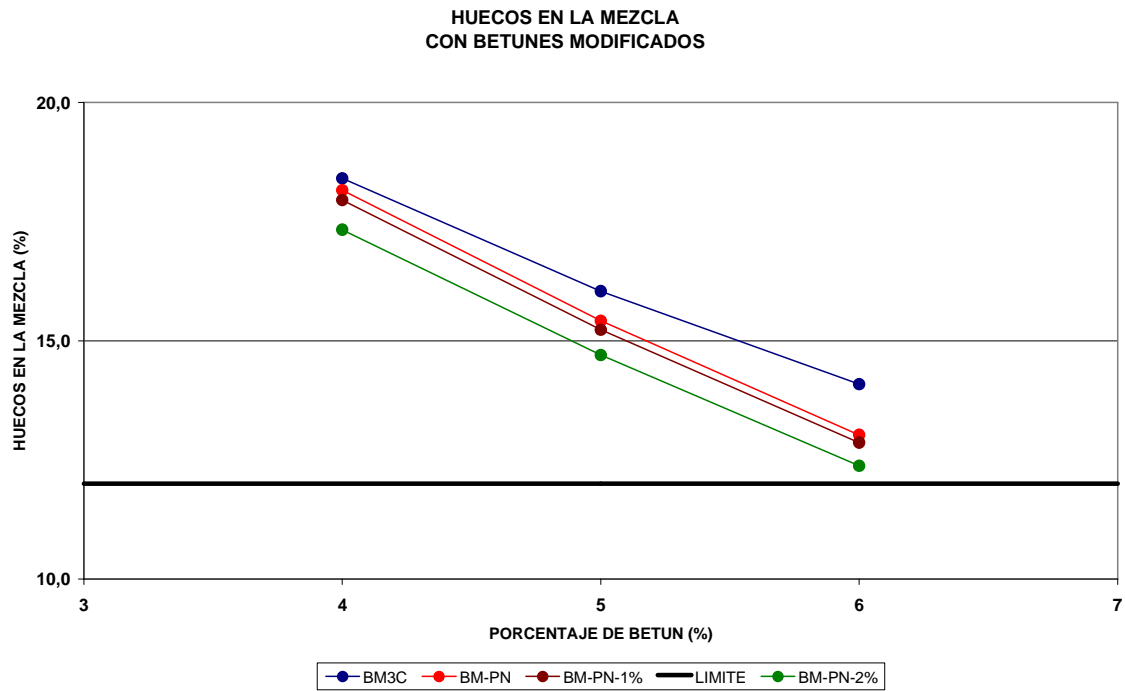


Fig.3.2 Porcentaje de huecos en las mezclas

El contenido de huecos es siempre superior al 12% especificado, el contenido de huecos disminuye al aumentar el porcentaje de betún. Entre los distintos betunes usados, se observa que el que tiene mayor cantidad de huecos es el BM-3c, independientemente el porcentaje que se use. Además en la medida que se incrementa la adición de polvo de neumático por la vía seca, los huecos en la mezcla para un mismo contenido de betún de reducen.

#### Ensayo Cántabro Vía seca

En lo que se refiere a las pérdidas por desgaste en la figura 3.3 se muestran los resultados del ensayo cántabro en seco.

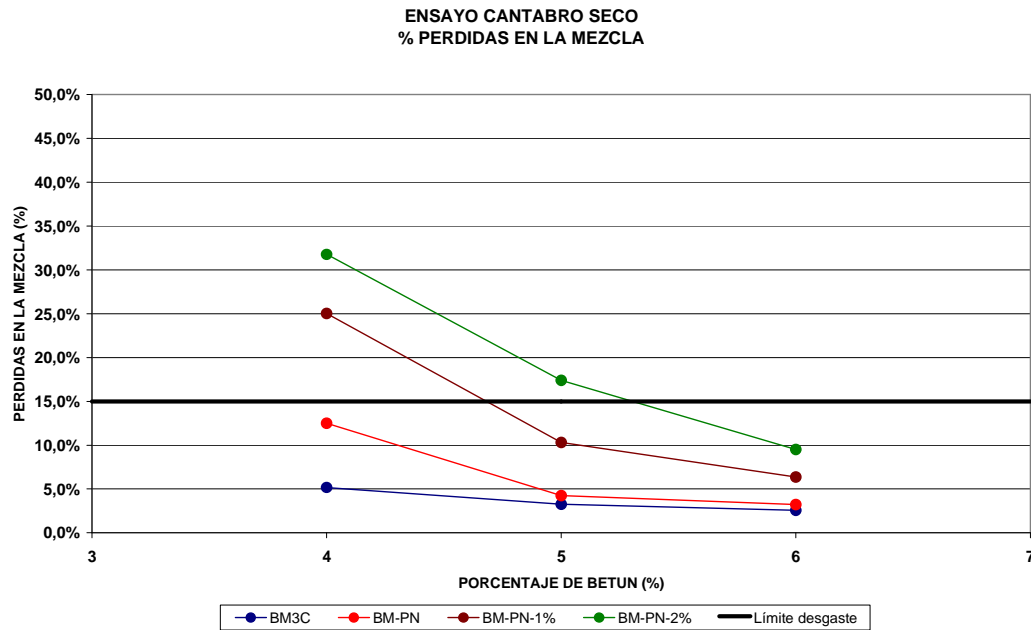


Fig.3.3 Pérdidas por desgaste en seco

Se observa que el desgaste para las muestras con betún BM-3c y BM-PN cumple para todos los porcentajes utilizados, sin embargo, para el betún modificado con polvo de neumático por la vía seca al 1% no cumple lo especificado con el 4% de betún. Por lo que respecta con el otro betún modificado con polvo de neumático al 2% en seco únicamente cumple con el porcentaje del 6%.

#### Ensayo Cántabro por vía húmeda

En la figura 3.4 se muestran los resultados medios de las pérdidas por desgaste para las mezclas estudiadas, después de someterlas a inmersión en agua 1 día a 60°C.



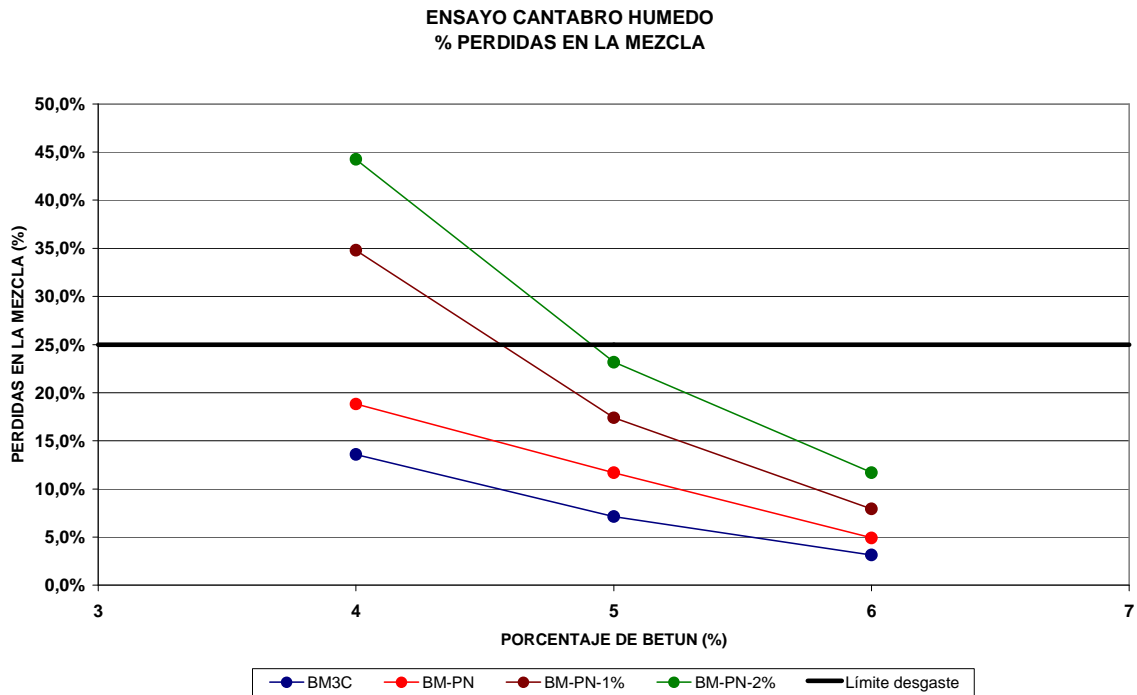


Fig.3.4 Pérdidas por desgaste vía húmeda

De esta figura podemos observar, que son parecidos a los resultados del ensayo por la vía seca, las mezclas fabricadas con betún BM-3c y BM-PN cumplen con lo especificado. En el caso de los betunes modificados con polvo de neumático con adición por la vía seca, solo cumplen lo especificado con porcentajes del 5 y 6% de betún.

#### ▪ **RESISTENCIA A TRACCION DIRECTA (CTD)**

Para la determinación de la resistencia a la tracción directa de las mezclas bituminosas analizadas en este estudio, se empleó el ensayo: Catalunya Tracción Directa (CTD), desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la UPC.

En la figura 3.5, se presentan los resultados medios de las resistencias máximas de las mezclas estudiadas, para los tres contenidos de betún propuestos. Se observa que la mezcla con betún BM-3c, el porcentaje de betún no influye significativamente en la resistencia a la tracción directa, no así, el betún modificado con polvo de neumático en planta en el que a medida que se incrementa el contenido de betún la resistencia disminuye. En lo que se refiere a las mezclas con adición de polvo de neumático por la vía seca, para el 1% las resistencias se mantienen relativamente constantes, mientras que para el 2% en seco la resistencia aumenta a medida que aumenta el contenido de betún.

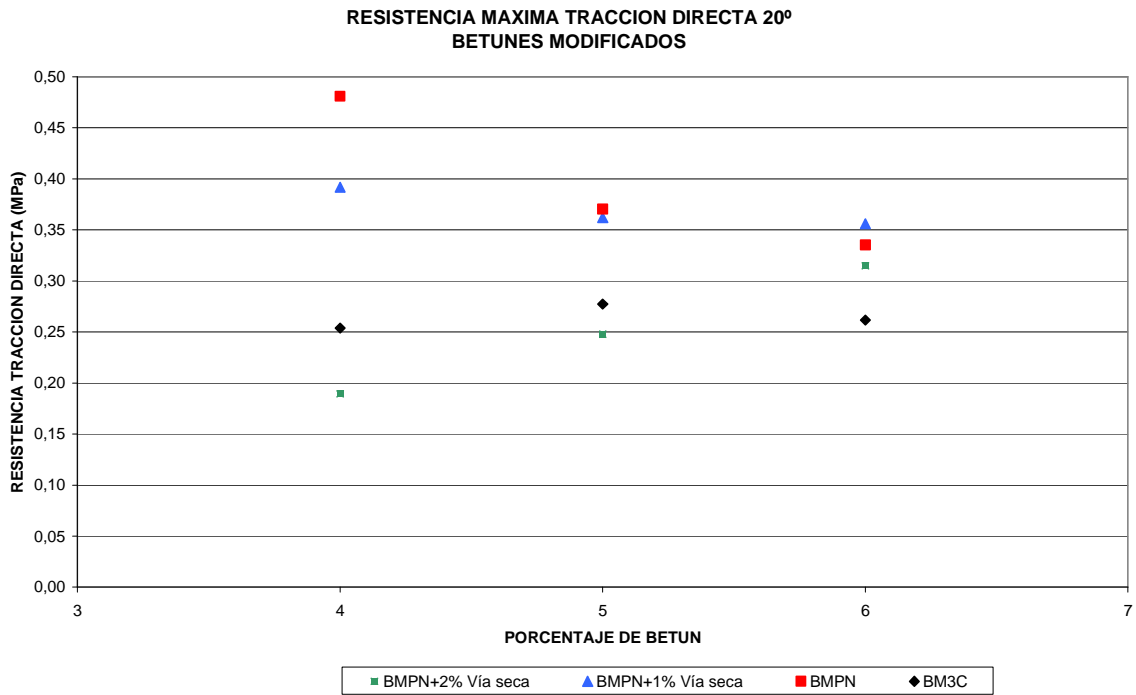


Fig.3.5 Resistencia máxima de las mezclas estudiadas

Una vez realizados los ensayos anteriores y analizando los resultados obtenidos, se establecieron los siguientes porcentajes óptimos de betún.

TIPO DE BETÓN	%
Betún modificado con polímero tipo BM-3c	5.0
Betún con adición de polvo de neumático en planta BMPN	5.0
Betún BMPN con adición de polvo neumático por vía seca (1%)	5.2
Betún BMPN con adición de polvo neumático por vía seca (2%)	5.4

Tabla 3.3 Contenidos óptimos de betún

A continuación se realizó el ensayo correspondiente de resistencia a la deformación plástica para comprobar los porcentajes óptimos de betún establecidos con los ensayos anteriores.

▪ **RESISTENCIA A LA DEFORMACION PLÁSTICA**

Los ensayos de resistencia a la deformación plástica se realizaron siguiendo la norma NLT-173/82 y las mezclas bituminosas se fabricaron con los porcentajes de betún que aparecen en la tabla 3.3 anterior.

Para el análisis del comportamiento a la deformación plástica de las diferentes mezclas bituminosas, se ha elaborado una gráfica con el valor medio de las deformaciones, figura 3.6. La velocidad de deformación plástica en el último intervalo de medida para la mezcla con betún modificado con polímero tipo BM-3c fue de 10,45. Para la mezcla con betún modificado con polvo de neumático de planta fue de 7,39, para la mezcla con betún BM-PN adicionado con el 1% de polvo de neumático por vía seca fue de 3,34 y para la mezcla con betún BM-PN y el 2% de polvo de neumático por vía seca fue de 2,68. Todos los valores son inferiores al máximo establecido para la condición más estricta (zona cálida y tráfico pesado).

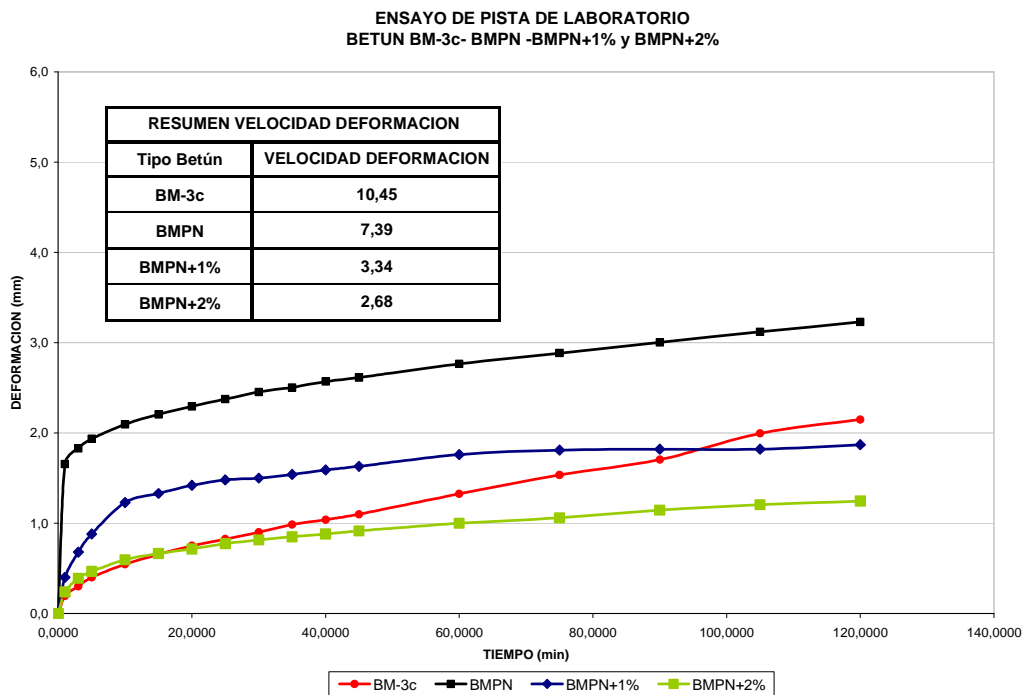


Fig.3.6 Deformación plástica de las mezclas fabricadas con diferentes betunes

## 2. TRAMOS DE ENSAYO A ESCALA REAL

Las conclusiones recogidas en el estudio para llegar a la fórmula de trabajo fueron presentados a las diferentes partes involucradas en la ejecución de los tramos experimentales. Se presentaron las bases de actuación por las que el contratista debería realizar los ensayos requeridos por la Universidad Politécnica de Catalunya para adecuar la fórmula de trabajo presentada.

Se planteó la problemática de la diferencia de densidad entre la adición de polvo de neumático y del filler. La adición del polvo de neumático se realiza en base a sustituir el filler de aportación, de forma que estableciendo una dosificación en tanto por ciento de peso, la diferencia de aportación es considerable. Por este motivo, a igualdad de pesos genera un volumen de aportación más grande, y teniendo en cuenta que la

aportación de ligante es la misma, se genera una menor cohesión interna entre los elementos que conforman la mezcla.

A continuación, los laboratorios responsables, tanto de la planta de fabricación como el de control prepararon unas muestras de prueba para los distintos tramos. Aunque los resultados obtenidos cumplían con las especificaciones de los ensayos realizados, el aspecto visual de las probetas ensayadas insinuaba poca cohesión de la mezcla pudiéndose arrancar el árido con suma facilidad.

Frente a esta situación se acordó aumentar un 0,2% el contenido de ligante de las mezclas a las que se añadía el polvo de neumático por vía seca, para mejorar los problemas de cohesión que se mostraron en las muestras fabricadas en planta.

Por lo tanto, la fórmula de trabajo que se utilizó en obra fue la siguiente:

TIPO DE BETÓN	%
Betún modificado con polímero tipo BM-3c	5.0
Betún con adición de polvo de neumático en planta BMPN	5.0
Betún BMPN con adición de polvo neumático por vía seca (1%)	5.4
Betún BMPN con adición de polvo neumático por vía seca (2%)	5.6

Tabla 3.4 Contenidos de la fórmula de trabajo en tramos experimentales.

## 2.1 SITUACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS TRAMOS EXPERIMENTALES.

La Dirección general de Carreteras de la Generalitat de Catalunya llevó a cabo el proyecto "Reforçament de ferm i obres complementaries a la carretera B-140 del PK 0+000 al 5+360. Tram Sabadell-Santa Perpètua de Mogoda. Clau: RB-05148".

El tramo se inicia en el núcleo urbano de Sabadell, el PK 0+000 se encuentra en el cruce de la calle Calders y la carretera a Barcelona (N-150), sigue un tramo recto por la calle Calders hasta que llega a la calle Fra Lluís de León, se desvía a la derecha hasta terminar el tramo urbano. Fuera del tramo urbano por la carretera B-140 se atraviesa un viaducto del Río Ripio y después de diferentes cruces y rotondas finaliza el tramo con el PK 5+360 justo en la entrada de una rotonda, en el municipio de Santa Perpètua de Mógoda.

La carretera B-140 transcurre a lo largo de los siguientes términos municipales:

- Sabadell
- Barberá del Vallés.
- Santa Perpètua de Mógoda.

El trazado en planta desde el pk 0+000 hasta el pk 2+200, es ligeramente sinuoso. Desde este pk (fuera de Sabadell) hasta el final del tramo, el trazado es básicamente recto. Los perfiles longitudinales obtenidos en el estudio, se determina que tiene una pendiente máxima de 7%.

Para el estudio de tráfico, el proyecto se ha dividido en dos tramos, con la finalidad de diferenciar el tramo urbano (PK 0+000 al PK 2+220), que presenta una categoría de tránsito T2 (650 vehículos pesados/día/carril) y el resto del tramo. Como el tramo experimental está comprendido entre los pK's 2+200 a 4+680 se consideran las siguientes características:

- Tipo de vía: B-140, carretera comarcal 2+2.
- Tipo de terreno: ondulado.
- Velocidad de proyecto: 90 km/h.
- IMD: 21.610 veh/día
- % de pesados: 17,4%
- Categoría de tráfico: T1 debido a la IMD de pesados es de 1880 vpesados/día.

A continuación se adjunta la localización general del tramo experimental.

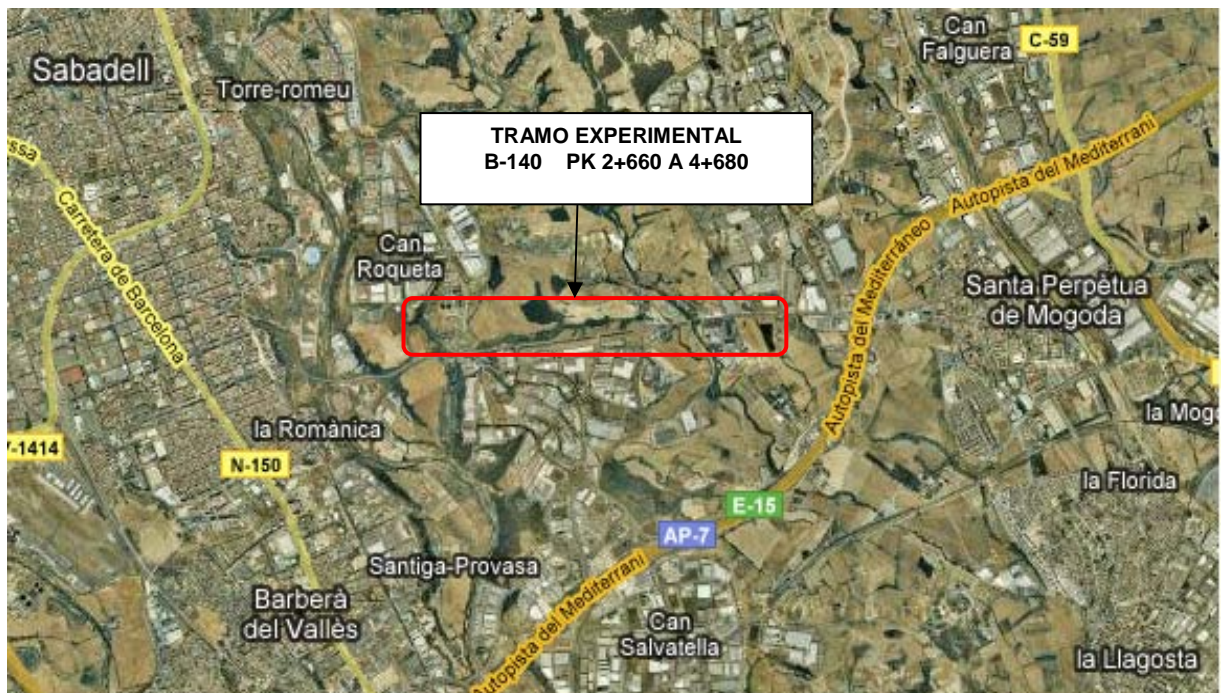


Fig.3.7 Situación general

Este tramo está dividido en dos zonas con 4 tramos cada una. Están repartidos sucesivamente siguiendo el orden creciente de los Pk's de la siguiente manera:

TRAMO	LIGANTE	UBICACIÓN	CAPA	FECHA EXTENDIDO
IA	BM-3C	PK 2+660 a PK 2+900	3cm M-10	19-10-07
IIA	BMPN	PK 2+900 a PK 3+200	3cm M-10	24-10-07
IIIA	BMPN + 2% polvo de neumático	PK 3+200 a PK 3+500	3cm M-10	18-01-08
IVA	BMPN + 1% polvo de neumático	PK 3+500 a PK 3+800	3cm M-10	18-01-08
ROTONDA				

TRAMO	LIGANTE	UBICACIÓN	CAPA	FECHA EXTENDIDO
IB	BM-3C	PK 3+880 a PK 4+080	3cm M-10	23-10-07
IIB	BMPN	PK 4+080 a PK 4+280	3cm M-10	24-10-07
IIIB	BMPN + 2% polvo de neumático	PK 4+280 a PK 4+480	3cm M-10	18-01-08
IVB	BMPN + 1% polvo de neumático	PK 4+480 a PK 4+680	3cm M-10	18-01-08
ROTONDA				

Tabla 3.5. Características de los tramos ejecutados.

La ubicación de los tramos es distinta a la que se planteó originalmente. Los tramos con betún modificado con caucho (BMPN) y adición del 2 % de polvo de neumático estaban situados como los más cercanos a las rotondas y en situación de bajada. Esto hecho planteaba la problemática que esta mezcla sería la que soportaría mayores esfuerzos, tanto por los esfuerzos de frenada para la incorporación de la rotonda como por el aumento de frenada por tratarse de un tramo en pendiente negativa.

Frente a esta situación y a partir de los resultados obtenidos en planta de las diferentes mezclas, las distintas partes implicadas consensuaron en situar el tramo de la adición del 1% como el tramo más próximo a las rotondas. De esta manera se esperaba que el comportamiento mecánico fuera mejor con esta disposición que con la original.

Por lo tanto, se muestra a nivel de croquis la disposición de los tramos.



## SITUACIÓN DE LOS TRAMOS EXPERIMENTALES EN LA CARRETERA B-140 ENTRE SABADELL Y SANTA PERPÉTUA DE MÓGONA pK 2+200 a pK 4+680

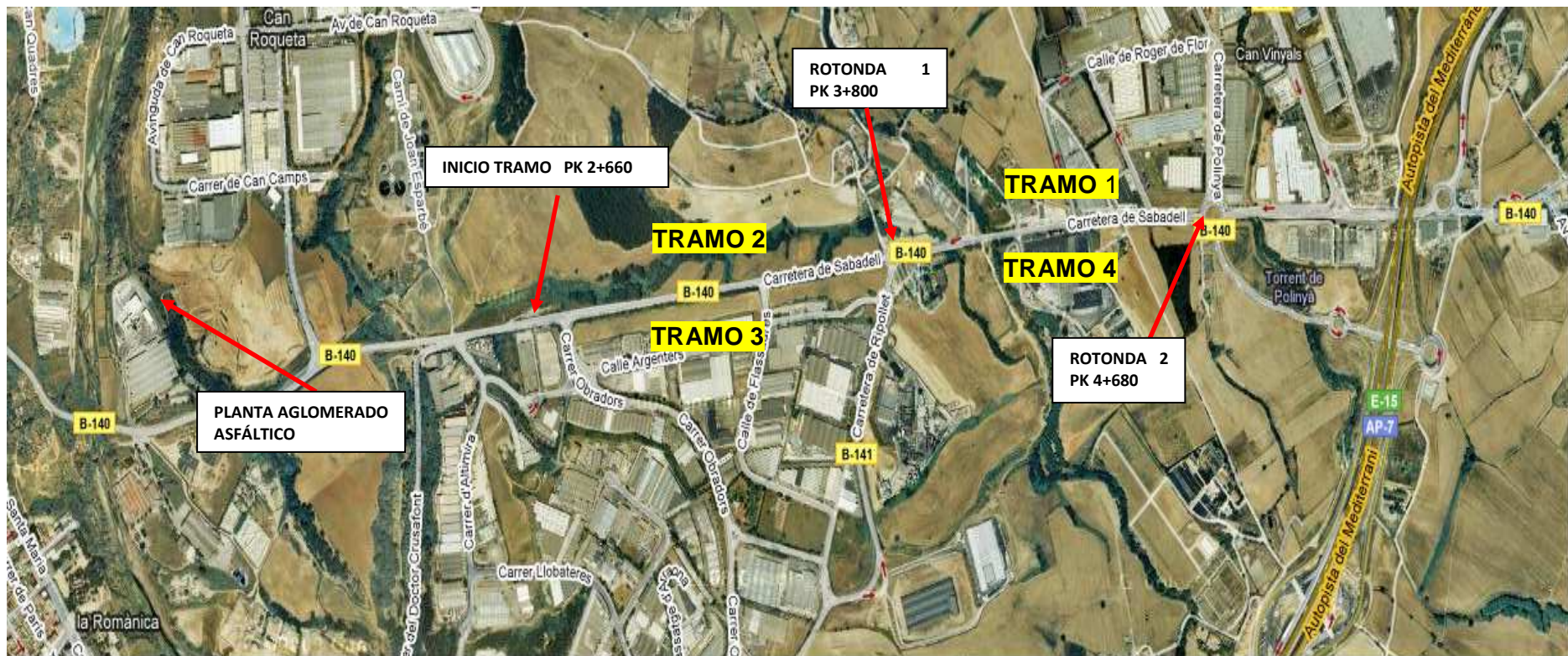


Fig.3.8 Situación panorámica de la zona.

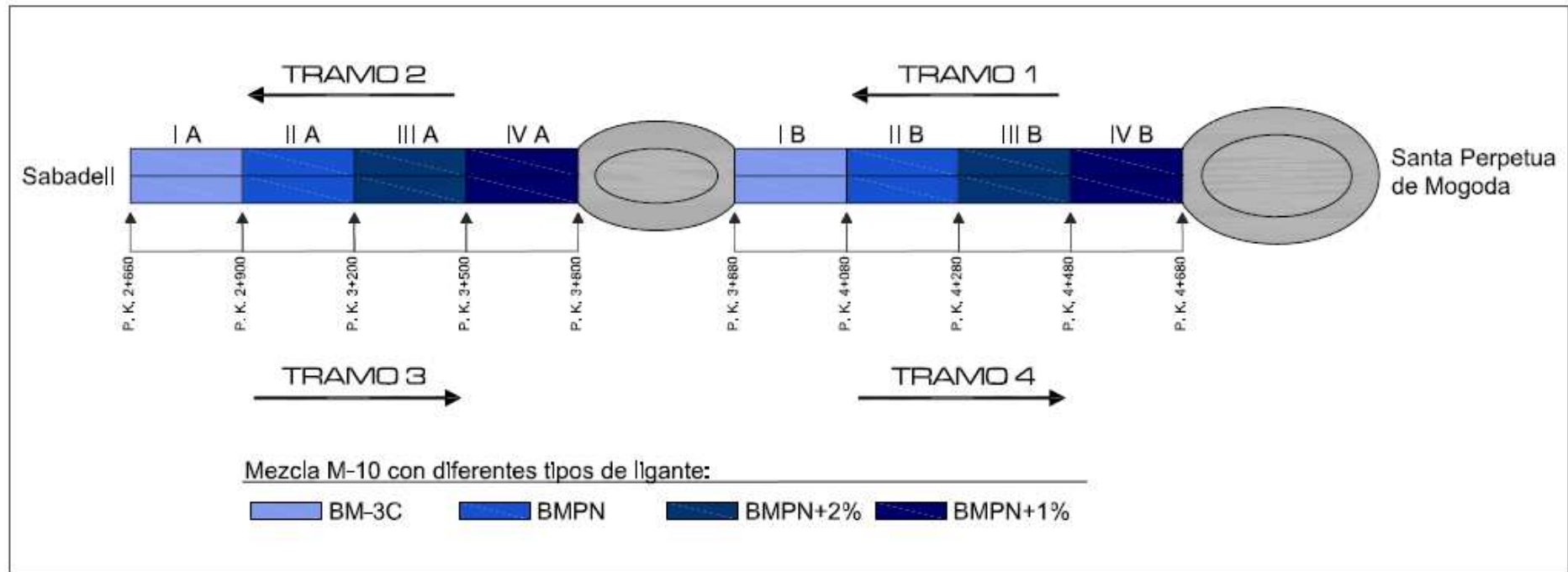


Fig. 3.9 Esquema de los tramos experimentales y ubicación de las diferentes mezclas



## **2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.**

El material granular utilizado en planta es de origen granítico y calizo, que tienen una densidad relativa conjunta de 2.679 g/cm<sup>3</sup>.

Las características de los betunes que se utilizaron (BM-3c y Betún Modificado con Caucho) se adjuntan en el anejo I. En este anejo también se adjunta el ensayo que hizo el laboratorio responsable en la planta.

Las características del polvo de neumático que se introdujo directamente en la planta de fabricación de mezclas bituminosas junto con el betún y los áridos para la adición del 1% y del 2% en vía seca, se adjunta en el mismo anejo I.

## **2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.**

Los distintos tramos se ejecutaron en diferentes días. Dado que se trata de una carretera con tráfico, los trabajos se desarrollaron por el método de las medias calzadas. Este método consiste en el corte de uno de los carriles, dando paso alternativo por el otro. El avance se lleva a cabo de manera que al final de la jornada los trabajos en ambos carriles quedan igualados. Además, estos trabajos se realizaron de noche, ya que el tráfico de la B-140 en horario nocturno disminuye considerablemente.

Los tramos ejecutados son todos una mezcla tipo M-10 de composición fija en la que se fueron utilizando los distintos tipos de ligantes que se establecieron en el estudio.

Los principales trabajos que se desarrollaron y la secuencia de los mismos fue:

- 1) Fabricación de la mezcla en caliente con el ligante correspondiente para cada tramo.
- 2) Transporte de la mezcla al tajo de extendido.
- 3) Aplicación del riego de adherencia.
- 4) Extendido de la mezcla.
- 5) Compactación de la mezcla.
- 6) Señalización y puesta en servicio.

### **2.3.1 Fabricación de la mezcla**

Todas las mezclas se fabricaron en una planta discontinua ubicada pocos metros de la zona. En esta planta era muy importante controlar adecuadamente la cantidad de polvo de caucho que se añadía a la mezcla para las dosificaciones de los tramos que se hacían por vía seca, ya que este contenido es crítico para el buen comportamiento de la misma.

En algunos casos se han utilizado los silos de polvo mineral de aportación para la alimentación automática del polvo de caucho, pero en esta planta se contaba con un silo específicamente para la incorporación de aditivos, que en este caso se utilizó para almacenar el polvo de neumático.



Fig.3.10 Vista general de la planta.

### **TRAMOS IA y IB**

El primer tramo que se ejecutó fue el IA el día 19 de Octubre de 2007. Este tramo es el que se cogió de referencia, tanto para comparar el comportamiento mecánico de los otros tramos como para comparar las medidas de ruido y resistencia al deslizamiento que se realizaron a posteriori. Este tramo es de 240 metros con un betún BM-3c.

El tramo IB se construyó el 23 de Octubre del 2007. Este tramo tiene las mismas características que el tramo 1A salvo que su longitud es de 200 metros. La temperatura de fabricación está entre 165°C y 170°C.

### **TRAMOS IIA y IIB**

Ambos tramos se ejecutaron el día 24 Octubre de 2007. El tramo IIA tiene una longitud de 300m y el tramo IIB tiene una longitud de 200m. Estos tramos se ejecutaron con el betún modificado con polvo de neumático mediante la vía húmeda (BMPN). La fabricación de esta mezcla es la misma que la de una mezcla convencional con la particularidad que se debe aumentar la temperatura de la mezcla. La temperatura de fabricación en planta es de entre 170°C y 175°C

### **TRAMOS IIIA y IIIB**

Estos tramos se ejecutaron el día 18 Enero de 2008 donde se hizo el extendido de la mezcla con betún modificado con polvo de neumático por la vía húmeda más la adición de polvo de caucho por vía seca del 2% de su peso correspondiente (BMPN+

2% PN en seco). Las longitudes de estos tramos son de 200 metros cada uno. Las diferencias principales respecto a la fabricación de mezclas convencionales son:

- Se debe aumentar la temperatura de fabricación como mínimo a 160°C con mezclas discontinuas tipo M (temperaturas máximas de fabricación 180 °C).
- En el amasado se incorpora primero el polvo de caucho a los áridos y después de unos segundos de mezclado se añade el betún. Para garantizar la homogeneidad del reparto del polvo de caucho y su envuelta con el betún son necesarios mayores tiempos de amasado. Según el “Manual de Empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas”, en mezclas con el 2 % de polvo de caucho el tiempo total de amasado se debe aumentar aproximadamente entre un 10-15 % respecto al tiempo de una mezcla convencional.
- Las técnicas de vía seca requieren un periodo de almacenamiento en camión para que el material termine de madurar y no continúe su hinchamiento después de la puesta en obra. Este tiempo de maduración se determina en el laboratorio y se debe comprobar en obra. Este tiempo mínimo que debe transcurrir entre la fabricación y la puesta no será inferior en ningún caso a 30 min.

#### **TRAMOS IVA y IVB**

Estos tramos se ejecutaron el mismo día que los IVA y IVB, es decir el 18 de Enero de 2008. El extendido que se realizó fue una mezcla con betún modificado con polvo de neumático por la vía húmeda más la adición de polvo de caucho por vía seca del 1% de su peso correspondiente (BMC+ 1% PN en seco). Las longitudes de estos tramos son de 200 metros cada uno. Para evitar las juntas longitudinales de un tramo a otro se hizo una transición del tramo del 1 % y el 2% mediante la dosificación en planta y en la amasada de los camiones. De este modo se conseguía una mayor continuidad de los tramos y también se favorecía la ejecución.

Las temperaturas de fabricación y el control de calidad de los camiones de los tramos III (A y B) y de los tramos IV (A y B) se adjuntan en la siguiente tabla siguiente:

MEZCLA	MATRÍCULA	HORA FABRICACIÓN	T°	HORA SALIDA PLANTA	T°	HORA EXTENDIDO	T°
110 62 B1 +2% Pol. Neu.	7912DXN	21'56	175°	22'25	174°	23	165°
	3308B7X	22'28	174°	22'58	173°	23'10	161°
II	8227DNT	22'41	176°	23'09	175°	23'35	164°
	89288WB	22'54	175°	23'24	174°	23'40	165°
110 62 B1	B2026SK	23'06	176°	23'36	175°	23'55	165°
11 PCL Neu.	B4984US	23'17	176°	23'47	175°	00'05	170°
	80988VT	23'39	176°	00'09	175°	00'25	170°
II	0837DCC	23'48	177°	00'18	177°	00'35	165°
	3160BLT	23'55	174°	00'25	175°	00'46	160°
II	7912DXN	00'02	176°	00'32	175°	01'05	158°
	3160BLT	01'06	172°	01'36	171°	02'10	160°
II	3308B7X	01'17	175°	01'47	174°	02'25	150°
	8227DNT	01'26	175°	01'56	174°	02'37	158°
110 62 B1 +2 Pol. Neu.	89288WB	01'26	175°	02'06	174°	02'57	156°
II	B2026SK	03'11	174°	03'41	173°	03'55	155°
	B4984US	03'41	173°	04'11	172°	04'42	158°
II	0837DCC	03'52	177°	04'22	176°	04'55	163°
	80988VT	04'12	174°	04'42	173°	05'15	161°
110 62 B1 +1% Pol. Neu.	7912DXN	04'30	175°	05'00	174°	05'25	160°
II	3308B7X	04'37	174°	05'07	173°	05'37	159°
	8227DNT	04'44	176°	05'15	175°	05'48	163°
II	89288WB	04'51	174°	05'21	173°	05'54	164°
	B2026SK	05'02	176°	05'32	175°	06'04	162°
II	B4984US	05'10	177°	05'40	176°	06'45	161°
	80988VT	05'24	176°	05'54	175°	06'25	160°

Fig.3.11 Tabla de las temperaturas de fabricación de los tramos III(A y B) y IV(A y B).

### 2.3.2 Transporte

El Manual recomienda que debido a que estas mezclas son sensibles a la disminución de la temperatura, los camiones deben ir siempre cubiertos, excepto en distancias cortas. En este caso, la distancia de la obra y la planta aún siendo muy cortas, los camiones iban cubiertos con una lona tal y como se puede ver en la foto adjunta realizada el día de la obra.



Fig. 3.12 Pesado de camión y protección con lona para proteger la mezcla.

### 2.3.3 Extensión

La extensión de los tramos IA, IB, IIA y IIB se hicieron de forma convencional y con la maquinaria convencional.

Para los tramos IIIA, IIIB, IVA y IVB se tomaron una serie de precauciones basadas en las experiencias que hay en nuestro país. La primera de ellas fue evitar el enfriamiento prematuro de las mezclas, ya que a temperaturas inferiores a 120° C se hace muy difícil la compactación de este tipo de mezclas con polvo de caucho. Además, las mezclas con polvo de caucho únicamente deben extenderse cuando las condiciones climáticas son favorables y a temperaturas superiores de 10 °C. Según datos del Servicio Meteorológico de Cataluña, la temperatura el día 18 de Enero de 2007 en Sabadell osciló entre los 10,5°C y los 7°C dándose la temperatura mínima a las 7:15 a.m momento en el cual ya no se extendía la mezcla.





Fig.3.13 Extendido de la mezcla de los tramos III(A y B) y IV(A y B).

#### 2.3.4 Compactación

Del mismo modo que en la extensión de la mezcla, se tuvieron que tomar una serie de medidas para la compactación de los tramos con polvo de neumático. La compactación se puede hacer con los equipos convencionales, pero para mezclas discontinuas como es el caso, se debe utilizar sólo compactadores de rodillos metálicos y que empleen líquidos antiadherentes. Esto es debido a que, las mezclas con caucho tienen una mayor adherencia a los compactadores que las mezclas convencionales.

Otro aspecto fundamental para este tipo de mezclas es el control de la temperatura de compactación. La compactación debe iniciarse lo antes posible y con una temperatura de 160°C. Además, para las mezclas fabricadas en vía seca es necesario que el compactador continúe hasta que la temperatura de la mezcla disminuya hasta los 80 °C. Este procedimiento es fundamental para el buen comportamiento del tramo. La explicación es porque como el caucho sólo ha reaccionado parcialmente, el material de la capa compactada continúa la reacción al encontrarse a temperaturas elevadas. La reacción hace que la mezcla aumente de volumen y se expanda. El hecho de continuar la compactación hasta los 80° C es para asegurar que ya no se produzca el hinchamiento del material.



Fig.3.14 Compactación de la mezcla de los tramos con adición de polvo de neumático con vía seca.

### 2.3.5 Limpieza, señalización y puesta en servicio.

Una vez finalizada la compactación de las mezclas, se procedió a la limpieza del material bituminoso sobrante y la posterior señalización.



Fig.3.15 Limpieza del material bituminoso sobrante.



Por último, se procedió a la señalización horizontal de los tramos extendidos para la posterior puesta en servicio de la vía para el tráfico rodado.



Fig.3.16 Señalización y puesta en servicio de la carretera.

### 2.3.6 Fallos prematuros una vez puesta la carretera en servicio.

El día 21 de enero de 2008, tres días después del extendido, en los tramos 2 y 3 (IIIA) ubicados entre los pk's 3+200 y 3+500 construidos con el betún BMPN con un 2% de polvo de neumático por vía seca, se produjeron desprendimientos de material bituminoso, como se observa en la figura 3.17. Por motivos de seguridad se procedió a reconstruir el tramo deteriorado mediante el fresado y posterior reposición de mezcla, utilizando betún modificado con polímeros BM-3c.



Fig.3.17 Detalle de las disgregaciones y desprendimientos de la mezcla con tipo de betún BMPN+2% vía seca.

Unos meses más tarde, el 20 de marzo de 2008, el comportamiento del otro tramo construido con el betún BMPN con un 2% de polvo de neumático por vía seca de los tramos 1 y 4,(IIIB) ubicados entre los pk's 4+280 y 4+480, fue el mismo. Se produjeron los mismos desprendimientos y otra vez por motivos de seguridad se procedió al fresado del tramo y a la posterior reposición de la mezcla con betún BM-3c.

Por otra parte, los otros tramos se encuentran en buen estado y hasta hoy no se han producido ningún tipo de fallo.

### 3. AUSCULTACIÓN DE LOS TRAMOS DE ENSAYO

Para apreciar y evaluar las características superficiales de un firme se requiere proceder su reconocimiento, que puede hacerse por distintos medios complementarios como son: la inspección visual y la auscultación con equipos de alto rendimiento.

El primer reconocimiento que se hace es la inspección visual. Sin duda alguna, la inspección visual es indispensable para tener un conocimiento inicial del estado en que se encuentra el pavimento. Pero si se quiere tener información precisa de alguna de las características superficiales, es necesario utilizar equipos de auscultación que se han desarrollado para ello.

En este caso se procedió a la auscultación de los tramos para determinar el coeficiente de rozamiento transversal (CRT), la textura y el ruido de rodadura para los distintos tipos de mezclas ya comentados en el apartado anterior.

#### 3.1 EQUIPO DE MEDIDA DEL CRT Y LA TEXTURA.

El equipo que se utilizó para determinar la resistencia al deslizamiento de los diferentes tipos de mezclas fue el SCRIM (*Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine*) que está normalizado en la NLT-336/92. Aunque hay diferentes equipos que miden el CRT con rueda oblicua, el más extendido en Europa y el que se utiliza habitualmente en España es éste.



Fig.3.18 Equipo SCRIM.

Es un equipo de alto rendimiento para la medida continua de la adherencia entre la rueda y el pavimento, que determina el Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT) del pavimento a ensayar. Actualmente, una mejora que se introdujo en estos equipos es que en el mismo camión incorpora un texturómetro láser. De este modo, cumple

con una doble función: determina el coeficiente de rozamiento transversal y la macrotextura con láser.

El equipo consiste en un camión equipado con una cisterna de agua que dispone de una rueda normalizada de medida colocada en su lado derecho, de forma que la medida se lleva a cabo en la parte de la calzada más solicitada y alterando lo menos posible el tráfico de otros vehículos de la calzada. Delante de la rueda de medida se inyecta un flujo de agua que forma una película líquida de espesor constante.



Fig.3.19 Foto detalle del equipo SCRIM.

Este equipo de medida tiene su principio en la aparición de fuerzas tangenciales cuando una rueda estándar, que gira libremente y con ángulo de desviación respecto al sentido de marcha del vehículo, entra en contacto con la superficie de rodadura a ensayar. Se utiliza una rueda normalizada con neumático de banda de rodadura lisa para eliminar cualquier efecto debido al desgaste del dibujo de la huella. La relación entre la fuerza desarrollada normal al plano de la rueda de ensayo (fuerza tangencial), y la carga sobre la misma, es el coeficiente de rozamiento transversal, CRT.



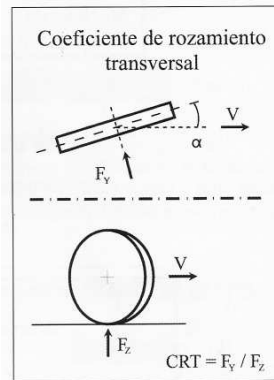


Fig.3.20 Coeficiente de Rozamiento Transversal

En la cabina del camión van ubicados el sistema de adquisición de datos, un monitor que permite visualizar los datos de velocidad, coeficiente de rozamiento, textura y un teclado que posibilita la introducción de eventos durante la marcha. Además, este equipo contaba con un texturómetro láser para medir la textura.

Otros parámetros ambientales registrados durante el ensayo fueron la temperatura del aire y del pavimento. En ninguna de las medidas realizadas estas temperaturas afectaron a los resultados obtenidos. La temperatura del pavimento oscilaba entre los 15-18°C y la temperatura del aire era de 16°C.

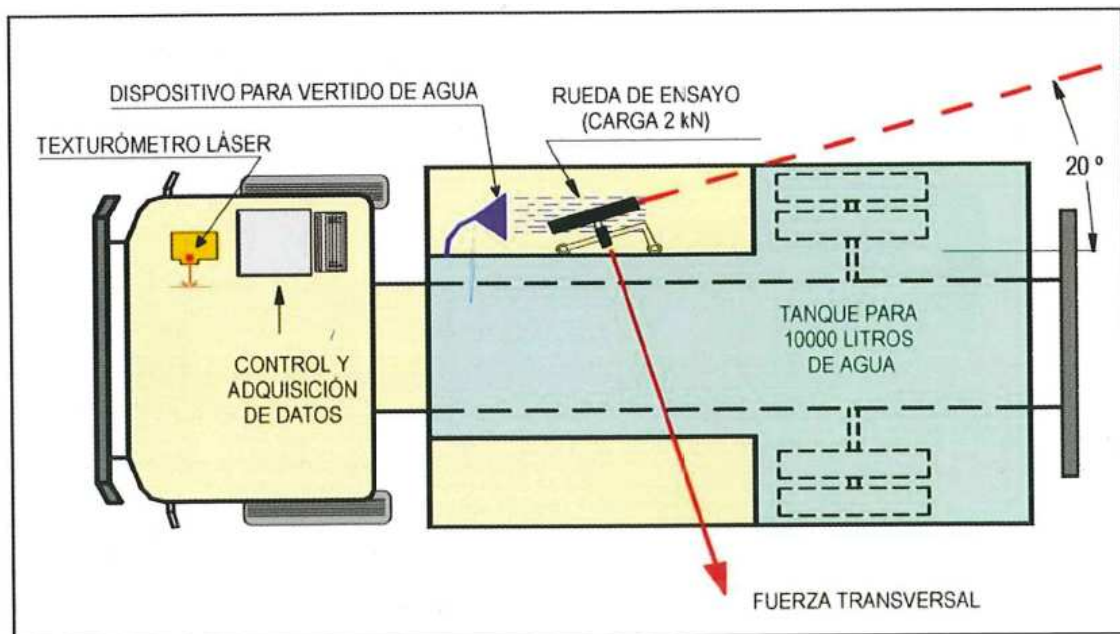


Fig.3.21 Croquis de un equipo estándar SCRIM.

La ventaja primordial del método radica en la posibilidad de registrar de manera continua la resistencia al deslizamiento y la textura de la superficie de rodadura a la vez y de poder realizar las medidas a distintas velocidades. En este caso, la velocidad de registro fue  $50 \pm 10$  km/h por tener parte de los tramos limitados a velocidad 60 Km/h.

### 3.2 MEDIDAS DEL CRT Y LA TEXTURA

Las medidas del CRT y la textura fueron tomadas el 26/02/2008. Es importante señalar que cuando el SCRIM tomó las medidas, el tramo IIIA ya no era el tramo con betún modificado con polvo de neumático por la vía húmeda más la adición de polvo de caucho por vía seca del 2% (BMPN+ 2% PN en seco). Este tramo se fresó debido al levantamiento prematuro de la mezcla y se sustituyó por una mezcla con betún BM3c. El extendido de la mezcla BM-3c se realizó el 26/01/2008.

En la tabla 3.12 se adjunta las diferentes edades de los diferentes tramos.

TRAMO	PK'S	TIPO DE BETÓN	EXTENDIDO	AUSCULTACIÓN CRT Y TEXTURA
IA	2660-2900	BM3C	19-10-07	26-02-08
IIA	2900-3200	BMPN	24-10-07	26-02-08
IIIA	3200-3500	BMPN+2% BM3C *	18-01-08	-
			26-01-08	26-02-08
IVA	3500-3800	BMPN+1%	18-01-08	26-02-08
IB	3880-4080	BM3C	23-10-08	26-02-08
IIB	4080-4280	BMPN	24-10-08	26-02-08
IIIB	4280-4480	BMPN+2%	18-01-08	26-02-08
IVB	4480-4680	BMPN+1%	18-01-08	26-02-08
*Tramo con BMPN+2% que se deterioró rápidamente y fue reemplazado por BM-3c.				

Tabla 3.12 Edades de las mezclas en el momento de la auscultación del pavimento.

En la fig. 3.22 se muestran las texturas de las diferentes mezclas que se han extendido en la carretera para uno de los tramos, en concreto el tramo 4.

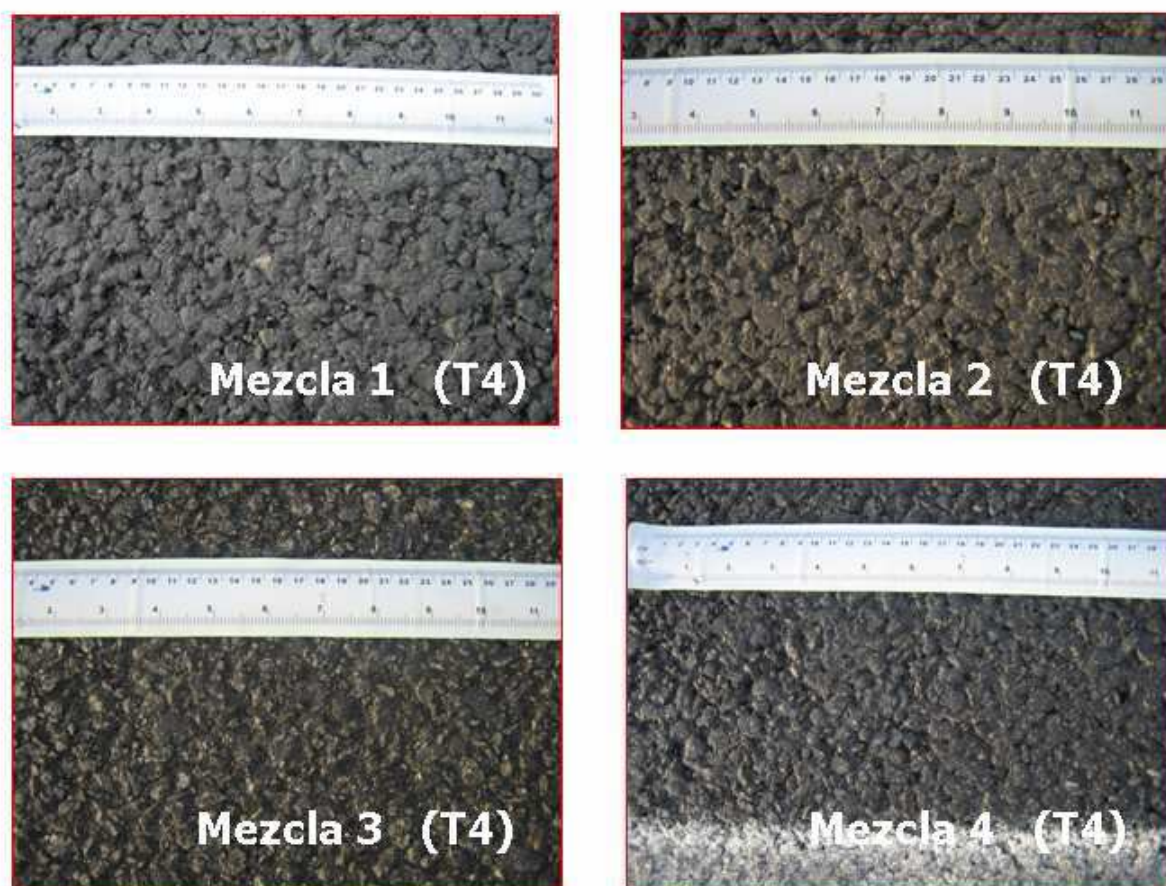


Fig. 3.22 Fotos de diferentes mezclas de la zona de estudio en la B-140 mostrando la textura superficial.

Las medidas del Coeficiente de Resistencia Transversal (CRT) para los diferentes tramos y en las direcciones de Sta. Perpetua de Mógoda y Sabadell se tomaron cada 20 metros. Del mismo modo, se tomaron las medidas de textura (macrotextura) a diferencia que estas fueron tomadas con el texturómetro láser cada 10 metros. Estas medidas están recogidas en el Anejo I. Los valores medios del Coeficiente de Rozamiento Transversal para todos los tramos tanto en dirección Sta. Perpetua como en dirección Sabadell son los siguientes:



TRAMO	PUNTO KILOMÉTRICO	TIPO DE BETÚN	VALORES DE CRT	
			Dirección STA PERPETUA	Dirección SABADELL
			MEDIA	MEDIA
IA	2660-2900	BM3C	46,89	55,89
IIA	2900-3200	BMPN	52,82	57,98
IIIA	3200-3500	BM3c*	64,22	56,13
IVA	3500-3800	BMPN+1%	60,50	56,10
IB	3880-4080	BM3C	60,31	57,70
IIB	4080-4280	BMPN	52,93	54,47
IIIB	4280-4480	BMPN+2%	58,76	53,29
IVB	4480-4680	BMPN+1%	53,21	55,66

\*Tramo con BMPN+2% que se deterioró rápidamente y fue reemplazado por BM-3c

Tabla 3.13 Valores medios del Coeficiente de Rozamiento Transversal

Del mismo modo, los valores de textura son:

TRAMO	PUNTO KILOMÉTRICO	MEZCLA	VALORES DE TEXTURA	
			Dirección STA PERPETUA	Dirección SABADELL
			MEDIA	MEDIA
IA	2660-2900	BM3C	1,03	1,12
IIA	2900-3200	BMPN	1,12	1,19
IIIA	3200-3500	BM3c*	1,35	1,18
IVA	3500-3800	BMPN+1%	1,05	1,03
IB	3880-4080	BM3C	0,94	1,10
IIB	4080-4280	BMPN	1,00	1,01
IIIB	4280-4480	BMPN+2%	0,85	0,91
IVB	4480-4680	BMPN+1%	0,87	0,97

\*Tramo con BMPN+2% que se deterioró rápidamente y fue reemplazado por BM-3c

Tabla 3.14 Valores medios de la textura

### 3.3 EQUIPO DE MEDIDAS ACÚSTICA

Las medidas del ruido de rodadura fueron realizadas siguiendo el denominado método CPX que está basado en el borrador de la norma ISO/CD 11819-2. En el método CPX se mide el ruido de rodadura aisándolo del resto del ruido del tráfico de la carretera. Para ello se utiliza un remolque provisto de un neumático normalizado contenido en una cámara que le aísla del ruido exterior (semi-anecoica). El remolque con cámara

semi-anechoica utilizado ha sido el TireSonic MK4-LA<sup>2</sup>IC de la Universidad de Castilla-La Mancha.



Fig. 3.23 Fotografía de vehículo y remolque de medida de ruido de rodadura para CPX Tiresonic MK4-LA<sup>2</sup>IC



Fig. 3.24 Foto interior de la cámara semi-anechoica.

Además del neumático de referencia se utilizaron otros dos neumáticos. Estos tres neumáticos son utilizados de forma habitual en medidas de ruido en campo próximo (CPX). Los neumáticos utilizados en estas medidas son el Pirelli P6000, el Avon/Cooper Enviro CR 322 y el Avon/Cooper ZV 1.



Fig. 3.25 Neumáticos utilizados en las medidas de ruido de rodadura.

El ruido se mide con dos micrófonos modelo 4189 de B&K situados a unos 200mm del neumático de ensayo y a 100 mm del pavimento, a 45° y 135° con respecto a la dirección de rodadura. En la figura siguiente se muestra la disposición de los elementos:

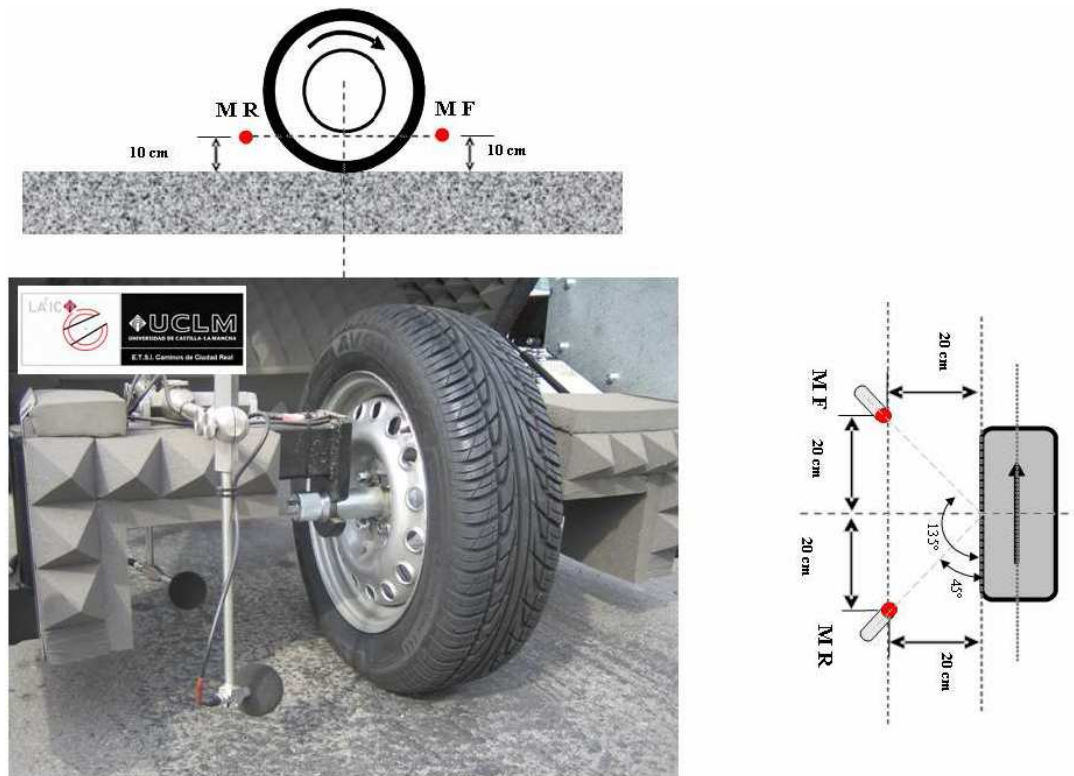


Fig. 3.26 Diagramas con la posición de los micrófonos delanteros (MF) y trasero (MR).

Para el registro y análisis de los niveles sonoros se utilizó un analizador Pulse modelo Bruel&Kjaer. Para poder registrar la posición global, el vehículo dispone de un equipo GPS que además, fue utilizado para la localización geo-referenciada de los niveles sonoros a intervalos regulares de tiempo.

El análisis de frecuencias en bandas de tercios de octava<sup>1</sup> y los niveles de presión sonora fue registrado en ponderación A en el intervalo de frecuencias 200 Hz a 20 kHz. La calibración del sistema acústico se realizó con un calibrador 4231 de B&K antes y después de cada conjunto de medidas.

Durante la medida, la velocidad del vehículo tractor se mantiene, tanto como es posible, a la velocidad de referencia seleccionada. Cada 10 metros de longitud el valor medio de los niveles sonoros generados en la interacción neumático/pavimento son registrados.

Los niveles sonoros en bandas tercio de octava, con ponderación A, fueron continuamente registrados a la velocidad de referencia de 50 km/h, y en algunos casos a 80 km/h. Los niveles sonoros a lo largo de la trayectoria de la zona de ensayo fueron correlacionados con las coordenadas GPS con el fin de poder hacer un análisis posterior de cada uno de las mezclas estudiadas.

Otros parámetros ambientales registrados durante el ensayo fueron la temperatura del aire y del pavimento. En ninguna de las medidas estas temperaturas afectan los niveles sonoros de forma significativa, dado que las diferencias en temperatura entre ensayos no superan los 6°C. Medidas de las condiciones del viento en la zona indican que la velocidad media del aire en el momento de los ensayos acústicos estaba por debajo de 4 m/s.

### **3.4 MEDIDAS DEL RUIDO DE RODADURA**

Las medidas de rodadura están divididas en cuatro tramos según el sentido de circulación y fueron tomadas el 1 de Marzo de 2008.

El tramo T1 corresponde a los pk's 4+680 hasta el 3+880 en dirección Sabadell. El tramo T2 entre los pk's 3+800 hasta el 2+660 en la misma dirección Sabadell. El tramo T3 y T4 corresponde entre los pk's 2+660 hasta el 3+800 y el 3+880 hasta el 4+680 respectivamente; ambos en sentido Santa Perpetua de Mógoda. (Ver figura 3.9)

#### **TRAMOS T1 y T4**

La zona de estudio cuyos resultados se muestran a continuación son los dos sentidos de la carretera B-140 entre el kilómetro 4+680 y el 3+880 situados entre Sabadell y Santa Perpetua de Mógoda (T1 sentido Sabadell y T4 sentido Santa Perpetua de Mógoda, figura 3.27).

---

<sup>1</sup> La octava es un intervalo de frecuencias para el oído, que el llamado análisis de banda de octavas ha sido definido como una norma para el análisis acústico.





Fig. 3.27 Foto aérea de la zona de ensayo en la B-140. El tramo 1 indica el sentido Sabadell y el tramo T4 indica el sentido Santa Perpètua de Mògoda.

La influencia de otros vehículos sobre las medidas acústicas es mínima al utilizar una cámara semi-anecoica.

Esta cámara remolcada permite realizar las medias sin interrupción del tráfico a lo largo del día. Todas las medidas del ruido de rodadura fueron realizadas de forma geo-referenciadas gracias a la utilización de un GPS sincronizado con las medidas acústicas.

La zona de ensayo tiene aproximadamente 800 m de longitud y está situada entre dos rotondas y cuyas coordenadas de Latitud y Longitud se puede apreciar en la figura 3.28 en grados decimales.

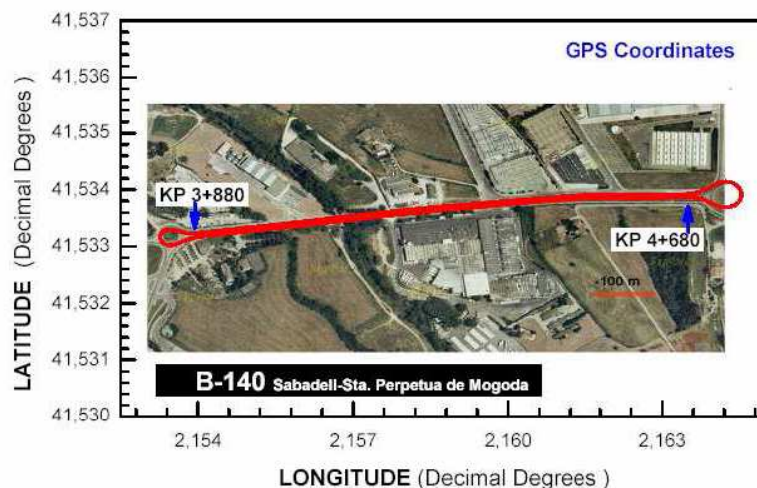


Fig. 3.28 Recorrido geo-referenciado en uno de los ensayos realizados en la B-140.

### A.1) Evolución de los niveles sonoros en el Tramo T1

Se determina los niveles sonoros medidos en proximidad a la interacción neumático pavimento,  $L_{CPT_r}$ , según el denominado método CPX (método de medida del ruido de

rodadura en proximidad), después de realizar la media aritmética de los niveles de los micrófonos delantero y trasero para cada tipo de neumático. Las medidas se realizan de forma continua sobre cada una de las mezclas que se encuentran en cada tramo. La velocidad a la que se realiza la media acústica, aproximadamente 50 km/h, es registrada por un tacómetro.

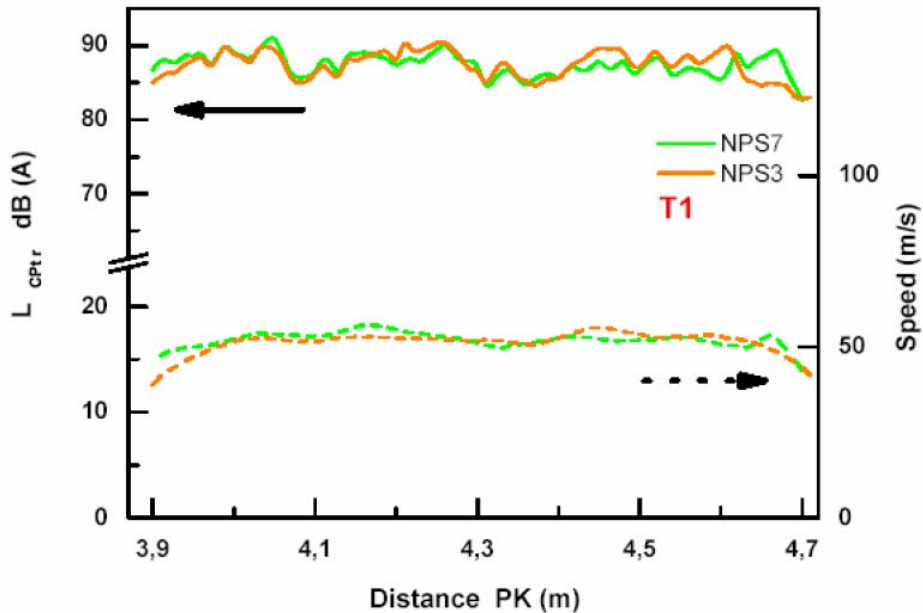


Fig. 3.29 Evolución de los niveles sonoros registrados en el tramo T1.

La dificultad de mantener la velocidad fija hace que sea necesario la realización de la corrección de los niveles debido al desvío de la velocidad de referencia (ver figura 3.30).

$$L_{corr}(t) = L_{meas}(t) - B \log_{10} \left( \frac{v(t)}{v_{ref}} \right)$$

La constante de velocidad B fue obtenida del ajuste de las medidas de los niveles sonoros a diferentes velocidades sobre el tramo de ensayo y con cada neumático.





una zona deteriorada de la superficie de rodadura de la mezcla con betún BMPN+2%. En la figura 3.32 se aprecia con detalle el deterioro existente en un tramo de unos 20 m.



Fig. 3.32 Detalle del deterioro superficial en el tramo T4, en la mezcla BMPN+2%.

### **TRAMOS T2 Y T3**

La zona de estudio cuyos resultados se muestran a continuación son los dos sentidos de la carretera B-140 entre el kilómetro 2+660 y el 3+800 situados entre Sabadell y Santa Perpetua de Mógoda (T2 sentido Sabadell y T3 sentido Santa Perpetua de Mógoda, fig. 3.33).



Fig. 3.33 Foto aérea de la zona de ensayo en la B-140. El tramo 2 indica el sentido Sabadell y el tramo T3 indica el sentido Santa Perpetua de Mógoda.

### A.3) Evolución de los niveles sonoros en el Tramo T2

Las medidas experimentales se desarrollaron en las mismas condiciones que en los otros tramos anteriormente descritos.

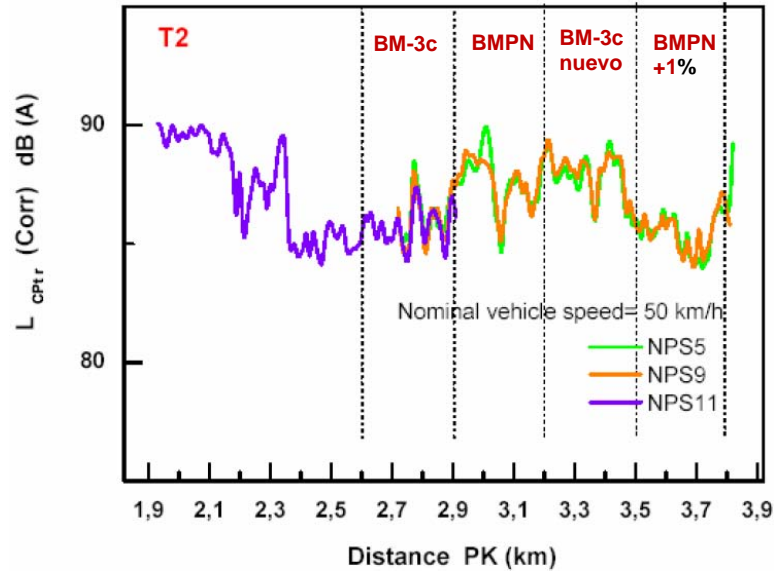


Fig. 3.34 Evolución de los niveles sonoros medios registrados en el tramo de ensayo denominado T2 en función de los PKs después de la corrección por velocidad. Neumático de referencia Pirelli P6000.

### A.4) Evolución de los niveles sonoros en el Tramo T3

Las medidas experimentales se desarrollaron en las mismas condiciones que en los otros tramos anteriormente descritos y son las siguientes:

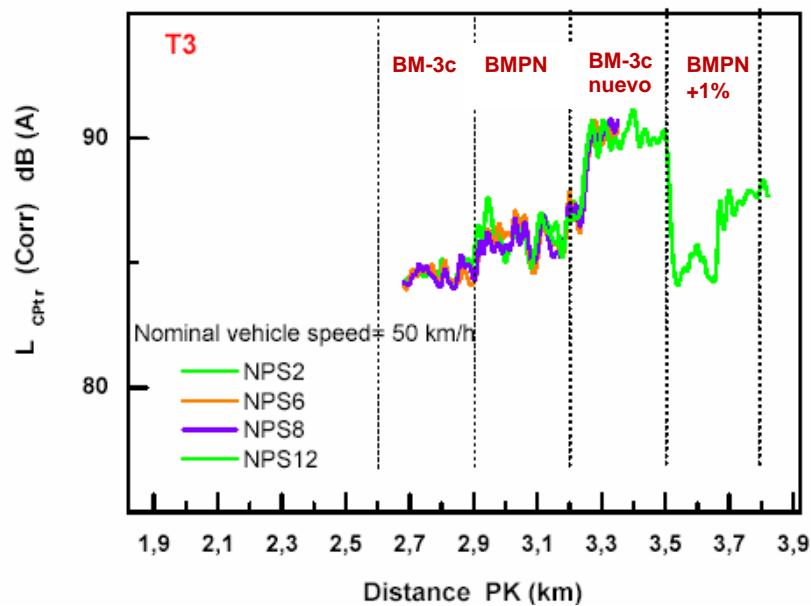


Fig. 3.35 Evolución de los niveles sonoros medios registrados en el tramo de ensayo denominado T3 en función de los PK's después de la corrección por velocidad. Neumático de referencia Pirelli P6000.

# CAPÍTULO IV.

## RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

---

A continuación se presentan todos los resultados obtenidos tanto de los laboratorios como los de la auscultación. Primero, se presentarán todos los valores que hacen referencia a las probetas de la mezcla M-10 utilizada en los tramos experimentales con los distintos tipos de betún. Seguidamente, se presentarán y analizarán todos los resultados que hacen referencia a las características superficiales (textura, CRT y sonoridad) auscultadas en los tramos. Finalmente, se mostrarán las correlaciones que se han obtenido y se evaluará cuál es el efecto de la incorporación del polvo de neumático tanto por vía húmeda como por vía seca.

### **1. CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA UTILIZADA EN LOS DISTINTOS TRAMOS EXPERIMENTALES**

En la tabla 4.1 se adjunta las características mecánicas de las mezclas utilizadas en la construcción de los tramos experimentales, determinadas tanto por el laboratorio de control como por el laboratorio de autocontrol de la planta encargada de la dosificación de las mezclas.

LABORATORIO CONTROL														
TIPO DE BETÚN	TRAMO	PK	FECHA	GRANULOMETRIA						ENSAYO CÁNTABRO				
				TAMICES UNE						% betún		Huecos	Pérdidas (%)	
				12,5	10	4	2	0,5	0,063	s/a	s/m		Densidad	via seca
BM3C	T1 Y T4	3+880 - 4+080	19-10-07	100	85	19	14	10	5,6	5,28	5,01	2,12	4,2	13,1
	T2 Y T3	2+660 - 2+900	23-10-07	100	85	19	14	10	5,6	5,28	5,01	2,12	4,2	13,1
valores medios														
BMPN	T1 Y T4	4+080 - 4+280	24-10-07	100	88	23	17	11	5,4	5,21	4,95	2,19	5,1	9,2
	T2 Y T3	2+900 - 3+200		100	87	22	16	11	6,5	5,29	5,03	2,18	4,8	10,5
valores medios														
BMPN + 1%	T1 Y T4	4+480 - 4+680	18-1-08	100	93	23	16	9	5,0	5,59	5,29	2,16	4,7	9,6
	T2 Y T3	3+500 - 3+800		99	89	22	16	10	4,3	5,38	5,11	2,19	4,1	11,8
valores medios														
BMPN + 2%	T1 Y T4	4+280 - 4+480	18-1-08	99	81	17	12	10	5,2	5,83	5,51	2,07	6,9	14,2
	T2 Y T3	3+200 - 3+500		99	87	20	14	8	5,2	5,61	5,31	2,07	7,0	16,6
valores medios														
LABORATORIO AUTOCONTROL DE LA PLANTA														
TIPO DE BETÚN	TRAMO	PK	FECHA	GRANULOMETRIA						ENSAYO CÁNTABRO				
				TAMICES UNE						% betún		Huecos	Pérdidas (%)	
				12,5	10	4	2	0,5	0,063	s/a	s/m		Densidad	via seca
BM3C	T1 Y T4	3+880 - 4+080	19-10-07	99	84	19	14	11	6,1	5,29	5,02	2,17	10,9	10,1
	T2 Y T3	2+660 - 2+900	23-10-07	99	79	22	17	12	6,6	5,25	4,99	2,00	10,6	8,6
valores medios														
BMPN	T1 Y T4	4+080 - 4+280	24-10-07	100	85	24	18	13	7	5,25	4,99	2,18	12,5	10,2
	T2 Y T3	2+900 - 3+200		100	84	21	17	11	6,3	5,29	5,02	2,17	13,2	10,6
valores medios														
BMPN + 1%	T1 Y T4	4+480 - 4+680	18-1-08	100	92	23	17	12	5,8	5,39	5,12	2,13	7,2	13,3
	T2 Y T3	3+500 - 3+800		100	92	23	17	12	5,8	5,39	5,12	2,13	7,2	13,3
valores medios														
BMPN + 2%	T1 Y T4	4+280 - 4+480	18-1-08	98	80	19	14	9	6	5,67	5,36	2,1	6	15,8
	T2 Y T3	3+200 - 3+500		98	80	19	14	9	6	5,67	5,36	2,1	6	15,8
valores medios														

Tabla 4.1 Propiedades de las mezclas bituminosas M-10 para distintos tipos de betún.

En ella se observa que la granulometría de las diferentes mezclas utilizadas se encuentran dentro del huso granulométrico establecido, aunque en algunos casos no está centrada. Se observa, además, que el contenido de betún es aproximadamente igual al establecido en las fórmulas de trabajo.

Los resultados del ensayo Cántabro obtenidos tanto del control como del autocontrol cumplen en todos los casos con las especificaciones establecidas en el PG-3 y no difieren excesivamente de los determinados en las fórmulas de trabajo. Sin embargo, se aprecia que las mezclas con adición de polvo de neumático por vía seca son más susceptibles al desgaste, tanto por vía seca como por vía húmeda.

Adicionalmente, en la Tabla 4.2 y la figura 4.1 se recogen los resultados de las pérdidas al Cántabro, a diferentes temperaturas, obtenidas en el Laboratorio de Caminos de la UPC sobre probetas elaboradas a partir de las mezclas fabricadas en planta con el betún BMPN con el 1% y 2% respectivamente de polvo de neumático por vía seca.

TIPO DE MEZCLA	PK'S	TEMP. (°C)	DESGASTE (%)
<b>BMPN+1%</b>	3+500 a 3+800	-10	16,79
		10	9,5
		25	7,08
<b>BMPN+1%</b>	4+480 a 4+680	-10	16,09
		10	8,92
		25	6,63
<b>BMPN+2%</b>	3+200 a 3+500	-10	9,81
		10	6,35
		25	5,06
<b>BMPN+2%*</b>	4+280 a 4+480	-10	18,85
		10	10,41
		25	7,17
(*) Corresponde al tramo que falló y fue reemplazado por un BM-3c			

Tabla 4.2 Pérdidas al Cántabro de las mezclas con polvo de neumático por vía seca (UPC).

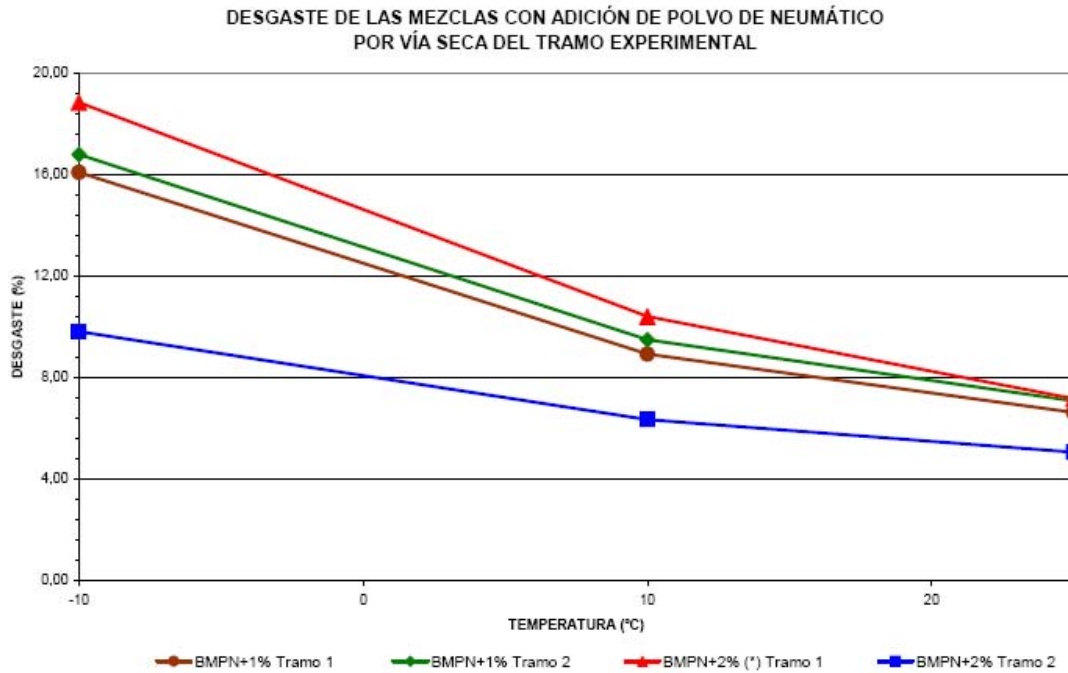


Fig.4.1 Pérdidas al Cántabro de las mezclas con polvo de neumático por vía seca (UPC).

Los resultados ponen de manifiesto que la mezcla con el 2% de polvo de neumático del tramo restituído en primer lugar, aún cumpliendo las especificaciones del Pliego, es la que presenta una resistencia a la disgregación más baja, especialmente a bajas temperaturas.

## 2. EDAD DE LAS MEZCLAS

En la figuras 4.2 y 4.3 se recogen los resultados obtenidos del CRT y textura en función de la edad de las diferentes mezclas. En las gráfica se muestra las edades de las muestras con origen el día de extendido hasta el día 28-02-08 que se tomaron las medidas con el SCRIM.



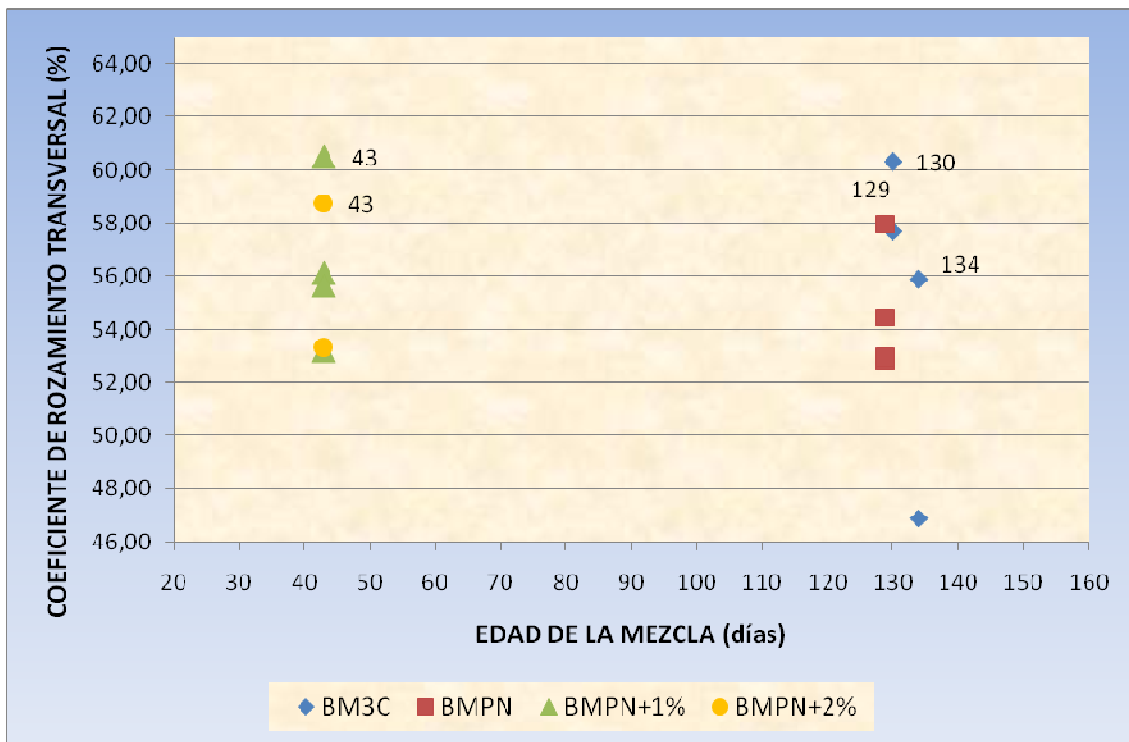


Fig. 4.2 Valores del CRT para las distintas mezclas extendidas en diferentes días.

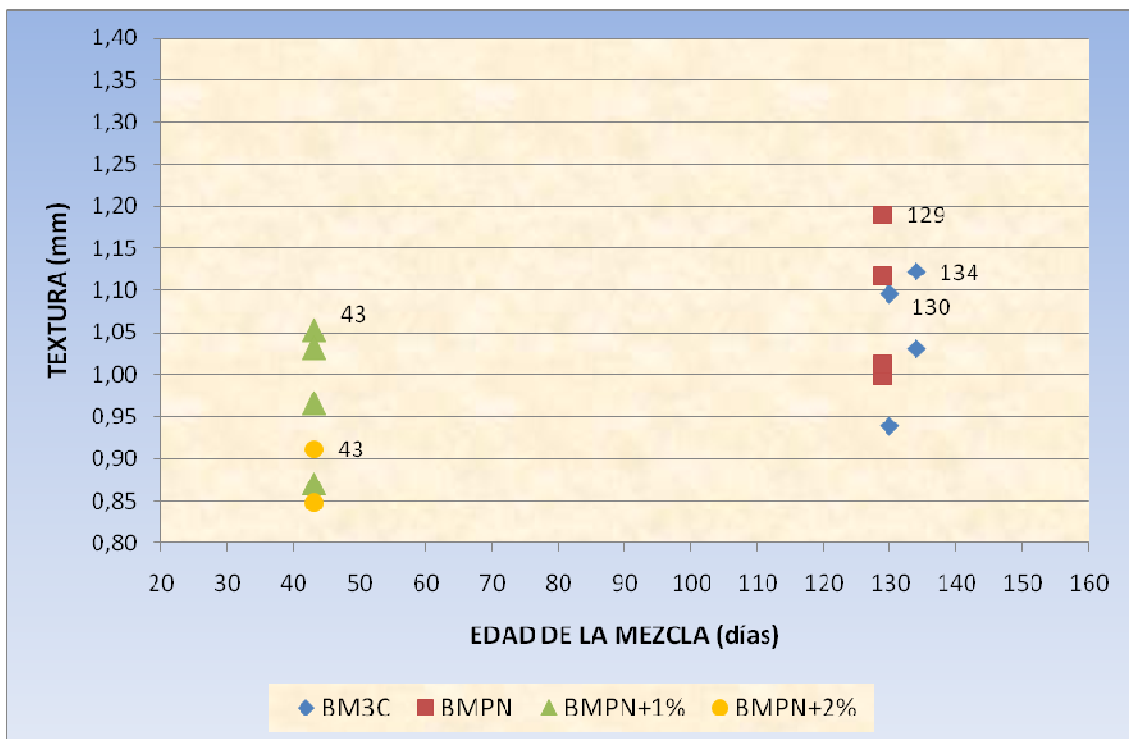


Fig. 4.3 Valores de la textura para las distintas mezclas extendidas en diferentes días.

La Normativa NLT indica que las medidas de CRT debe hacerse una vez transcurridos dos meses de haber soportado la circulación, para que haya eliminado, al menos, parte de la película de ligante que envuelve el árido.

En este caso, las mezclas BM-3c y BMPN si cumplen con los requisitos especificados por la normativa. En cambio, las mezclas con BMPN+1% y BMPN+2% solamente transcurrieron 43 días desde el extendido hasta la toma de medidas con el SCRIM. El motivo por el cual se acordó que las medidas se tomaron el 28-02-08 fue por la disponibilidad del equipo de medida y por la preocupación de que se produjeran los mismos fallos en el tramo restante de la mezcla con el betún BMPN+2% y con la consecuente pérdida de información del tramo experimental.

Además, para poder ver cómo evolucionan estos parámetros en función del tiempo se debería hacer un seguimiento, al menos, estacional para ver si realmente los valores de CRT y textura tienen una tendencia cíclica, tal y como se ha indicado en el estado del arte en el capítulo II.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las características funcionales que se han analizado y obtenido resultados de los tramos experimentales son: mediciones de textura, mediciones del Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT) y niveles de ruido de rodadura. De este análisis, se desea comparar cuál es la respuesta de los betunes BM-3c y BMPN para determinar el efecto de la utilización de polvo de neumático incorporado por vía húmeda, y cuál es la respuesta de los betunes BMPN, BMPN+1% y BMPN+2% para determinar el mismo efecto de incorporación de polvo de neumático mediante el procedimiento de vía seca en las características funcionales analizadas.

#### 3.1 MEDICIONES DE TEXTURA PARA LOS DIFERENTES TRAMOS

En la tabla 4.3 y en la figura 4.4 se adjuntan los valores de textura para la mezcla M-10 con los diferentes tipos de betún utilizados en los tramos experimentales.

TRAMO	TIPO DE BETUN	Pk's	EXTENDIDO	MEDIDA TEXTURA	VALORES TEXTURA	
					MEDIA	DESVIACIÓN
TRAMO 1: Sabadell pk's 4680-3880	BM-3c	3880-4080	23-10-07	26-02-08	1,10	0,21
	BMPN	4080-4280	24-10-07	26-02-08	1,01	0,08
	BMPN+2%	4280-4480	18-01-08	26-02-08	0,91	0,08
	BMPN+1%	4480-4680	18-01-08	26-02-08	0,97	0,09
TRAMO 2: Sabadell pk's 3880-2660	BM-3c	2660-2900	19-10-07	26-02-08	1,12	0,06
	BMPN	2900-3200	24-10-07	26-02-08	1,19	0,07
	BM-3c *	3200-3500	26-01-08	26-02-08	1,18	0,06
	BMPN+1%	3500-3800	18-01-08	26-02-08	1,03	0,11
TRAMO 3: Sta.Perpetua pk's 2660-3880	BM3C	2660-2900	19-10-07	26-02-08	1,03	0,06
	BMPN	2900-3200	24-10-07	26-02-08	1,12	0,04
	BM-3c *	3200-3500	26-01-08	26-02-08	1,35	0,17
	BMPN+1%	3500-3800	18-01-08	26-02-08	1,05	0,04
TRAMO 4: Sta. Perpetua pk's 3880-4680	BM3C	3880-4080	23-10-07	26-02-08	0,94	0,10
	BMPN	4080-4280	24-10-07	26-02-08	1,00	0,10
	BMPN+2%	4280-4480	18-01-08	26-02-08	0,85	0,07
	BMPN+1%	4480-4680	18-01-08	26-02-08	0,87	0,09

Tabla 4.3 Valores de textura de los distintos tramos.

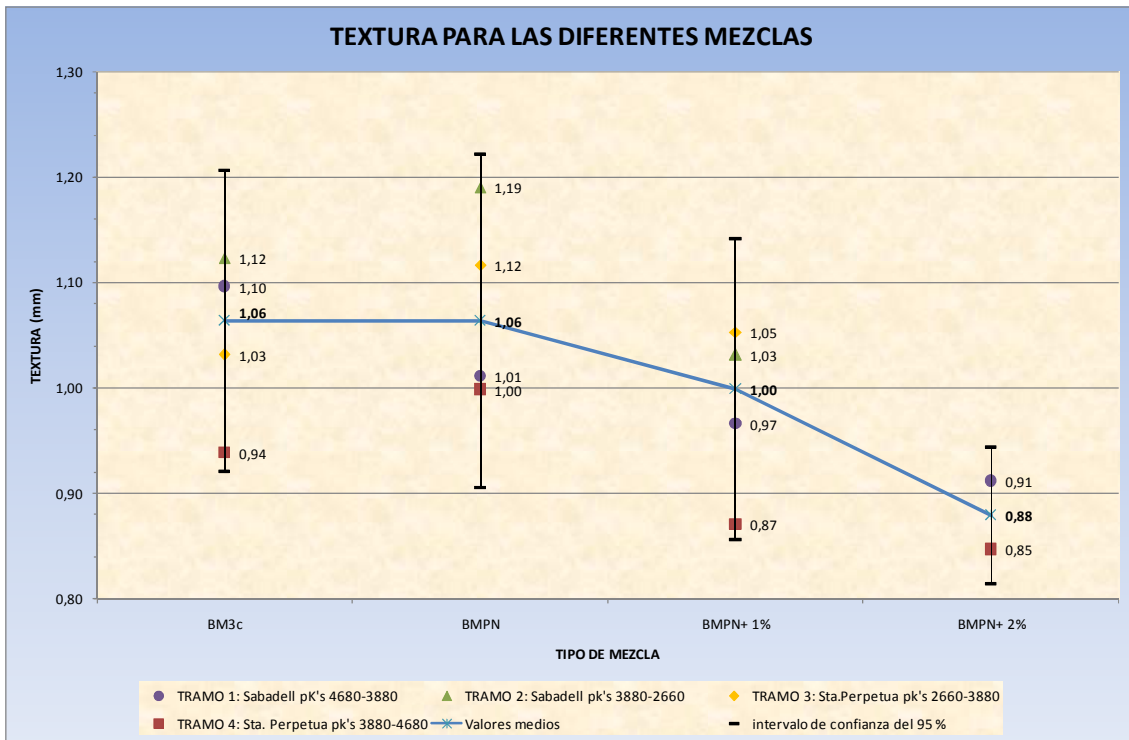


Fig. 4.4 Textura de la mezcla M-10 con los diferentes tipos de mezcla.

Es difícil obtener una tendencia clara para cada tramo debido a la cierta dispersión de los valores correspondientes a la mezcla con diferentes tipos de betún. No obstante, si tomamos los valores medios de cada mezcla, se puede observar que el hecho de incorporar polvo de neumático por vía húmeda no afecta a la textura de la mezcla obteniendo el mismo valor de textura tanto para el BM-3c como el BMPN. En cambio, se puede ver de forma clara que cuanto más se incrementa el porcentaje de polvo de neumático por vía seca, la textura tiende a disminuir. Por lo tanto, podemos decir que la incorporación de polvo de neumático por vía seca tiende a cerrar la mezcla.

### 3.2 MEDICIONES DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO TRANSVERSAL PARA LOS DIFERENTES TRAMOS.

Los valores del coeficiente de rozamiento transversal de la mezcla M-10 con los diferentes tipos de betún se representan en la tabla 4.4 y la figura 4.5.

TRAMO	TIPO DE BETUN	Pk's	EXTENDIDO	MEDIDA CRT	VALORES CRT	
					MEDIA	DESVIACIÓN
TRAMO 1: Sabadell pk's 4680-3880	BM-3c	3880-4080	23-10-07	26-02-08	57,70	3,55
	BMPN	4080-4280	24-10-07	26-02-08	54,47	3,89
	BMPN+2%	4280-4480	18-01-08	26-02-08	53,29	7,61
	BMPN+1%	4480-4680	18-01-08	26-02-08	55,66	2,31
TRAMO 2: Sabadell pk's 3880-2660	BM-3c	2660-2900	19-10-07	26-02-08	55,89	2,10
	BMPN	2900-3200	24-10-07	26-02-08	57,98	1,73
	BM-3c *	3200-3500	26-01-08	26-02-08	56,13	4,81
	BMPN+1%	3500-3800	18-01-08	26-02-08	56,10	2,07
TRAMO 3: Sta.Perpetua pk's 2660-3880	BM3C	2660-2900	19-10-07	26-02-08	46,89	1,85
	BMPN	2900-3200	24-10-07	26-02-08	52,82	1,63
	BM-3c *	3200-3500	26-01-08	26-02-08	64,22	2,63
	BMPN+1%	3500-3800	18-01-08	26-02-08	60,50	2,13
TRAMO 4: Sta. Perpetua pk's 3880-4680	BM3C	3880-4080	23-10-07	26-02-08	60,31	5,06
	BMPN	4080-4280	24-10-07	26-02-08	52,93	2,91
	BMPN+2%	4280-4480	18-01-08	26-02-08	58,76	5,62
	BMPN+1%	4480-4680	18-01-08	26-02-08	53,21	4,70

Tabla 4.4 Valores del Coeficiente de Rozamiento Transversal de los distintos tramos.

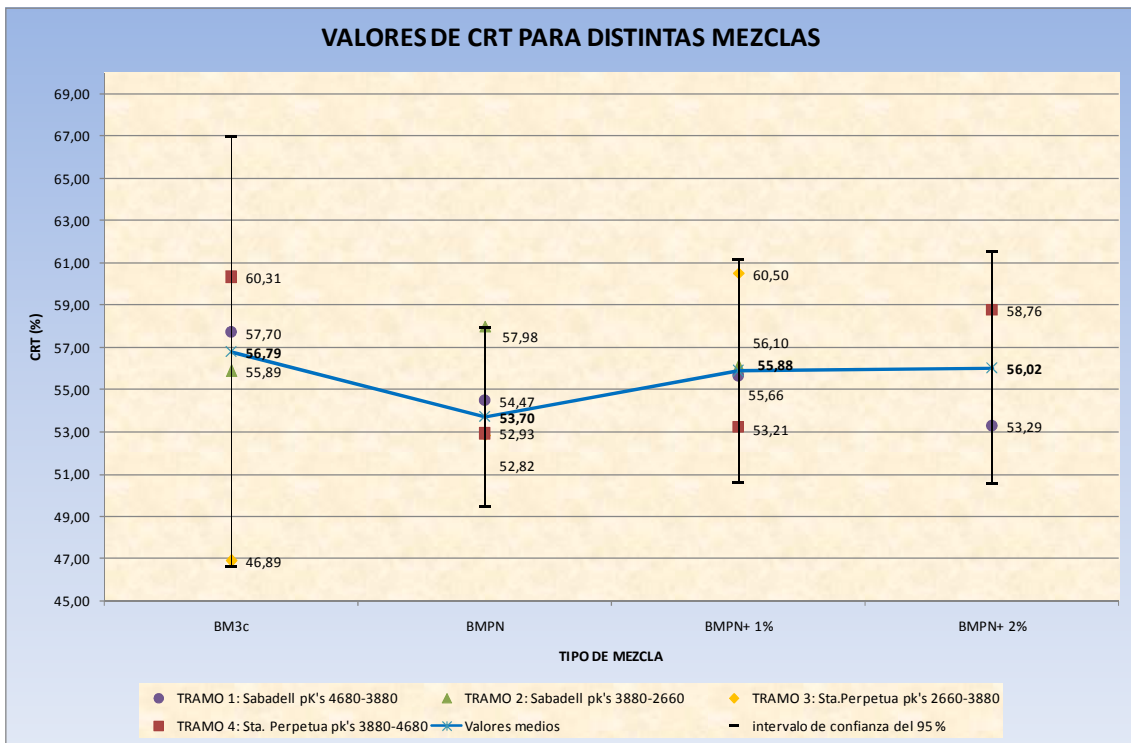


Fig.4.5 Coeficientes de Rozamiento Transversal de la mezcla M-10 con los diferentes tipos de betún.

Primeramente comentar que, debido a la gran dispersión de valores de CRT que se han obtenido para la mezcla con betún BM-3c, pasando de tener el mayor valor de CRT en el tramo 4 a tener el menor valor de CRT en el tramo 3, hace difícil tomar este betún como referencia en comparación con los demás. Sin embargo, de igual modo que hemos visto anteriormente, si tomamos los valores medios se observa que los valores de CRT disminuyen, si la incorporación de polvo de neumático es por vía

húmeda. Este hecho probablemente es debido a la presencia de un mayor espesor de la película de betún que envuelve los áridos.

Por otro lado, si se mira el efecto que produce el incremento de la adición del polvo de neumático por vía seca, éste tiende a aumentar el valor de CRT muy ligeramente a medida que se aumenta el porcentaje de polvo de neumático; aunque en este caso es casi inapreciable.

### 3.3 MEDICIONES DE RUIDO PARA LOS DIFERENTES TRAMOS

#### 3.3.1 Neumático PIRELLI

En la tabla 4.5 y en la figura 4.6 se presentan los niveles de ruido para la mezcla M-10 con los diferentes tipos de betún utilizados en los tramos experimentales con el neumático de referencia Pirelli.

TRAMO	TIPO BETÚN	NEUMÁTICO PIRELLI			
		DATO 1	DATO 2	MEDIA	DESVIACIÓN
TRAMO 1: Sabadell pk's 4680-3880	BM-3c	88,512	87,985	88,25	0,37
	BMPN	87,005	88,656	87,83	1,17
	BMPN+2%	85,645	86,038	85,84	0,28
	BMPN+1%	86,610	86,725	86,67	0,08
TRAMO 2: Sabadell pk's 3880-2660	BM-3c	85,900	86,000	85,95	0,07
	BMPN	87,600	87,500	87,55	0,07
	BMPN+2% *	-	-	-	-
	BMPN+1%	85,200	85,300	85,25	0,07
TRAMO 3: Sta.Perpetua pk's 2660-3880	BM-3c	84,800	84,500	84,65	0,21
	BMPN	86,300	86,100	86,20	0,14
	BMPN+2% *	-	-	-	-
	BMPN+1%	-	87,000	87,00	0,00
TRAMO 4: Sta. Perpetua pk's 3880- 4680	BM-3c	85,141	85,143	85,14	0,00
	BMPN	86,199	86,515	86,36	0,22
	BMPN+2%	85,843	86,349	86,10	0,36
	BMPN+1%	85,459	85,910	85,68	0,32

Tabla. 4.5 Niveles de ruido para los diferentes tramos con el neumático PIRELLI.

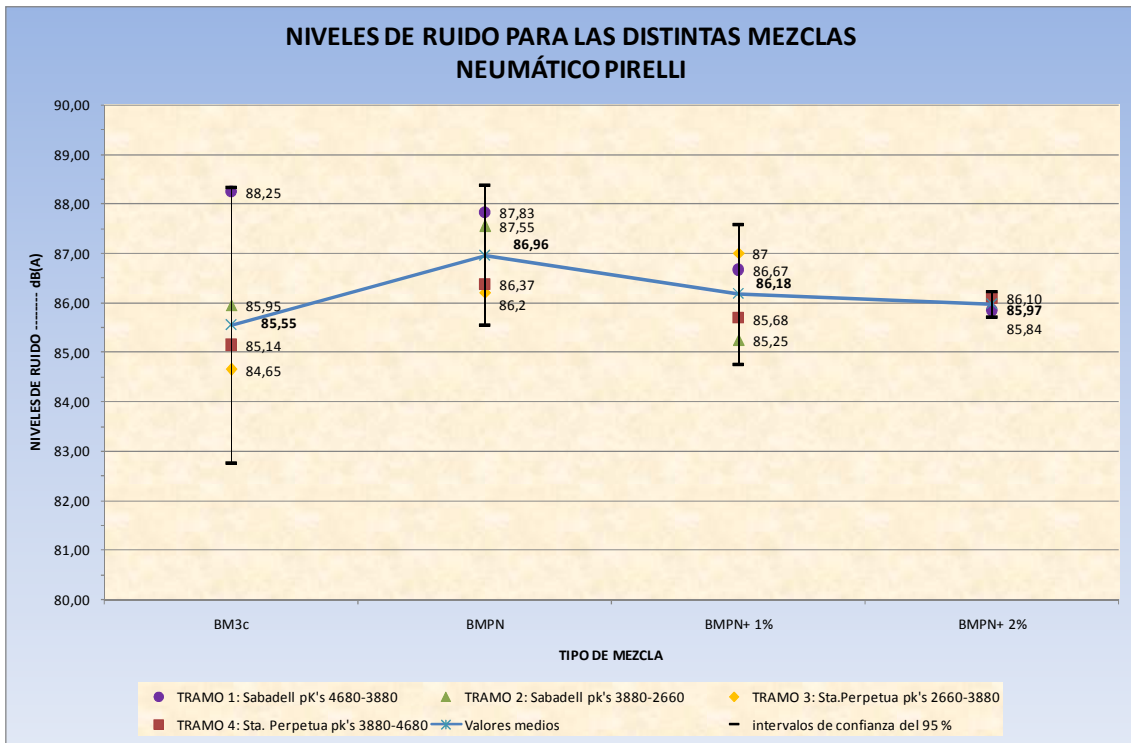


Fig.4.6 Comparativa de los niveles de ruido para los diferentes tramos con el neumático PIRELLI.

En la figura 4.6 se puede observar que los niveles de ruido para una misma mezcla con BM-3c en los distintos tramos están comprendidos en un intervalo de unos 5dB(A) aproximadamente. Se puede ver que para el tramo 1, el nivel de ruido de la mezcla BM-3c es de aproximadamente 88 dB(A), siendo la mezcla más ruidosa en comparación con las demás. En cambio, el nivel de ruido en el tramo 3 de la misma mezcla con BM-3c (84 dB(A)), a diferencia de las demás mezclas, es la que tiene menor nivel de ruido; es decir, puede ser que en un tramo sea la mezcla más ruidosa y en otro tramo la más silenciosa.

Esta dispersión en los datos sobre la mezcla BM-3c es más elevada que en el resto de las mezclas, con lo que es difícil considerar ésta como la de referencia. En este sentido, se hace difícil evaluar el efecto que tiene la adición del polvo de neumático por vía húmeda, pero al comparar los niveles sobre las mezclas con betunes BMPN, BMPN+1% y BMPN+2% puede observarse una clara tendencia a disminuir el ruido de rodadura. La disminución del BMPN+1% en vía seca respecto al BMPN en vía húmeda es de 1 dB(A). Al mismo tiempo, se puede observar que cuanto mayor es el porcentaje de polvo de neumático añadido a la mezcla en vía seca, menor es el nivel de ruido de rodadura auscultado; aunque la diferencia de decibeles para este tipo de neumático es poco significativa.

### 3.3.2 Neumático AVON ZV1

Los niveles de ruido medidos de la mezcla M-10 con los diferentes tipos de betún para el neumático Avon ZV1 se adjuntan en la tabla 4.6 y en la figura 4.7.



TRAMO	TIPO BETÓN	NEUMÁTICO AVON ZV1			
		DATO 1	DATO 2	MEDIA	DESVIACIÓN
TRAMO 1: Sabadell pk's 4680-3880	BM-3c	89,584	89,704	89,64	0,08
	BMPN	88,616	88,591	88,60	0,02
	BMPN+2%	86,667	86,893	86,78	0,16
	BMPN+1%	87,856	88,407	88,13	0,39
TRAMO 2: Sabadell pk's 3880-2660	BM-3c	87,700	87,400	87,55	0,21
	BMPN	89,300	88,900	89,1	0,28
	BMPN+2% *	-	-	-	-
	BMPN+1%	86,700	86,900	86,8	0,14
TRAMO 3: Sta.Perpetua pk's 2660-3880	BM-3c	86,400	86,500	86,45	0,07
	BMPN	87,500	87,400	87,45	0,07
	BMPN+2% *	-	-	-	-
	BMPN+1%	87,400	88,400	87,90	0,00
TRAMO 4: Sta. Perpetua pk's 3880-4680	BM-3c	86,208	86,805	86,51	0,42
	BMPN	87,146	87,607	87,38	0,33
	BMPN+2%	87,815	87,885	87,85	0,05
	BMPN+1%	87,571	87,762	87,67	0,14

Tabla 4.6 Niveles de ruido para los diferentes tramos con el neumático AVON ZV1.

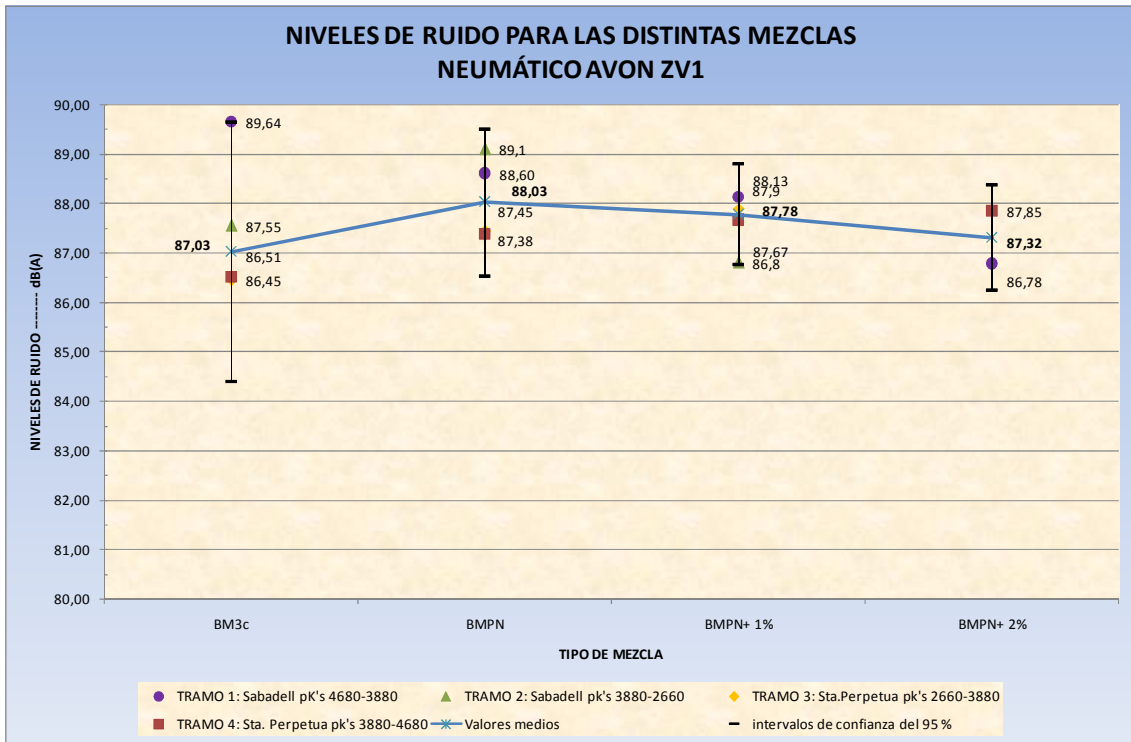


Fig. 4.7 Comparativa de los niveles de ruido para los diferentes tramos con el neumático AVON ZV1.

Aunque los valores medios de todas las mezclas analizadas difieren en 1dB respecto a las mediciones realizadas con el neumático de referencia Pirelli, se puede observar que la tendencia de las mezclas es la misma que las comentadas anteriormente. Este

hecho pone de manifiesto y reafirma la influencia que tiene los neumáticos en los niveles de ruido de rodadura. Por este motivo, se utilizan varios tipos de neumáticos para dar mayor fiabilidad a los resultados finales de los niveles sonoros obtenidos con el método de proximidad (CPX).

### 3.3.3 Neumático AVON CR322

En la tabla 4.7 y en la figura 4.8 se presentan los niveles de ruido para la mezcla M-10 con los diferentes tipos de betún utilizados en los tramos experimentales con el neumático de referencia Avon CR322.

TRAMO	TIPO BETÚN	NEUMÁTICO AVON CR 322			
		DATO 1	DATO 2	MEDIA	DESVIACIÓN
TRAMO 1: Sabadell pk's 4680-3880	BM-3c	88,799	88,888	88,84	0,06
	BMPN	87,989	88,277	88,13	0,20
	BMPN+2%	87,670	87,305	87,49	0,26
	BMPN+1%	88,225	87,760	87,99	0,33
TRAMO 2: Sabadell pk's 3880-2660	BM-3c	86,600	86,600	86,6	0,00
	BMPN	88,100	88,200	88,15	0,07
	BMPN+2% *	-	-	-	-
	BMPN+1%	86,800	-	86,8	0,00
TRAMO 3: Sta.Perpetua pk's 2660-3880	BM-3c	85,600	-	85,60	0,00
	BMPN	86,800	-	86,80	0,00
	BMPN+2% *	-	-	-	-
	BMPN+1%	87,500	-	87,50	0,00
TRAMO 4: Sta. Perpetua pk's 3880- 4680	BM-3c	-	85,681	85,68	0,00
	BMPN	86,240	86,181	86,21	0,04
	BMPN+2%	87,255	87,362	87,31	0,08
	BMPN+1%	86,102	86,354	86,23	0,18

Tabla 4.7 Niveles de ruido para los diferentes tramos con el neumático AVON CR 322.

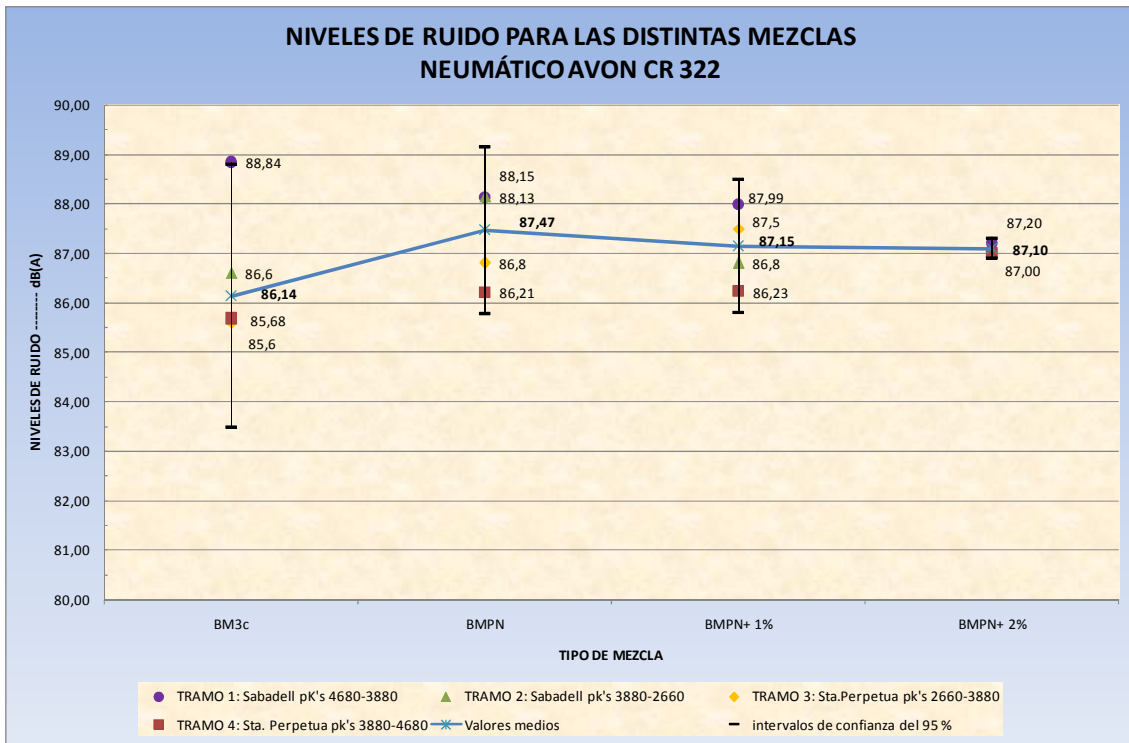


Fig. 4.8 Comparativa de los niveles de ruido para los diferentes tramos con el neumático AVON CR 322.

Del mismo modo que ocurría con los otros dos neumáticos de referencia comentados anteriormente, se puede observar que la tendencia se repite. En este caso, se puede ver que el efecto de la adición del polvo de neumático sobre las mezclas BMPN en vía húmeda, y BMPN+1% y BMPN+2% en vía seca es casi inapreciable. La diferencia entre niveles de ruido entre BMPN y el BMPN+1% no llega al 0,5 dB(A), y entre BMPN+1% y BMPN+2% es inexistente.

#### 4. CORRELACIONES OBTENIDAS

En este apartado se adjuntan las posibles correlaciones que se pueden obtener con las mezclas analizadas.

##### 4.1 CORRELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE RUIDO Y LA TEXTURA

En la figura 4.9 se puede observar cuál es la influencia de la textura en los niveles de ruido de las mezclas BM-3c, BMPN, BMPN+1% y BMPN+2%.

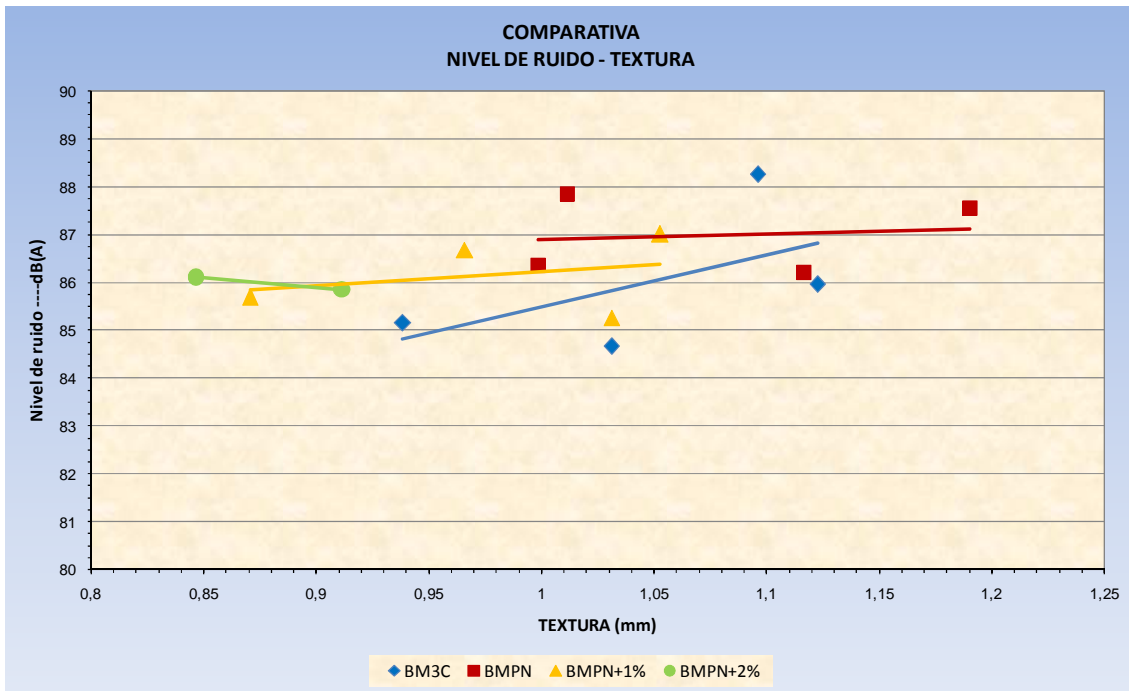


Fig. 4.9 Correlación entre los niveles de ruido y la textura.

Aunque, tal como se ha comentado anteriormente, existe una cierta dispersión en los resultados de la mezcla con betún BM-3c, se puede ver que a medida que aumenta los valores de textura, los niveles de ruido también aumentan. En cambio, para las mezclas con adición de polvo de neumático tanto por vía húmeda como por vía seca, parece que los valores de ruido en función de la textura mantengan una línea constante sin apreciarse grandes cambios en los niveles a medida que se aumenta los resultados de textura. Comentar que, debido a que se disponían de pocos resultados de dos tramos, de los cuatro posibles que se habían previsto inicialmente con BMPN+2%, es difícil sacar conclusiones claras y representativas para este tipo de mezcla.

#### 4.2 CORRELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE RUIDO Y EL CRT

En la figura 4.10 se muestra la correlación obtenida entre los niveles de ruido de rodadura del pavimento y los valores del coeficiente de rozamiento transversal.

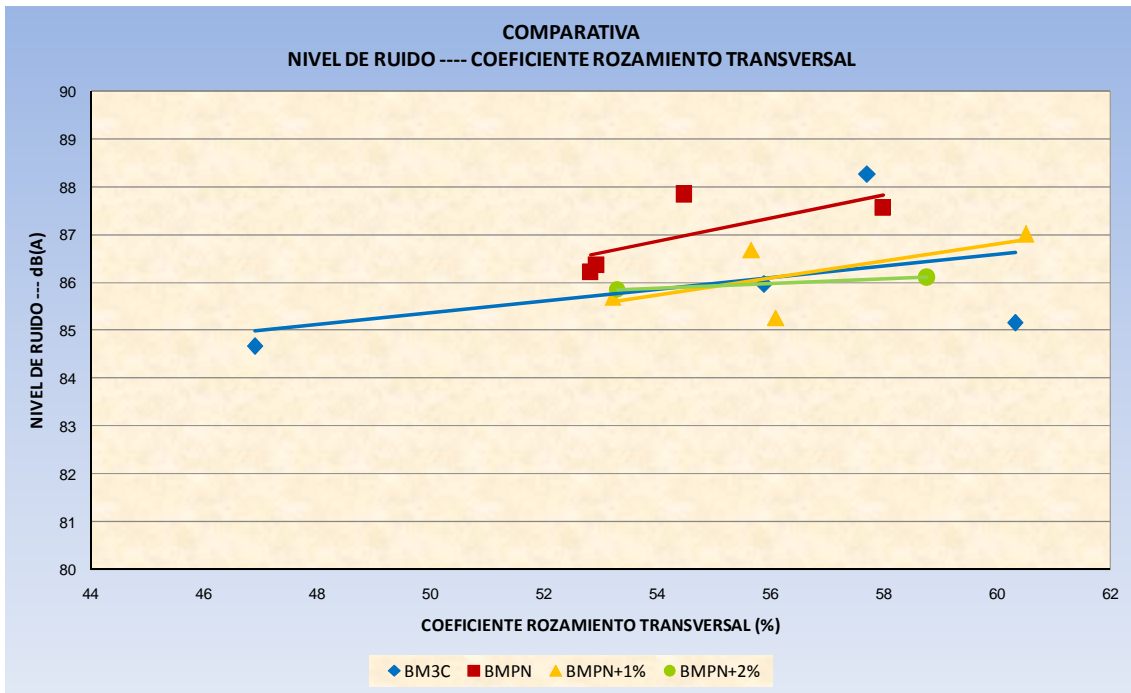


Fig.4.10 Correlación entre los niveles de ruido y el coeficiente de rozamiento.

A pesar de la dispersión observada en los resultados de la mezcla BM-3c, en términos generales se puede apreciar que, existe una tendencia creciente clara entre los niveles de ruido en función de los valores de CRT para todas las mezclas. Es decir, cuanto mayor es el coeficiente de rozamiento transversal, mayor es el nivel de ruido.

# CAPÍTULO V.

## CONCLUSIONES

---

A continuación se expondrán brevemente las que cabe considerar las principales conclusiones a las que se ha llegado al estudiar el efecto de la incorporación del polvo de neumático en una mezcla M-10 con diferentes tipos de betún sobre las características funcionales.

De los resultados obtenidos de textura, coeficiente de rozamiento transversal y niveles de ruido sobre las distintas mezclas utilizadas en los tramos experimentales de la carretera B-140 entre Sabadell y Santa Perpétua, se puede concluir:

- De las dos vías de incorporación del caucho a las mezclas asfálticas – vía húmeda o fabricación de ligantes modificados y vía seca o adición directa del caucho como si de una fracción de los áridos se tratase – la segunda es la más problemática desde el punto de vista de la tecnología viaria pero es la puede absorber mayor cantidad potencial de NFU's.
- Existen variaciones importantes en los valores de textura, coeficiente de rozamiento transversal y niveles de ruido sobre un mismo tipo de mezcla en los diferentes tramos construidos. Estos resultados parecerían indicar que la puesta en obra, una diferente evolución del estado de conservación de las mezclas, debido al trazado de la vía, al diferente tipo de tráfico soportado, o a las diferentes condiciones de circulación en cada tramo, tendrían una influencia considerable en los resultados obtenidos. Este hecho, pone de manifiesto la importancia que tienen las condiciones de ejecución, el adiestramiento de las



empresas encargadas de utilizar este tipo de mezclas y las condiciones de servicio en las características funcionales del pavimento.

- Los resultados obtenidos de los coeficientes de rozamiento transversal (CRT) ponen de manifiesto la elevada dispersión obtenida en los valores sobre la mezcla con betún BM-3c tomada como muestra de referencia. En este sentido se hace imposible sacar conclusiones sobre cuál es el efecto de la incorporación del polvo de neumático por vía húmeda. En cambio, parece obtenerse un ligero aumento en los valores de CRT al añadir el polvo de neumático por vía seca aunque la diferencia de utilizar un 1% o un 2% no es significativa.
- Las medidas obtenidas de textura para las mezclas con el mismo tipo de betún de los diferentes tramos demuestran que, la incorporación de polvo de neumático por vía húmeda no afecta de forma significativa en los valores de textura de la mezcla. Por otro lado, en las que se incorpora por vía seca se pone de manifiesto que a medida que se aumenta el porcentaje de polvo de neumático, disminuyen la textura de las mezclas.
- Los niveles de ruido obtenidos, para cualquiera de los neumáticos utilizados, muestran, de nuevo, una gran dispersión para la mezcla con betún BM-3c, que hace muy difícil comparar esta mezcla con ninguna de las otras. Sin embargo, parece observarse cierta disminución del nivel de ruido, de hasta 1dB(A), al incorporar polvo de neumático por vía seca. Esta disminución es mayor a medida que se incrementa el porcentaje de polvo de neumático utilizado.
- De las correlaciones obtenidas entre los parámetros analizados, no parece que la textura en las mezclas con polvo de neumático (incorporado tanto por vía húmeda como por vía seca) tenga influencia sobre el nivel de ruido (en cambio si se aprecia este efecto en la mezcla con betún BM-3c, que aumenta el ruido al aumentar la textura). Además, parece observarse cierta tendencia a aumentar el nivel de ruido a medida que aumenta el CRT, para cualquiera de las mezclas analizadas.

## LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Para finalizar hay que señalar que cabría plantear al menos algunas líneas de trabajo para continuar en el avance del conocimiento de las mezclas asfálticas con polvo de neumático y su empleo en los firmes:

- Estudio de los valores de textura, coeficiente de rozamiento y niveles de ruido de los tramos experimentales una vez transcurridos diferentes periodos con objeto de analizar la influencia estacional y de servicio (paso del tráfico) sobre estos parámetros funcionales.
- Evaluación de la durabilidad de las mezclas con caucho y de la influencia que tiene la digestión del caucho en ella.

- Análisis coste-beneficio de la utilización de mezclas asfálticas que incorporen polvo de neumático tanto por vía húmeda como por vía seca respecto a mezclas convencionales.
- Estudio de la posibilidad de reciclar las mezclas bituminosas fabricadas con polvo de neumático en cuanto se agote la capacidad de servicio.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1]. Witoszek Schulz, B, et al. "Diseño, desarrollo y seguimiento de un aglomerado asfáltico con polvo de caucho, procedente del reciclado de los neumáticos usados, e incorporación por vía seca". Congreso Nacional de firmes. León 2004.
- [2]. Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU). Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Madrid 2007
- [3]. II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (PNNFU) 2007-2015. Ministerio de Medio Ambiente.
- [4]. Gallego Medina, J. "Rehabilitación de pavimentos rígidos con betún de alto contenido de caucho. Ejemplos en una autopista española". Revista de Obras Públicas nº 3439. Diciembre 2003.
- [5]. Gallego Medina, J. "Tipos de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia española en la conservación de carreteras". IX Jornadas de Conservación. Salamanca 2004.

- 
- [6]. Ruiz Rubio, A. "Utilización de neumáticos fuera de uso en mezclas bituminosas". Jornada técnica Intevia sobre la aplicación de residuos en carreteras. Barcelona 2007.
- [7]. "Asphalt Rubber Usage Guide". California Department of Transportation. January 2003
- [8]. Pérez Jiménez, F. "Caracterización y estudio de ligantes y mezclas con polvo de neumáticos". Jornada Intevia sobre la aplicación de residuos en carreteras. Barcelona 2007.
- [9]. Martínez Sánchez, J. "Normativa y planificación ambiental de los NFU". Jornada técnica de Intevia sobre el empleo de polvo de neumáticos fuera de uso en mezclas bituminosas. Valencia 2007.
- [10]. Kaloush, K; Witczak, M.W; Way, G.B "Performance evaluation of Arizona asphalt rubber mixtures using advanced dynamic material characterization tests". Report Arizona Department of Transport 2002
- [11]. Tomás Raz, R. "El polvo de neumático fuera de uso. Aplicaciones". Jornada Técnica sobre el empleo de polvo de neumático fuera de uso en mezclas bituminosas. Valencia 2007.
- [12]. Bardesi, A. "Nuevos ligantes modificados con polvo de caucho". Jornada Técnica sobre el empleo de polvo de neumático fuera de uso en mezclas bituminosas. Valencia 2007.
- [13]. López Gamiz, E. "La reflexión de fisuras en firmes de base rígida utilizando polvo de neumático". Experiencias en empresa AUMAR. Jornada Técnica sobre el empleo de polvo de neumático fuera de uso en mezclas bituminosas. Valencia 2007.
- [14]. Vázquez, E. "Experiencias en la red de la Generalitat de Cataluña". Jornada Técnica sobre el empleo de polvo de neumático fuera de uso en mezclas bituminosas. Valencia. Abril 2007.
- [15]. Potti, J.J, Peña, J.L. "Desarrollo de una gama de productos a base de betún modificado con polvo de neumáticos. Casos prácticos.". Jornada Técnica sobre la panorámica actual de las mezclas bituminosas, un nuevo enfoque. Madrid 2005.
- [16]. Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Ministerio de Fomento y Medio Ambiente. CEDEX 2007.
- [17]. Soto, J.A.; Colás, M<sup>a</sup>M. "Betunes modificados estables al almacenamiento mediante el empleo de polvo de caucho reactivado procedente de NFU's, para su uso en carreteras". IV Congreso Nacional de Firmes. Ávila 2006.

- 
- [18]. Pérez Lepe, A. y Páez Dueñas, A. "Medida de la estabilidad del betún polvo de neumáticos por solubilidad en disolventes orgánicos." IV Congreso Nacional de Firms. Ávila 2006.
- [19]. Ruiz, A. Panorámica Española de las mezclas bituminosas. Desarrollos recientes. Consideraciones de Futuro. CEDEX. Junio 2005
- [20]. Gallego Medina, J. "Mezclas bituminosas fabricadas con betunes de alto contenido de caucho. Aplicaciones al recrecimiento de un pavimento rígido en la A-7". Revista de Obras Públicas nº 34. Diciembre 2003.
- [21]. Gallego Medina, J. "Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos." Tesis doctoral. Madrid 1999
- [22]. Cortes, J. "Neumático: materia y energía reutilizable. Documento divulgativo de Neumáticos Michelin". Madrid 1996.
- [23]. Marco Escolano, P. "Tramo experimental en Toro. Utilización de diferentes betunes en capas de rodadura". Congreso Nacional de Firms. León 2004.
- [24]. Muñoz Sanz, J. "Evaluación del ruido de rodadura en carreteras". Publicación CEDEX sobre la 3ª Edición de Evaluación y Medidas Correctoras para Reducir el Ruido Ambiental por Infraestructuras de Transporte y Urbano (LA2IC). UCLM, Ciudad Real 2006.
- [25]. Expósito Paje y otros. "Evaluación acústica de la superficie de rodadura para su gestión y Rehabilitación". Congreso Nacional de Firms. León 2004.
- [26]. García Serrada, C. y otros. "Investigación de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con polvo de neumático usados para la reducción del ruido de rodadura". Jornada Técnica sobre la panorámica actual de las mezclas bituminosas, un nuevo enfoque. Madrid 2005
- [27]. Bernhard, R.; Wayson, R L "An Introduction to Tire/Pavement Noise of Asphalt Pavement". Final Research Report Number: SQDH 2005-1. Purdue University, 2005
- [28]. Achútegui, F. "Características superficiales de los firmes de carretera". CEDEX, Madrid 2005
- [29]. Hanson, D; James, R S; NeSmith, C. "Tire/pavement noise Study". National Center for Asphalt Technology (NCAT Report 04-02). Agosto 2004.

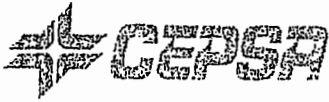
- [30]. Wayson, R.L. "Relationship Between Pavement surface Texture and Highway Traffic Noise". National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) synthesis 268. Washington, DC 1999.
  
- [31]. "Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces". FEHRL Report 2006/02. Proyecto SILVIA 2006
  
- [32]. Sandberg, U. "The Poroelastic Road Surface. Results of an Experiment in Stockholm". Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI). 2005
  
- [33]. Norma NLT-336/92. "Determinación de la resistencia al deslizamiento con el equipo de medida del rozamiento transversal". CEDEX, Madrid 1992



ANEJO I.

CARACTERÍSTICAS DE LOS BETUNES  
Y POLVO DE NEUMÁTICO UTILIZADO  
EN LOS TRAMOS.

---



## BETUN ASFALTICO MODIFICADO

### HOJA DE CARACTERISTICAS

PRODUCTO	: STYRELF 15/60 ADITIVADO (BM-3C	VEHICULO	: 6134BGD
TANQUE	: 8	REMOLQUE	: T04207R
CLIENTE	: FIRTEC SA	ALBARAN	: 200707000011003
DESTINO	: CTRA. B-140, KM. 1,3	FECHA	: 16/10/2007

<u>Característica</u>	<u>Unidad</u>	<u>Metodo Ensayo</u>	<u>Resultado</u>
Penetración ( 25°C; 100g; 5 sg)	0,1 mm	NLT-124/99	56
Punto de Reblandecimiento ( A&B )	0.1mm	NLT-125/99	67
Recuperación Elástica a ( 25°C)	%	NLT-329	72
Ductilidad (5°C,5 cm/min.)	cm	NLT-126	

Este documento se emite por ordenador por lo que no va firmado.



**ENSAYO DE BETUNES**

EP071055-457

 Nº Registro: **IBAB- 2017**

 Peticionario: **FIRTEC, TECNICAS DE FIRMES S.A.**

 Fecha toma: **25-oct-07**

 Obra: **B-140 Sta Perpetua - Sabadell**

 Tipo de betún : **Betún caucho**

 Fecha recepc **25-oct-07**

 Localización toma: **Muestra tomada en planta Barbera.**
**BETUN ORIGINAL**

CARACTERISTICAS	Norma NLT	Resultados	Unidad
Penetración ( 25°C / 100g / 5s )	124	<b>58</b>	0,1mm
Índice de penetración	181	-	
Punto de reblandecimiento ( A y B )	125	<b>64,4</b>	°C
Punto de fragilidad Fraass	182	<b>-12</b>	°C
Ductilidad ( 5cm / min )	126		
a 25°C		-	cm
a 5°C		<b>27</b>	cm
Recuperación elástica por torsión	329	<b>41,7</b>	%
Consistencia mediante el flotador	183	-	s
Solubilidad en disolventes orgánicos	130	-	%
Agua en los materiales bituminosos	123	-	%
Puntos de inflamación y combustión	127	-	°C
Densidad relativa de los mat. bituminosos	122	-	g/cm <sup>3</sup>
Perdida por calentamiento a 163°C	128	-	%
Contenido de parafinas	345	-	%
Contenido de asfaltenos	131	-	%

**ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE PÉLICULA FINA**

CARACTERISTICAS	Norma NLT	Resultados	Unidad
Variación de masa	185	-	%
Penetración ( 25°C / 100g / 5s )	124	-	% p.o
Aumento del punto de reblandecimiento	125	-	°C
Ductilidad ( 5cm / min )	126		
a 25°C		-	cm
a 5°C		-	cm

Observaciones :

VALISTAS : J.P. Luna / Jesus Morrerres



## BETUN ASFALTICO MODIFICADO

### HOJA DE CARACTERÍSTICAS

PRODUCTO	: BETUN CAUCHO	VEHICULO	: 2699DWB
TANQUE	: 1	REMOLQUE	: R7741BBL
CLIENTE	: FIRTEC, SA	ALBARAN	: 200701000002310
DESTINO	: PLANTA DE BARBERA	FECHA	: 17/10/2007

<u>Característica</u>	<u>Unidad</u>	<u>Metodo Ensayo</u>	<u>Resultado</u>
Penetración a 25°C	0,1 mm	NLT-124	57
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	NLT-125	60.4
Recuperación elástica a 25°C	%	NLT-329	45
Recuperación elástica a 40°C	%	NLT-329	

Este documento se emite por ordenador por lo que no va firmado.





00702-  
0070

## BETUN ASFALTICO MODIFICADO

### HOJA DE CARACTERÍSTICAS

PRODUCTO	: BETUN CAUCHO	VEHICULO	: 3740BYM
TANQUE	: 1	REMOLQUE	: R6216BBN
CLIENTE	: FIRTEC, SA	ALBARAN	: 200701000002325
DESTINO	: CTRA B-140 KM 1,3	FECHA	: 18/10/2007

<u>Característica</u>	<u>Unidad</u>	<u>Metodo Ensayo</u>	<u>Resultado</u>
Penetración a 25°C	0,1 mm	NLT-124	57
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	NLT-125	60.4
Recuperación elástica a 25°C	%	NLT-329	45
Recuperación elástica a 40°C	%	NLT-329	

Este documento se emite por ordenador por lo que no va firmado.







**GMN**

Gestión Medioambiental de Neumáticos

<b>FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD</b> <b>NC0-0,5</b>
--

**1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DEL PRODUCTOR**

Denominación	NC0-0,5
Descripción	Granulado caucho 00-0,5
Código	NC0-0,5
Productor	Gestión Medioambiental de Neumáticos, S.L. Pol.Ind. Piverd, s/n 25179 Maials LLEIDA – ESPAÑA

**2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES**

Goma (SBR, BR, goma natural)	del 55% al 75% en peso
Negro Carbono	del 20% al 35% en peso
Fibras textiles	inferior al 5%
Óxido de zinc	inferior al 3%
Azufre	inferior al 2%
Aditivos	inferior al 10%

**3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS**

Cuando se calienta puede emitir humos inflamables e irritantes

Flota con el agua, puede obstruir las tomas de agua.

**Protección ocular:** La granulometría del producto es fina y por tanto según su manejo en forma de granulo puede producir irritación ocular. En este caso se recomienda el uso de gafas protectoras.

**Protección dérmica:** La exposición continuada de la piel puede producir ligera irritación dérmica. Usar guantes y ropa apropiada que cubran brazos y piernas.

**Protección respiratoria:** En forma pulverulenta y en caso de espiración continuada pueden producirse problemas respiratorios a causa de la irritación de las vías respiratorias. Se recomienda el uso de mascarillas de protección respiratoria.

**Información carcinogénica:** En caso de incendio desprende gases nocivos que resultan irritantes para el sistema respiratorio y pueden causar mareos y respiración dificultosa.

**Ingestión continuada:** No se considera como ruta de posible peligro. No obstante en caso de ingestión su Índice PEEP es menor de 3.2.



#### 4. PRECAUCIONES Y PRIMEROS AUXILIOS

##### Contacto con los ojos

En caso de contacto con los ojos, lavar estos con abundante agua, manteniendo abiertos los párpados. Acto seguido consultar al médico.

##### Después de su ingestión accidental

En caso de haber ingerido el producto dar agua a beber, enjuagar varias veces la boca. En caso de malestar consultar a un médico

##### Contacto con la piel

Lavar las zonas en contacto con abundante agua y jabón, puede producir ligero enrojecimiento de la piel.

##### Inhalación - Espiración

En caso de incendio e inhalación de gases, trasladarse a una zona ventilada.

#### 5. PELIGROS DE INCENDIO

En caso de producirse incendio en sus proximidades, utilizar los medios de extinción que proceda, teniendo cuidado siempre que, de ser agua, no llegue a desagües, canalizaciones o cauces de ríos.

Aunque el polvo antibrasa y espumógenos son agentes de extinción de uso general, es conveniente hacer un plan de PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS para cada almacenamiento, teniendo en cuenta las particularidades del mismo.

Debe de procederse, además de los trabajos propios de extinción del incendio, a enfriar los recipientes próximos que contengan productos que puedan inflamarse o explotar y todos aquellos focos calientes cercanos, hasta que queden totalmente fríos y sin puntos de ignición.

**Extinción:** Mediante espumas, químicos secos, CO2 y agua pulverizada.

Una contraindicación para la extinción del incendio sería usar agua directamente en forma de chorro, ya que puede dispersar el producto y alimentar el fuego.

Los equipos de protección usados en este caso serán guantes y traje resistentes al calor, aparato de respiración autónoma si hay humos densos.

**Ignición:** Para que pueda iniciarse la combustión se requiere la aplicación de llama a 176° C de combustión manera continuada.

Una vez encendido el caucho es difícil de extinguir.

Los gases de combustión son tóxicos. Cuando exista alta concentración de humos utilizar aparato de respiración autónoma.

**Explosión:** No existe posibilidad.

**Auto-Combustión:** No se tiene constancia de combustión espontánea.



## 6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones personales: usar las protecciones personales (ver punto 9).

Precauciones medioambientales: evitar que el producto alcance los desagües o cauces.

## 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAJE

En general los operarios en contacto con el producto deberán utilizar guantes y vestimenta apropiada, manga larga y pantalón hasta el tobillo.

Dependiendo de la aplicación final y el tamaño de partícula < 1 mm se requiere la utilización de máscaras de protección respiratoria.

Durante su manipulación y almacenamiento es necesario prever de ventilación suficiente en las áreas de trabajo y prohibición de fumar en el recinto donde se manipula y almacena.

Manipulación: el producto puede acumular o provocar cargas electrostáticas durante su manipulación. Los equipos deben estar correctamente conectados a tierra. No fumar, comer o beber durante la manipulación del producto.

Almacenamiento en el exterior: El producto deberá estar protegido en su embalaje, habitualmente en sacos o big-bags y protegido de la acción directa de los rayos solares. En el caso de que dicho almacenamiento vaya a prolongarse y con el fin de proteger el embalaje de la acción de la lluvia y el sol, con mayor motivo en época estival, es recomendable proteger el embalaje con lonas de cubrición.

Almacenamiento en el interior: Se recomienda realizarlo en lugares secos bien ventilados y en condiciones de temperatura ambiente entre los 0 y 38° C.

## 8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

### Limites de extinción:

Protección respiratoria: en caso de concentración, utilizar mascarilla con filtro.

Protección de manos y piel: usar guantes, calzado y ropa de manga larga.

Protección ocular: usar gafas panorámicas cerradas y ajustadas a la cara.

## 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Caucho con una pureza del 88 al 95 %

Forma.....	Sólida en granza o polvoriento
Color.....	Negro
Olor.....	Goma
Punto de fusión.....	115° C
Temperatura Ignición.....	321 ° C de manera continuada durante 50" seg.
Explosión.....	No explosivo
Densidad aparente.....	500 a 600 Kg/m3
PH.....	Neutro
Solubilidad.....	Insoluble en agua, parcialmente soluble en acetona



**GMN**

Gestión Medioambiental de Neumáticos

## 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad: El producto es estable

Incompatibilidad: No se conoce incompatibilidad de este con otros productos.

Descomposición: No puede producirse si está correctamente almacenado. No obstante, a temperaturas del orden de 177°C se inicia la descomposición polimérica.

## 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

No existe información toxicológica de este producto, no obstante sus componentes pueden producir irritación.

Teléfono de información del Instituto Nacional de Toxicología (funciona las 24 horas del día)

915 620 420

## 12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Eco toxicidad: No es peligroso, material sólido e insoluble en agua.

Biodegradabilidad: Muy resistente a la biodegradabilidad.

## 13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACIÓN

## 14. INFORMACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE

Producto no peligroso de acuerdo con Rn 3320 (2) GGVS.

## 15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

## 16. OTRAS INFORMACIONES

La información aquí contenida se refiere únicamente al material específico identificado. GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL DE NEUMÁTICOS cree que tal información es exacta y fiable a fecha de emisión de esta hoja de seguridad, pero no se responsabiliza, ni garantiza, expresa o implícitamente su exactitud, veracidad o que la información sea concreta, y que los datos de la misma no pueden ser considerados como garantía en sentido jurídico por lo que GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL DE NEUMÁTICOS asuma responsabilidad legal.

Se debe señalar que las propiedades típicas mencionadas son a título informativo y no constituyen ninguna especificación.

El receptor de nuestro producto deberá observar, bajo su responsabilidad, las reglamentaciones y normativas correspondientes.

ANEJO II.

CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA

---



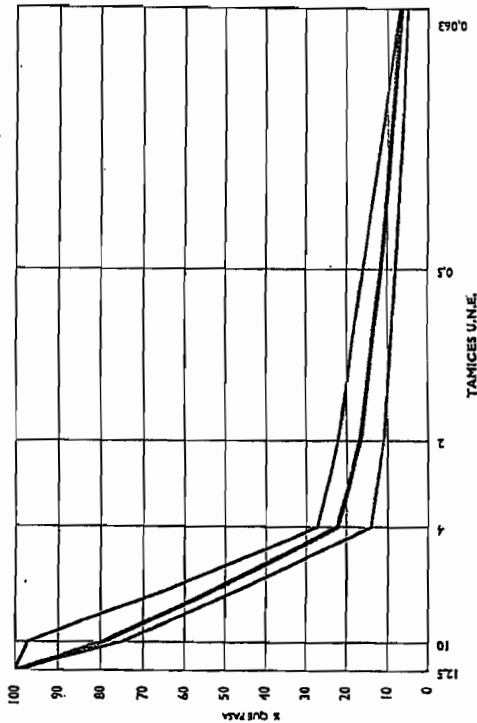
MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE  
CONTROL PLANTA

FECHA DE TOMA: 23/10/07 N° REGISTRO: FRM-2726

ENSAYO DE EXTRACCIÓN

PETICIONARIO:	D.P.T. I.O.P.	5,25
OBRA:	B-140 Sabadell	4,99
LOCALIZACIÓN:		1,3
SUMINISTRADOR:	FIRTEC	
PLANTA:	Barberà del Valles	
ÁRIDO GRUESO:	GRANÍTICO	2,18
ÁRIDO FINO:	CALIZO	3,5
T. DE TOMA (C°):	172	8,6
MATRICULA:	B-3011-WB	10,6

MEZCLA BITUMINOSA M-10 (Según OC/5/2001)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4	2	0,5	0,063
% QUE PASA	99	79	22	17	12	6,6

OBSERVACIONES:

BM-3c

MUESTRA REVISADA POR:

Alfredo Bobis

MUESTRA ENSAYADA POR:

F. Campiñaz



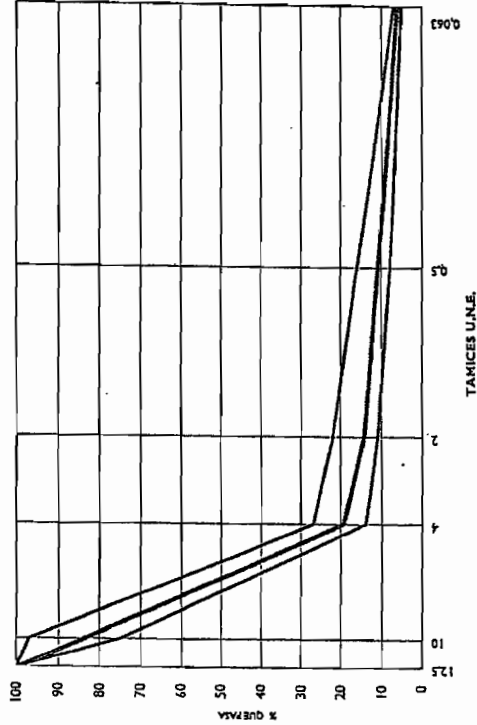
MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE  
CONTROL PLANTA

FECHA DE TOMA: 19/10/07 N° REGISTRO: FRM-2727

ENSAYO DE EXTRACCIÓN

PETICIONARIO:	D.P.T. I.O.P.	5,29
OBRA:	B-140 Sabadell	5,02
LOCALIZACIÓN:	P.k. 02+500	1,2
SUMINISTRADOR:	FIRTEC	
PLANTA:	Barberà del Valles	
ÁRIDO GRUESO:	GRANÍTICO	2,17
ÁRIDO FINO:	CALIZO	5,2
T. DE TOMA (C°):	172	10,1
MATRICULA:	4740-BKL	10,9

MEZCLA BITUMINOSA M-10 (Según OC/5/2001)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4	2	0,5	0,063
% QUE PASA	99	84	19	14	11	6,1

OBSERVACIONES:

BM-3c

MUESTRA REVISADA POR:

Alfredo Bobis

MUESTRA ENSAYADA POR:

F. Campiñaz

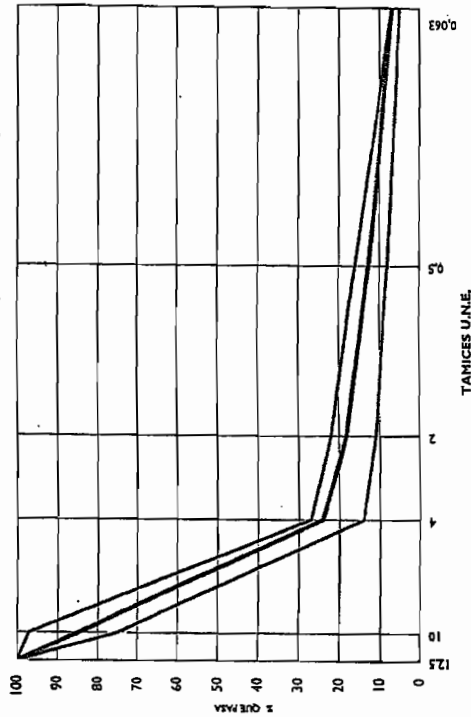


FECHA DE TOMA **24/10/07** N° REGISTRO: **FRM-2728**

ENSAYO DE EXTRACCIÓN

PETICIONARIO :	D.P.T. I.O.P.	5,25
OBRA :	B-140 Sabadell	4,99
LOCALIZACIÓN :	P.K. 04+100	1,3
SUMINISTRADOR :	FIRTEC	
PLANTA :	Barberà del Valles	
ÁRIDO GRUESO :	GRANÍTICO	2,18
ÁRIDO FINO :	CALIZO	6,0
T. DE TOMA (C°)	167	10,2
MATRICULA :	3160-BLT	12,5

MEZCLA BITUMINOSA M-10 (Según OC/5/2001)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4	2	0,5	0,063
% QUE PASA	100	85	24	18	13	7,0

OBSERVACIONES: La muestra contiene residuos de caucho.

MUESTRA REVISADA POR: **Alfredo Bobis** MUESTRA ENSAYADA POR: **F. Campiñez**

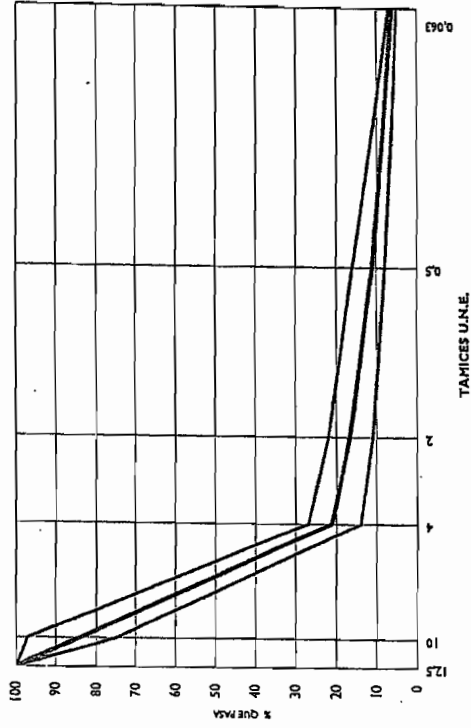


FECHA DE TOMA **24/10/07** N° REGISTRO: **FRM-2722**

ENSAYO DE EXTRACCIÓN

PETICIONARIO :	D.P.T. i O.P.	5,29
OBRA :	B-140 Sabadell	5,02
LOCALIZACIÓN :	P.K. 04+150	1,2
SUMINISTRADOR :	FIRTEC	
PLANTA :	Barberà del Valles	
ÁRIDO GRUESO :	GRANÍTICO	2,17
ÁRIDO FINO :	CALIZO	7,9
T. DE TOMA (C°)	170	10,6
MATRICULA :	4740-BKL	13,2

MEZCLA BITUMINOSA M-10 (Según OC/5/2001)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4	2	0,5	0,063
% QUE PASA	100	84	21	17	11	6,3

OBSERVACIONES: La muestra contiene residuos de caucho.

MUESTRA REVISADA POR: **Alfredo Bobis** MUESTRA ENSAYADA POR: **F. Campiñez**



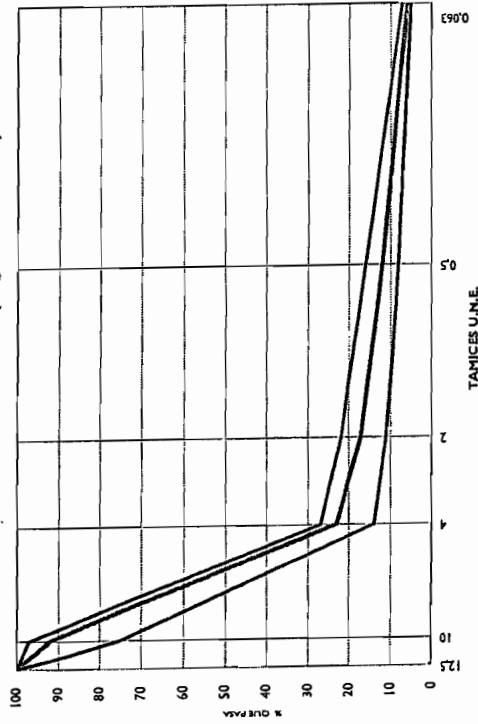


MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE  
CONTROL PLANTA

FECHA DE TOMA 18/01/08 N° REGISTRO: FRM-2752

PETICIONARIO:	D.P.T. i.O.P.	BETÓN SOBRE ÁRIDO (%):	5,39
OBRA:	B-140 Sabadell	BETÓN SOBRE MEZCLA (%):	5,12
LOCALIZACIÓN:	Cal. Dir. Sabadell P.K. 4+590 (1% p.neumático)	RELACIÓN FILLER-BETÓN:	1,1
SUMINISTRADOR:	FIRTEC		
PLANTA:	Barberà del Valles	ENSAYO CÁNTABRO:	
ÁRIDO GRUESO:	GRANÍTICO	DENSIDAD (g/cm³):	2,13
ÁRIDO FINO:	CALIZO	DESGASTE VIA SECA (%):	7,2
T. DE TOMA (°C):	175	DESGASTE VIA HÚMEDA (%):	13,3
MATRICULA:	3380-BMX		

MEZCLA BITUMINOSA M-10 (Según/OC/5/2001)



TAMICES U.N.E.	12,5	10	4	2	0,5	0,063
% QUE PASA	100	92	23	17	12	5,8

OBSERVACIONES: La muestra contiene residuos de caucho.

MUESTRA REVISADA POR: Alfredo Bobis MUESTRA ENSAYADA POR: F. Campiñez

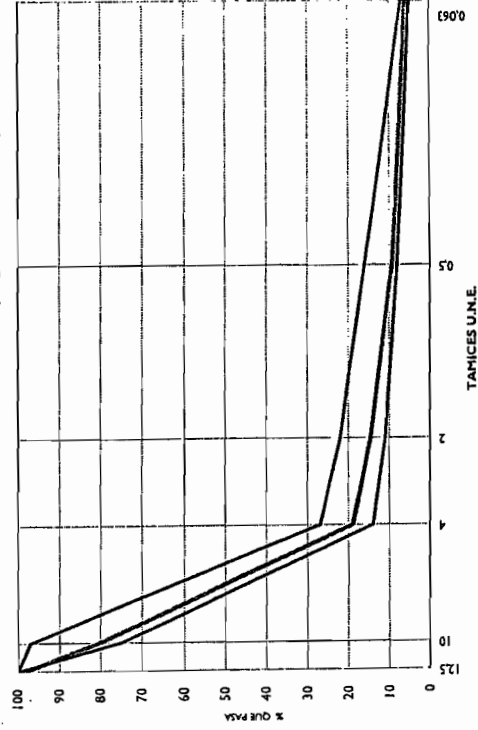


MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE  
CONTROL PLANTA

FECHA DE TOMA 18/01/08 N° REGISTRO: FRM-2751

PETICIONARIO:	D.P.T. i.O.P.	BETÓN SOBRE ÁRIDO (%):	5,67
OBRA:	B-140 Sabadell	BETÓN SOBRE MEZCLA (%):	5,36
LOCALIZACIÓN:	Cal. Dir. Sabadell P.K. 4+340 (2% p.neumático)	RELACIÓN FILLER-BETÓN:	1,1
SUMINISTRADOR:	FIRTEC		
PLANTA:	Barberà del Valles	ENSAYO CÁNTABRO:	
ÁRIDO GRUESO:	GRANÍTICO	DENSIDAD (g/cm³):	2,10
ÁRIDO FINO:	CALIZO	DESGASTE VIA SECA (%):	6,0
T. DE TOMA (°C):	174	DESGASTE VIA HÚMEDA (%):	15,8
MATRICULA:	3380-BMX		

MEZCLA BITUMINOSA M-10 (Según/OC/5/2001)



TAMICES U.N.E.	12,5	10	4	2	0,5	0,063
% QUE PASA	98	80	19	14	9	6,0

OBSERVACIONES: La muestra contiene residuos de caucho.

MUESTRA REVISADA POR: Alfredo Bobis MUESTRA ENSAYADA POR: F. Campiñez



SECCION DE AGLOMERADO

LABORATORIO ACREDITADO POR EL D.O.P.T. DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA EN EL AMBITO DE SUELOS, ARIDOS, MEZCLAS BITUMINOSAS Y SUS MATERIALES CONSTITUYENTES PARA TODO TIPO DE VALES. REF: 000151936 RESOLUCION DEL 27/11/98 D. O. G. C. N.º 2367

C/ MONTICLAR NAVE 25 POLIGONO POLICUR 06930 CERDANYOLA TEL. 935 94 46 60 FAX 935 90 5765 e-mail: cerdanyola@eptisa.es

OTI EP071095-457

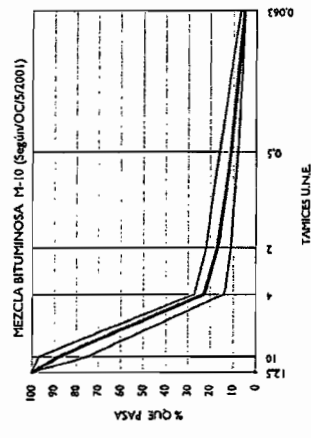
REGISTRO IBAM9461

FECHA DE TOMA 24/10/07

TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

PETICIONARIO FIRTEC TECNICAS DE FIRME, S.A. DOMICILIO C/ PERE I PONS, 9-11 8ª PLANTA OBRA Reforçament B-140 Pk 0+000 al 5+360 Ctra: RD-05148 Sabadell-Sta. Perpetua. LOCALIZACION B-140 calzada direcció Sts. Perpetua pk.4+088. SUMINISTRADOR Firtec, S.A.

Table with 3 columns: PARAMETROS, VALORES OBTENIDOS. Rows include: ENSAYO DE EXTRACCION (5,21), BETUN SOBRE MEZCLA (%), RELACION FILLER-BETUN (1,0), ENSAYO CANTABRO (163), T. DE COMPACTACION (°C) (2,18), DENSIDAD (g/cm³) (5,1), HUECOS EN MEZCLA (%), DESGASTE VIA SECA (%), DESGASTE VIA HUMEDA (%), INDICE AUMENTO PERDIDAS (%).





**Eptisa**  
EPTISA S.L.

LABORATORIO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN GENERAL D'ARQUITECTURA I  
PASADATE EN EL AMBITO VEG. NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN 0600V6505(B+C).  
RESOLUCIÓN DE 23 DE MAYO DE 2006.

C/ MONTICLAR NAVE 25 POLÍGONO POLIGUAR OBISPO CERDANYOLA  
TEL. 935 94 46 50 FAX 935 90 5785 e-mail: cerdanyola@eptisa.es

**SECCIÓN DE AGLOMERADO**

LABORATORIO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN GENERAL D'ARQUITECTURA I  
PASADATE EN EL AMBITO VEG. NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN 0600V6505(B+C).  
RESOLUCIÓN DE 23 DE MAYO DE 2006.

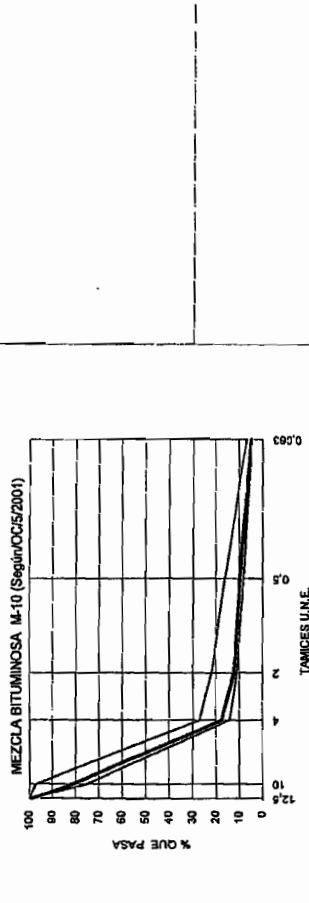
C/ MONTICLAR NAVE 25 POLÍGONO POLIGUAR OBISPO CERDANYOLA  
TEL. 935 94 46 50 FAX 935 90 5785 e-mail: cerdanyola@eptisa.es

OT/ EP071054-225 REGISTRO IBAM9591 FECHA DE TOMA 18/01/08

**TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE**

PETICIONARIO FIRTEC TÉCNICAS DE FIRME, S.A.  
DOMICILIO C/ PERE I PONS, 9-11 0º PLANTA  
OBRA Reforçament B-140 PK 0+000 al 5+300 Clau: RD-05146 Sabadell-Sta. Perpallua.  
LOCALIZACION B-140 calçada direcció Sta. Perpallua pk.4+100.

PARAMETROS	VALORES OBTENIDOS
<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>	
BETÓN SOBRE ARIDO (%)	5,83 ± 5
BETÓN SOBRE MEZCLA (%)	5,51
RELACION FILLER-BETÓN	0,9
<b>ENSAYO CANTABRO</b>	
T. DE COMPACTACION (C°)	165
DENSIDAD (g/cm³)	2,07
HUECOS EN MEZCLA (%)	6,9
DESGASTE VIA SECA (%)	14,2
DESGASTE VIA HUMEDA (%)	
INDICE AUMENTO PERDIDAS (%)	



**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO DE LOS ARIDOS EXTRAIDOS**

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4,0	2	0,500	0,063
% QUE PASA	99	81	17	12	10	6,2

NORMAS  
N.T.-40920 Toma de muestras de mezclas bituminosas para preparación.  
N.T.-40930 Análisis granulométrico de los áridos recuperados de mezclas bituminosas.  
N.T.-40940 Control de ligante en mezclas bituminosas.  
N.T.-30382 Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo Casanero de péndulo por degaseo.

OBSERVACIONES: M-10 con betón caucho + 2% de polvo neumático.  
MUESTRA TOMADA POR: J. Salinas  
MUESTRA ENSAYADA POR: Juan P. Luna

Vº Bº

JUAN A. SUÁREZ GÁLVEZ  
DIRECTOR DE LABORATORIO

JOSEP Mª TORRELLA MARTÍNEZ  
JEFE DE ÁREA



**Eptisa**  
EPTISA S.L.

LABORATORIO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN GENERAL D'ARQUITECTURA I  
PASADATE EN EL AMBITO VEG. NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN 0600V6505(B+C).  
RESOLUCIÓN DE 23 DE MAYO DE 2006.

C/ MONTICLAR NAVE 25 POLÍGONO POLIGUAR OBISPO CERDANYOLA  
TEL. 935 94 46 50 FAX 935 90 5785 e-mail: cerdanyola@eptisa.es

**SECCIÓN DE AGLOMERADO**

LABORATORIO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN GENERAL D'ARQUITECTURA I  
PASADATE EN EL AMBITO VEG. NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN 0600V6505(B+C).  
RESOLUCIÓN DE 23 DE MAYO DE 2006.

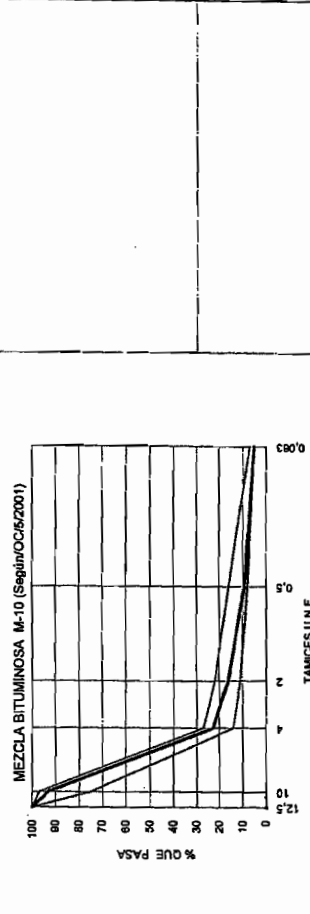
C/ MONTICLAR NAVE 25 POLÍGONO POLIGUAR OBISPO CERDANYOLA  
TEL. 935 94 46 50 FAX 935 90 5785 e-mail: cerdanyola@eptisa.es

OT/ EP071054-225 REGISTRO IBAM9592 FECHA DE TOMA 18/01/08

**TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE**

PETICIONARIO FIRTEC TÉCNICAS DE FIRME, S.A.  
DOMICILIO C/ PERE I PONS, 9-11 0º PLANTA  
OBRA Reforçament B-140 PK 0+000 al 5+300 Clau: RD-05146 Sabadell-Sta. Perpallua.  
LOCALIZACION B-140 calçada direcció Sta. Perpallua pk.4+300.

PARAMETROS	VALORES OBTENIDOS
<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>	
BETÓN SOBRE ARIDO (%)	5,59 ± 5
BETÓN SOBRE MEZCLA (%)	5,29
RELACION FILLER-BETÓN	0,9
<b>ENSAYO CANTABRO</b>	
T. DE COMPACTACION (C°)	165
DENSIDAD (g/cm³)	2,16
HUECOS EN MEZCLA (%)	4,7
DESGASTE VIA SECA (%)	9,5
DESGASTE VIA HUMEDA (%)	
INDICE AUMENTO PERDIDAS (%)	



**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO DE LOS ARIDOS EXTRAIDOS**

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4,0	2	0,500	0,063
% QUE PASA	100	93	23	16	9	5,0

NORMAS  
N.T.-40920 Toma de muestras de mezclas bituminosas para preparación.  
N.T.-40930 Análisis granulométrico de los áridos recuperados de mezclas bituminosas.  
N.T.-40940 Control de ligante en mezclas bituminosas.  
N.T.-30382 Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo Casanero de péndulo por degaseo.

OBSERVACIONES: M-10 con betón caucho + 1% de polvo neumático.  
MUESTRA TOMADA POR: J. Salinas  
MUESTRA ENSAYADA POR: Juan P. Luna

Vº Bº

JUAN A. SUÁREZ GÁLVEZ  
DIRECTOR DE LABORATORIO

JOSEP Mª TORRELLA MARTÍNEZ  
JEFE DE ÁREA



C/ MONTICLAR NAVE 25 POLIGONO POLZUR 0030 CERDANYOLA  
TEL. 932 94 49 80 FAX 932 93 9795 e-mail: cerdanypol@eptisa.es

**SECCIÓN DE AGLOMERADO**

LABORATORIO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN GENERAL PARQUILITECTURA I  
PARÍS EN EL ÁMBITO VRS. NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN 0809VRS0200(4-C)  
RESOLUCIÓN DE 23 DE MAYO DE 2005.

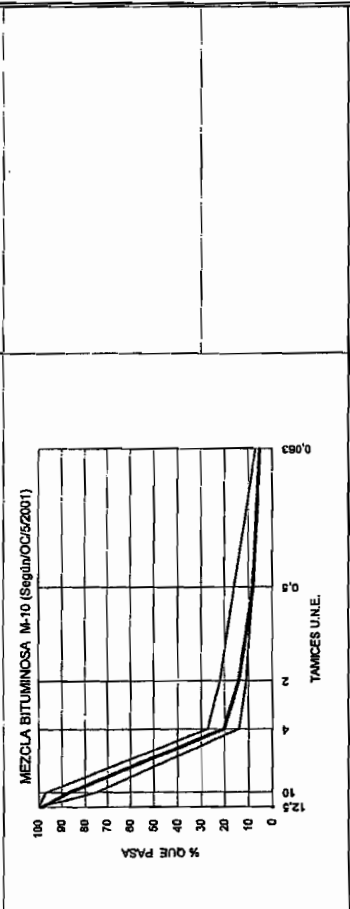
OTI EP071054-225

REGISTRO IBAM9593

FECHA DE TOMA 18/01/08

**TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE**

PETICIONARIO	FIRTEC TÉCNICAS DE FIRME, S.A.	
DOMICILIO	C/ PERE / PONS, 8-11 6ª PLANTA	
OBRA	Reforçament B-140 Pk 0+000 al 5+360 Clau: RD-05148 Sabadell-Sta.Perpetua.	
LOCALIZACIÓN	B-140 calzada dirección Sta. Perpetua pk.3+220	
SUMINISTRADOR	FIRTEC TÉCNICAS DE FIRME, S.A.	
PLANTA	Barbers	
USO QUE SE DESTINA	CAPA DE RODADURA	
ÁRIDO GRUESO	Porfido/Granítico	
ÁRIDO FINO	Calizo/Granítico	
CATEGORÍA DE TRÁFICO	NO SE CONOCE	
SALIDA DE PLANTA	3,11	
LLEGADA AL TAJO	-	
COMIENZO EXTENDIDO	3,45	
TOMA DE LA MUESTRA	3,50	
TEMPERATURA MUESTRA (°C)	176	
ALBARÁN Nº	-	
MATRÍCULA CAMIÓN	B-2036-SK	



MEZCLA BITUMINOSA M-10 (Según IOC/05/2001)

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4,0	2	0,500	0,063
% QUE PASA	99	87	20	14	8	5,2

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS**

NORMAS  
 NLT-34900 Toma de muestras de mezclas bituminosas para pavimentación  
 NLT-18000 Análisis granulométrico de los áridos recuperados de mezclas bituminosas  
 NLT-18400 Contenido de ligante en mezclas bituminosas  
 NLT-35002 Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo Círculo de patillas por desgate

OBSERVACIONES: M-10 con betún cauchoso + 2% de polvo neumático.

MUESTRA TOMADA POR: J. Salinas  
 MUESTRA ENSAYADA POR: Juan P. Luna

Yº Bº

JUAN A. SUÁREZ GÁLVEZ  
DIRECTOR DE LABORATORIO

JOSEP Mª TORRUELLA MARTÍNEZ  
JEFE DE ÁREA



C/ MONTICLAR NAVE 25 POLIGONO POLZUR 0030 CERDANYOLA  
TEL. 932 94 49 80 FAX 932 93 9795 e-mail: cerdanypol@eptisa.es

**SECCIÓN DE AGLOMERADO**

LABORATORIO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN GENERAL PARQUILITECTURA I  
PARÍS EN EL ÁMBITO VRS. NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN 0809VRS0200(4-C)  
RESOLUCIÓN DE 23 DE MAYO DE 2005.

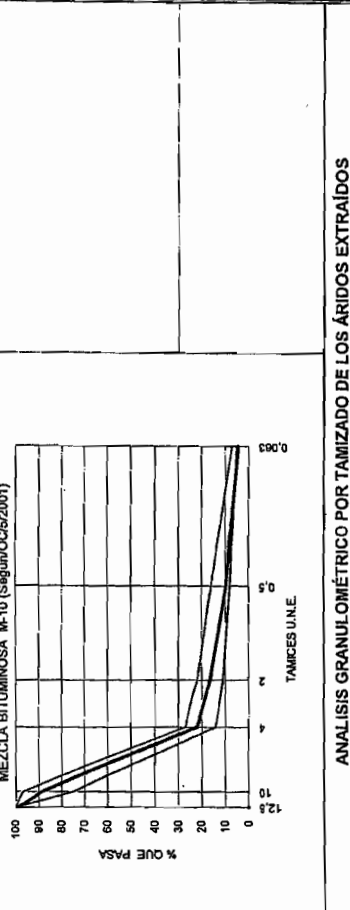
OTI EP071054-225

REGISTRO IBAM9594

FECHA DE TOMA 18/01/08

**TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE**

PETICIONARIO	FIRTEC TÉCNICAS DE FIRME, S.A.	
DOMICILIO	C/ PERE / PONS, 8-11 6ª PLANTA	
OBRA	Reforçament B-140 Pk 0+000 al 5+360 Clau: RD-05148 Sabadell-Sta.Perpetua.	
LOCALIZACIÓN	B-140 calzadas dirección Sta. Perpetua pk.3+500	
SUMINISTRADOR	FIRTEC TÉCNICAS DE FIRME, S.A.	
PLANTA	Barbers	
USO QUE SE DESTINA	CAPA DE RODADURA	
ÁRIDO GRUESO	Porfido/Granítico	
ÁRIDO FINO	Calizo/Granítico	
CATEGORÍA DE TRÁFICO	NO SE CONOCE	
SALIDA DE PLANTA	4,02	
LLEGADA AL TAJO	-	
COMIENZO EXTENDIDO	4,40	
TOMA DE LA MUESTRA	4,45	
TEMPERATURA MUESTRA (°C)	174	
ALBARÁN Nº	-	
MATRÍCULA CAMIÓN	B-0878-VT	



MEZCLA BITUMINOSA M-10 (Según IOC/05/2001)

TAMICES U.N.E.	12,5	10	4,0	2	0,500	0,063
% QUE PASA	89	89	22	16	10	4,3

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO DE LOS ÁRIDOS EXTRAÍDOS**

NORMAS  
 NLT-34900 Toma de muestras de mezclas bituminosas para pavimentación  
 NLT-18000 Análisis granulométrico de los áridos recuperados de mezclas bituminosas  
 NLT-18400 Contenido de ligante en mezclas bituminosas  
 NLT-35002 Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo Círculo de patillas por desgate

OBSERVACIONES: M-10 con betún cauchoso + 1% de polvo neumático.

MUESTRA TOMADA POR: J. Salinas  
 MUESTRA ENSAYADA POR: Juan P. Luna

Yº Bº

JUAN A. SUÁREZ GÁLVEZ  
DIRECTOR DE LABORATORIO

JOSEP Mª TORRUELLA MARTÍNEZ  
JEFE DE ÁREA



C/ MIGUEL ROMÁN 18 POLÍGONO POLIZOZ (BAJO CERREUVILLA)  
TEL. 93 54 48 80 FAX. 93 54 31 95 e-mail: cerreuvilla@eptisa.es

SECCIÓN DE AGLOMERADO

LABORATORIO ACREDITADO POR EL D.O.P.T. DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA EN EL ÁMBITO DE SUELOS ÁRIDOS, MEZCLAS BITUMINOSAS Y SUS MATERIALES CONSTITUYENTES PARA TODO TIPO DE VALLES REF. 00510966 RESOLUCIÓN DEL 27/11/98 D O G C N° 2287

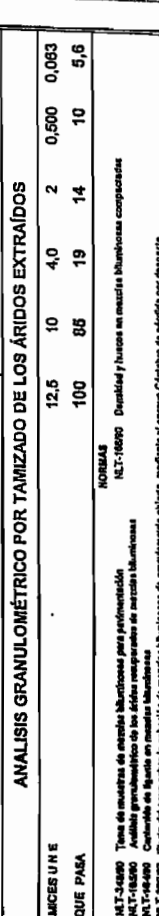
REGISTRO IBAM9465 FECHA DE TOMA 23/10/07

OT/1 EPO71055 -457

TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

PETICIONARIO	FIRTEC TÉCNICAS DE FIRME, S.A.		
DOMICILIO	C/ PERE I PONS, 8-11 8ª PLANTA		
OBRA	B-140 Santa Perpètua - Sabadell		
LOCALIZACIÓN	B-140, calzada dirección Sabadell, pk. 4+088		
SUBMINISTRADOR	Fitec, S.A.		
PLANTA	Barbara		
USO QUE SE DESTINA	CAPA DE RODADURA		
ÁRIDO ORGÁNICO	Granítico		
ÁRIDO PÍNO	Calizo		
CATEGORÍA DE TRÁFICO	NO SE CONOCE		
SALIDA DE PLANTA	-		
LLEGADA AL TAJO	1,30		
COMIENZO EXTENDIDO	1,40		
TOMA DE LA MUESTRA	-		
TEMPERATURA MUESTRA (°C)	17986		
ALBARRÁN Nº	-		
MATRÍCULA CAMIÓN	-		

PARÁMETROS	VALORES OBTENIDOS	PG-32801
<b>ENSAYO DE EXTRACCIÓN</b>		
BETÓN SOBRE ARIDO (%)	5,28	2,5
BETUN SOBRE MEZCLA (%)	5,01	-
RELACION FILLER-BETUN	1,1	1,3
<b>ENSAYO CÁNTABRO</b>		
T DE COMPACTACION (°C)	163	-
DENSIDAD (g/cm³)	2,12	-
HUECOS EN MEZCLA (%)	4,2	-
DESGASTE VIA SECA (%)	13,1	-
DESGASTE VIA HUMEDA (%)	-	-
INDICE AUMENTO PÉRDIDAS (%)	-	-



TAMICES UN E	12,5	10	4,0	2	0,500	0,063
% QUE PASA	100	88	19	14	10	5,6

NORMAS  
 N.T.-34890 Tema de muestras de mezclas bituminosas para pavimentación  
 N.T.-16590 Análisis granulométrico de los áridos componentes de mezclas bituminosas  
 N.T.-16499 Control de los huecos en mezclas bituminosas  
 N.T.-16498 Método de ensayo sobre la cantidad de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo Cantabro de pérdida por desgaste

OBSERVACIONES: Tramo BM-3c. MUESTRA TOMADA POR: J. Ibáñez MUESTRA ENSAYADA POR: J. Pedro Luna

V B

JUAN A SUÁREZ GÁLVEZ DIRECTOR DE LABORATORIO MIQUEL ROMÁN I PONS JEFE DE ÁREA



HOJA DE CONTROL DE FABRICACIÓN Y EXTENDIDO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

Departamento de calidad

Obra: D.P.T. y O.P. - B-140

Planta Barberà del Vallès  
viernes, 18 de enero de 2008

MEZCLA	MATRÍCULA	HORA FABRICACIÓN	T°	HORA SALIDA PLANTA	T°	HORA EXTENDIDO	T°	HORA COMPACTACIÓN	T°	OBSERVACIONES
N10 G2 B7 +1% P2.4EU. N10 G2 B7 +2 Pol. NEU.	7912DXN	05'45	175°	06'15	174°	06'45	166°			
	3308B7X	06'22	177°	06'52	176°	07'10	168°			
	0837DCC	06'31	175°	06'59	174°	07'20	172°			



HOJA DE CONTROL DE FABRICACIÓN Y EXTENDIDO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

Departamento de calidad

Obra: D.P.T. y O.P. - B-140

Planta Barberà del Vallès  
viernes, 18 de enero de 2008

MEZCLA	MATRÍCULA	HORA FABRICACIÓN	T°	HORA SALIDA PLANTA	T°	HORA EXTENDIDO	T°	HORA COMPACTACIÓN	T°	OBSERVACIONES
N10 G2 B7 +2% Pol. NEU.	7912DXN	21'56	175°	22'25	174°	23	165°			
	3308B7X	22'28	174°	22'58	173°	23'10	161°			
"	8227DNT	22'41	176°	23'09	175°	23'35	164°			
"	B9283WB	22'54	175°	23'24	174°	23'40	165°			
N10 G2 B7 +1 Pol. NEU.	B2026SK	23'06	176°	23'36	175°	23'55	165°			
"	B4984US	23'17	176°	23'47	175°	00'05	170°			
"	B0878VT	23'39	176°	00'09	175°	00'25	170°			
"	0837DCC	23'48	177°	00'18	177°	00'35	169°			
"	3160BLT	23'55	174°	00'25	173°	00'46	160°			
"	7912DXN	00'02	176°	00'32	175°	01'05	158°			
"	3160BLT	01'06	172°	01'36	171°	02'10	160°			
"	3308B7X	01'17	175°	01'47	174°	02'25	150°			
N10 G2 B7 +2 Pol. NEU.	8227DNT	01'26	175°	01'56	174°	02'37	158°			
"	B9283WB	01'36	175°	02'06	174°	02'57	156°			
"	B2026SK	03'11	174°	03'41	173°	03'55	159°			
"	B4984US	03'41	173°	04'11	172°	04'42	158°			
"	0837DCC	03'52	177°	04'22	176°	04'55	163°			
N10 G2 B7 +1% Pol. NEU.	B0878VT	04'12	174°	04'42	173°	05'15	161°			
"	7912DXN	04'30	175°	05'00	174°	05'25	160°			
"	3308B7X	04'37	174°	05'07	173°	05'37	154°			
"	8227DNT	04'44	176°	05'15	175°	05'48	163°			
"	B9283WB	04'51	174°	05'21	173°	05'51	164°			
"	B2026SK	05'02	176°	05'32	175°	06'01	162°			
"	B4984US	05'10	177°	05'40	176°	06'15	161°			
"	B0878VT	05'24	176°	05'54	175°	06'25	160°			

ANEJO III.

MEDIDAS DE CRT Y TEXTURA

---



**MEDIDAS CRT****TRAMO IA****BM-3C**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	CRT(derecha)	PK metros	CRT(derecha)
2660	45	2660	58
2680	44	2680	58
2700	44	2700	57
2720	46	2720	57
2740	48	2740	58
2760	48	2760	57
2780	49	2780	54
2800	48	2800	52
2820	47	2820	56
2840	46	2840	58
2860	48	2860	55
2880	47	2880	53
2900	50	2900	54

**TRAMO IIA****BMPN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	CRT(derecha)	PK metros	CRT(derecha)
2920	53	2920	55
2940	53	2940	55
3000	54	2960	57
3020	52	2980	57
3040	51	3000	58
3060	51	3020	60
3080	51	3040	57
3100	53	3060	59
3120	53	3080	60
3140	52	3100	60
3160	53	3120	59
3180	57	3140	58
3200	54	3160	59

**TRAMO IIIA**  
**BM3c Sustituido**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	CRT(derecha)	PK metros	CRT(derecha)
3220	59	3180	57
3240	61	3200	61
3260	64	3220	61
3280	63	3240	59
3300	64	3260	61
3320	66	3280	61
3340	65	3300	58
3360	66	3320	57
3380	68	3340	57
3400	68	3360	58
3420	66	3380	57
3440	66	3400	54
3460	65	3420	50
3480	61	3440	48
3500	62	3460	46

**TRAMO IVA**  
**BMPN+1% PN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	CRT(derecha)	PK metros	CRT(derecha)
3520	61	3480	51
3540	60	3500	53
3560	61	3520	54
3580	61	3540	57
3600	62	3560	55
3620	62	3580	57
3640	65	3600	57
3660	63	3620	56
3680	62	3640	56
3700	59	3660	57
3720	59	3680	58
3740	58	3700	58
3760	57	3720	57
3780	60	3740	58
3800	58	3760	58

**TRAMO IB****BM-3C**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	CRT(derecha)	PK metros	CRT(derecha)
3880	67	3840	63
3900	67	3860	56
3920	67	3880	61
3940	61	3900	63
3960	57	3920	60
4000	60	3940	55
4020	59	3960	55
4040	55	3980	56
4060	53	4000	54
4080	59	4020	55

**TRAMO IIB****BMPN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	CRT(derecha)	PK metros	CRT(derecha)
4100	57	4040	54
4120	53	4060	51
4140	57	4080	49
4160	48	4100	56
4180	50	4120	58
4200	51	4140	61
4220	52	4160	58
4240	55	4180	56
4260	53	4200	53
4280	54	4220	50

**TRAMO IIIB****BMPN+2% PN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	CRT(derecha)	PK metros	CRT(derecha)
4300	57	4240	40
4320	60	4260	48
4340	60	4280	53
4360	58	4300	60
4380	52	4320	65
4400	50	4340	57
4420	56	4360	59
4440	64	4380	46
4460	67	4400	51
4480	66	4420	59

**TRAMO IVB****BMPN+1% PN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	CRT(derecha)	PK metros	CRT(derecha)
4500	59	4440	59
4520	51	4460	54
4540	51	4480	53
4560	48	4500	55
4580	46	4520	53
4600	51	4540	56
4620	56	4560	54
4640	57	4580	56
4660	60	4600	58
4680	55	4620	59

**MEDIDAS TEXTURA****TRAMO IA****BM-3C**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	Textura	PK metros	Textura
2660	1,01	2660	1,03
2670	1,03	2670	1,11
2680	1,05	2680	1,07
2690	1,11	2690	1,11
2700	1,06	2700	1,07
2710	1,1	2710	1,09
2720	1,05	2720	1,07
2730	1,02	2730	1,05
2740	1,08	2740	1,05
2750	1,09	2750	1,08
2760	1,15	2760	1,2
2770	1,09	2770	1,15
2780	1,01	2780	1,18
2790	1,05	2790	1,25
2800	0,93	2800	1,16
2810	0,94	2810	1,2
2820	0,97	2820	1,17
2830	1	2830	1,2
2840	1,03	2840	1,12
2850	1,06	2850	1,11
2860	0,98	2860	1,17
2870	0,93	2870	1,12
2880	0,97	2880	1,11
2890	1,08	2890	1,11

**TRAMO IIA****BMPN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	Textura	PK metros	Textura
2900	1,2	2900	1,11
2910	1,09	2910	1,13
2920	1,09	2920	1,12
2930	1,11	2930	1,13
3000	1,12	2940	1,15
3010	1,17	2950	1,19
3020	1,09	2960	1,2
3030	1,13	2970	1,21
3040	1,08	2980	1,24
3050	1,13	2990	1,32
3060	1,07	3000	1,24
3070	1,13	3010	1,28
3080	1,07	3020	1,28
3090	1,16	3030	1,2
3100	1,22	3040	1,19
3110	1,12	3050	1,24
3120	1,16	3060	1,21
3130	1,1	3070	1,21
3140	1,04	3080	1,26
3150	1,1	3090	1,25
3160	1,07	3100	1,04
3170	1,12	3110	1,1
3180	1,12	3120	1,17
3190	1,12	3130	1,14

**TRAMO IIIA**  
**BM3c Sustituido**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	Textura	PK metros	Textura
3200	0,96	3140	1,2
3210	1,15	3150	1,21
3220	1,26	3160	1,19
3230	1,25	3170	1,29
3240	1,29	3180	1,05
3250	1,33	3190	1,07
3260	1,42	3200	1,13
3270	1,34	3210	1,03
3280	1,4	3220	1,17
3290	1,39	3230	1,19
3300	1,43	3240	1,23
3310	1,55	3250	1,22
3320	1,42	3260	1,08
3330	1,41	3270	1,18
3340	1,41	3280	1,14
3350	1,48	3290	1,2
3360	1,62	3300	1,2
3370	1,5	3310	1,23
3380	1,45	3320	1,14
3390	1,52	3330	1,16
3400	1,46	3340	1,21
3410	1,23	3350	1,23
3420	1,39	3360	1,28
3430	1,44	3370	1,24
3440	1,47	3380	1,19
3450	1,4	3390	1,16
3460	1,47	3400	1,24
3470	1,36	3410	1,23
3480	0,93	3420	1,19
3490	0,99	3430	1,24

**TRAMO IVA**  
**BMPN+1% PN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	Textura	PK metros	Textura
3500	1,06	3440	1,23
3510	1,05	3450	1,34
3520	1	3460	1,21
3530	1,05	3470	1,2
3540	1,08	3480	1,12
3550	1,02	3490	1,03
3560	1,04	3500	1,06
3570	1,03	3510	1,04
3580	1,05	3520	1,12
3590	1,05	3530	1,03
3600	1,01	3540	0,97
3610	0,99	3550	1
3620	1,09	3560	1,05
3630	1,06	3570	1,09
3640	1,04	3580	1,03
3650	1,1	3590	1,05
3660	1,09	3600	1,02
3670	1,08	3610	1,07
3680	1,12	3620	1,12
3690	1,06	3630	1,11
3700	1,1	3640	1,03
3710	1,12	3650	0,98
3720	1,06	3660	0,97
3730	1,09	3670	0,88
3740	1,04	3680	0,85
3750	1,03	3690	0,87
3760	1,04	3700	0,9
3770	1,13	3710	0,94
3780	1,02	3720	0,98
3790	0,97	3730	0,92
3800	0,99	3740	0,94

**TRAMO IB****BM-3C**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	Textura	PK metros	Textura
3880	0,95	3820	0,87
3890	0,91	3830	1,23
3900	0,86	3840	1,06
3910	0,86	3850	0,76
3920	0,85	3860	0,65
3930	0,84	3870	0,68
3940	0,9	3880	0,7
3950	0,86	3890	0,85
3960	0,79	3900	1,11
4000	0,87	3910	1,13
4010	0,95	3920	1,11
4020	0,92	3930	1,17
4030	0,89	3940	1,29
4040	0,89	3950	1,23
4050	0,89	3960	1,23
4060	0,94	3970	1,22
4070	0,89	3980	1,23
4080	0,93	3990	1,24
4090	1	4000	1,29
4010	1,05	4010	1,23
4020	1,09	4020	1,24
4030	1,24	4030	1,25
4040	1,09	4040	1,23
4050	1,02	4050	1,27
4060	1	4060	1,32
4070	1,01	4070	1,25
4080	0,93	4080	1,26
4090	0,98	4090	1,22

**TRAMO IIB****BMPN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	Textura	PK metros	Textura
4100	1,01	4100	1,07
4110	1,09	4110	1,08
4120	1,09	4120	1,04
4130	1,05	4130	1,07
4140	1	4140	1,05
4150	1,07	4150	1
4160	1,14	4160	1,05
4170	0,95	4170	1,08
4180	1,02	4180	1,04
4190	1,1	4190	1,02
4200	1,13	4200	0,89
4210	1,13	4210	0,83
4220	1,09	4220	0,8
4230	0,88	4230	0,96
4240	0,87	4240	1,05
4250	0,87	4250	1,01
4260	0,86	4260	1,04
4270	0,96	4270	1,04
4280	0,87	4280	1,09
4290	0,89	4290	1,09

**TRAMO IIIB**  
**BMPN+1% PN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	Textura	PK metros	Textura
4300	0,92	4300	1,01
4310	0,85	4310	0,88
4320	0,87	4320	1,01
4330	0,88	4330	0,97
4340	0,92	4340	0,89
4350	0,84	4350	0,98
4360	0,88	4360	0,89
4370	0,93	4370	0,84
4380	0,8	4380	0,9
4390	0,94	4390	0,86
4400	0,77	4400	0,88
4410	0,7	4410	0,81
4420	0,74	4420	0,82
4430	0,78	4430	0,88
4440	0,77	4440	0,88
4450	0,88	4450	0,85
4460	0,88	4460	0,89
4470	0,85	4470	1,06
4480	0,95	4480	1,08

**TRAMO IVB**  
**BMPN+1% PN**

DIRECCIÓN STA. PERPETUA		DIRECCIÓN SABADELL	
PK metros	Textura	PK metros	Textura
4490	0,92	4490	1,13
4500	1,03	4500	1,05
4510	1,11	4510	0,89
4520	0,98	4520	0,9
4530	0,9	4530	1,03
4540	0,81	4540	1,1
4550	0,84	4550	0,97
4560	0,87	4560	0,97
4570	0,9	4570	0,99
4580	0,87	4580	1,06
4590	0,91	4590	1
4600	0,77	4600	0,86
4610	0,76	4610	0,92
4620	0,84	4620	0,95
4630	0,76	4630	1,07
4640	0,78	4640	1,01
4650	0,88	4650	0,89
4660	0,91	4660	0,79
4670	0,92	4670	0,89
4680	0,75	4680	0,93

ANEJO IV.

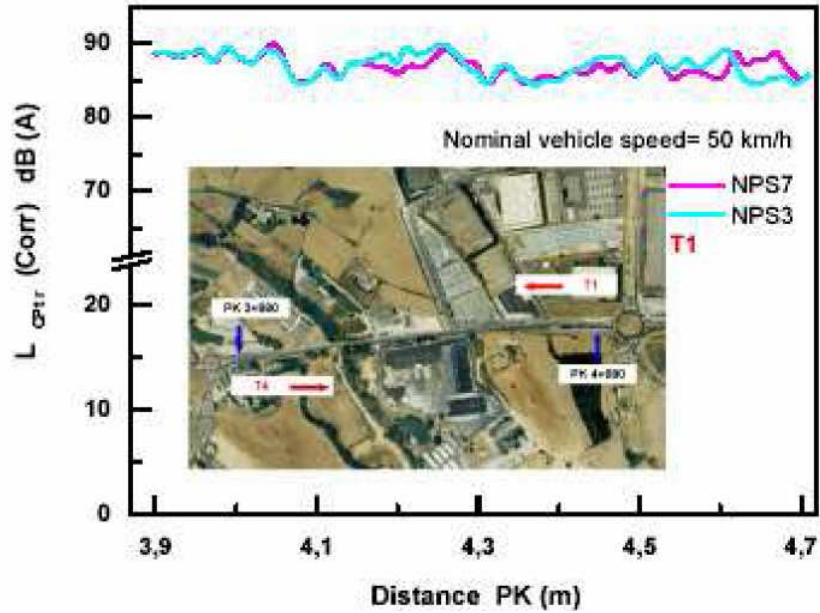
RUIDO DE RODADURA

---

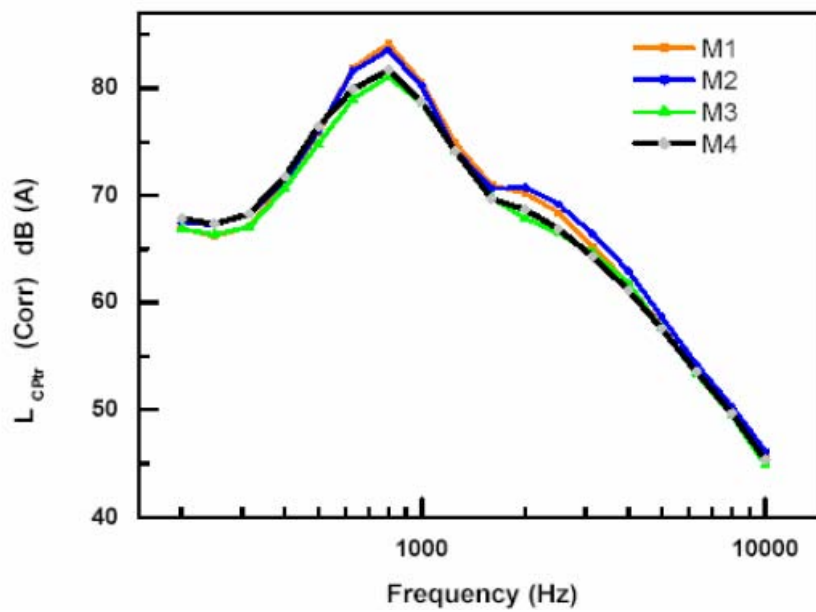


## NEUMÁTICO PIRELLI

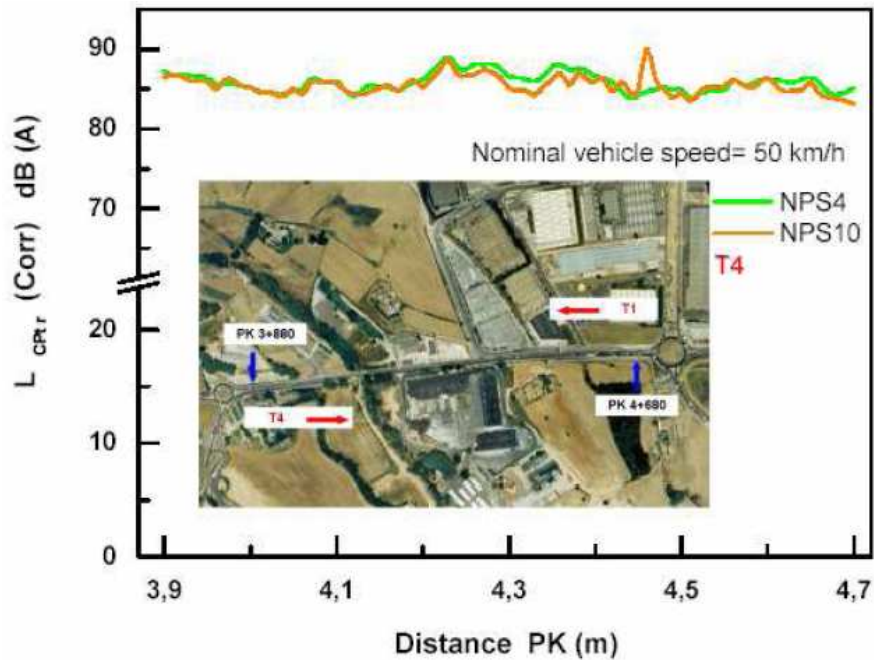
### A.1) EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL TRAMO T1



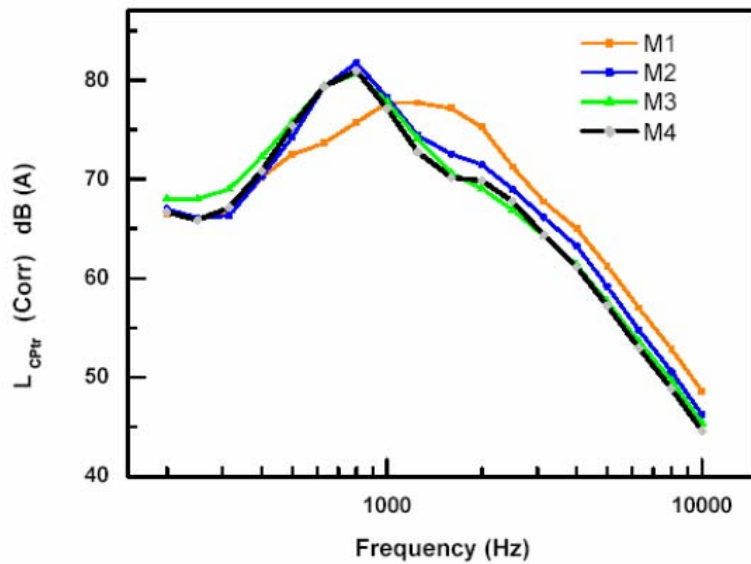
### A.2) ANÁLISIS ESPECTRAL EN EL TRAMO T1



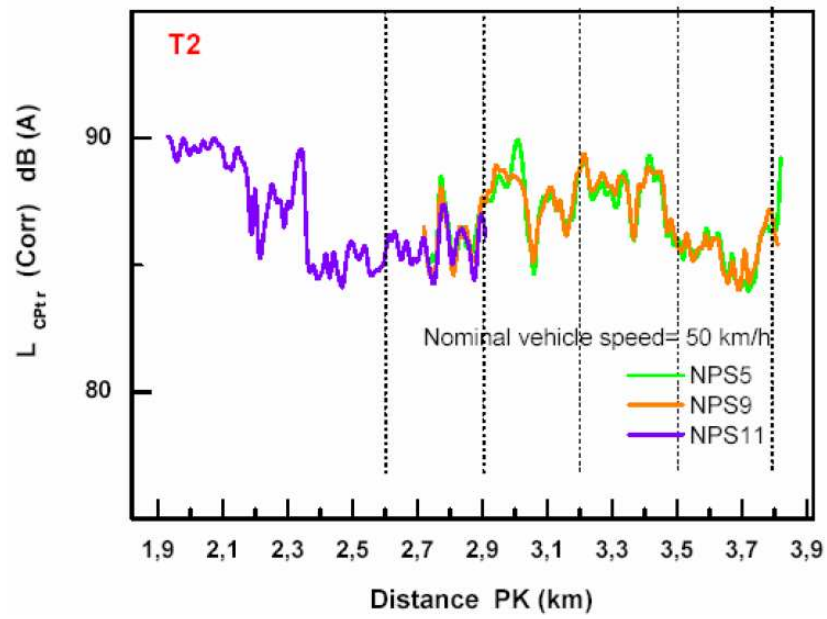
**B.1) EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL TRAMO T4**



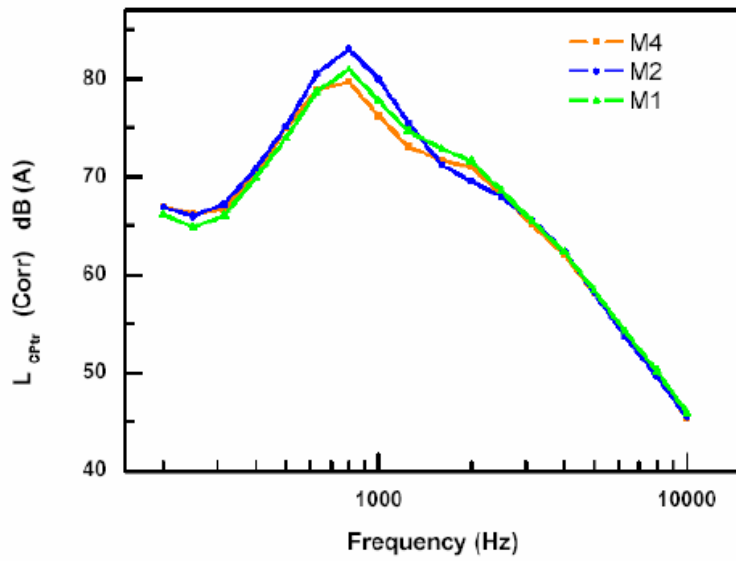
**B.2) ANÁLISIS ESPECTRAL EN EL TRAMO T4**



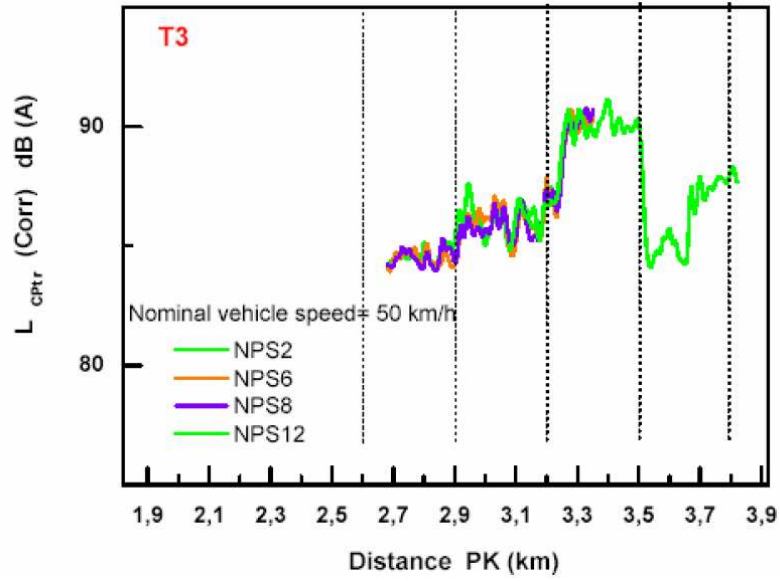
**C.1) EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL TRAMO T2**



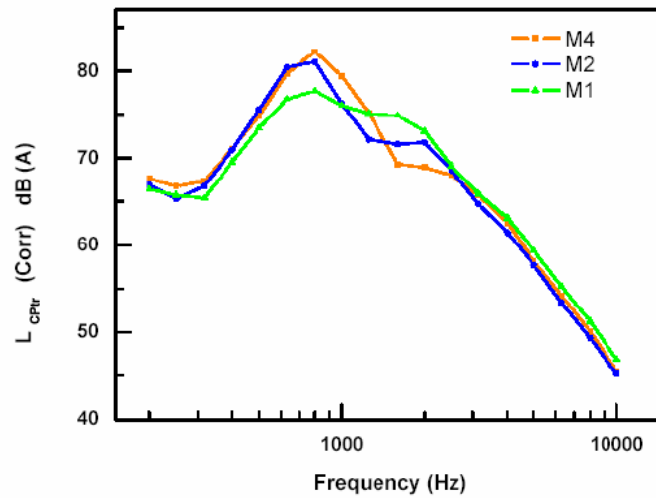
**C.2) ANÁLISIS ESPECTRAL EN EL TRAMO T2**



**D.1) EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL TRAMO T3**



**D.2) ANÁLISIS ESPECTRAL EN EL TRAMO T3**

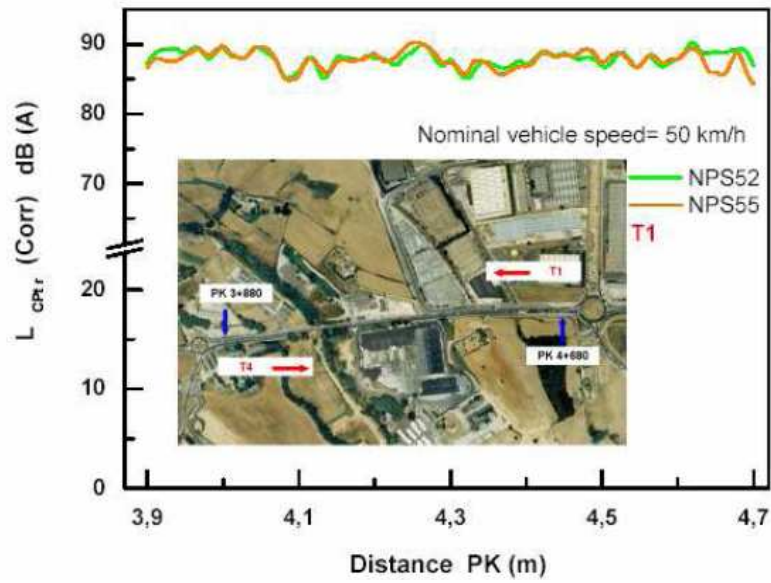


## NEUMÁTICO AVON CR 322 Y NEUMÁTICO AVON ZV1

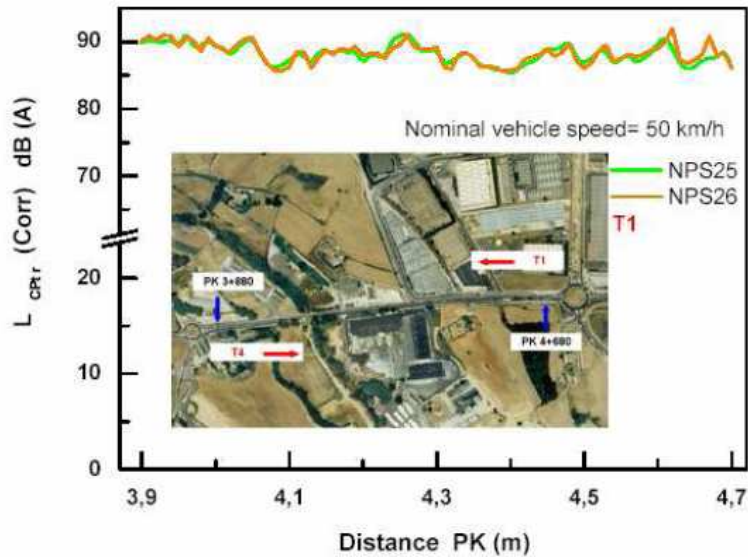
### A.1) EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS CON OTROS NEUMÁTICOS AVON ENVIRO CR 322 Y AVON ZV1 EN EL TRAMO T1

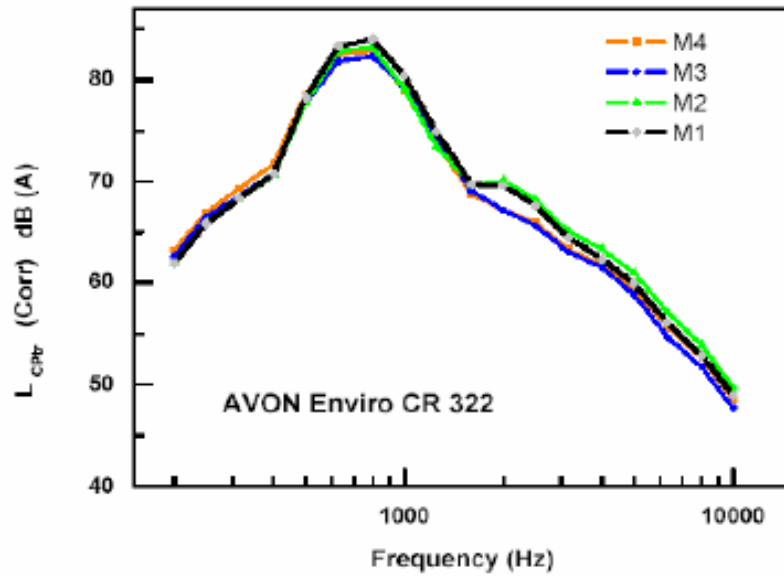
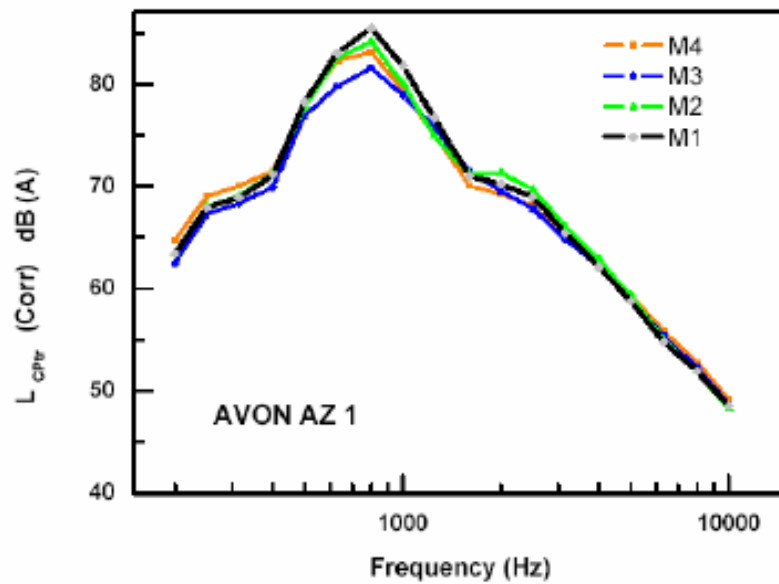
#### NEUMÁTICO AVON ENVIRO CR 322

*Evolución de los niveles sonoros en el Tramo T1*



#### NEUMÁTICO AVON ZV1

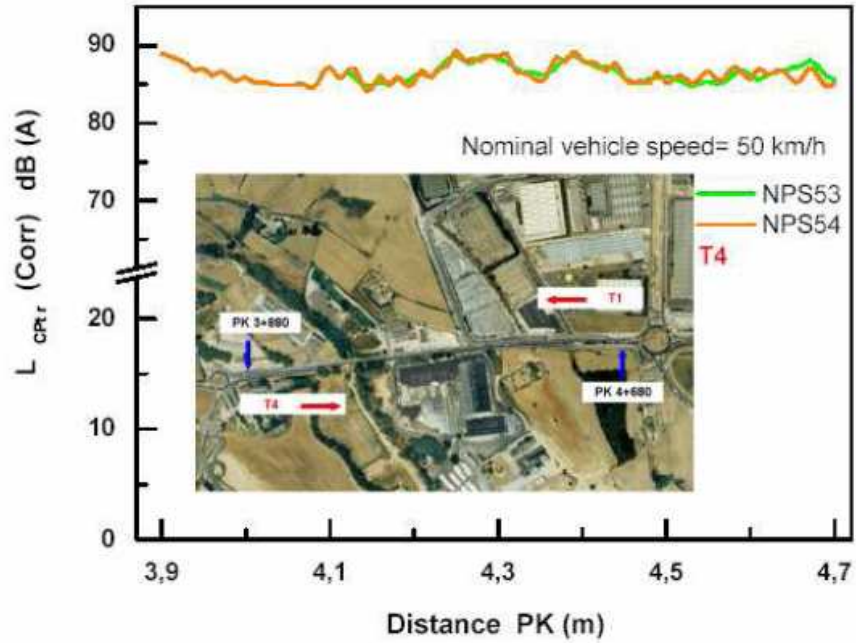


**A.2) ANÁLISIS ESPECTRAL EN EL TRAMO T1****NEUMÁTICO AVON ENVIRO CR 322****NEUMÁTICO AVON ZV1**

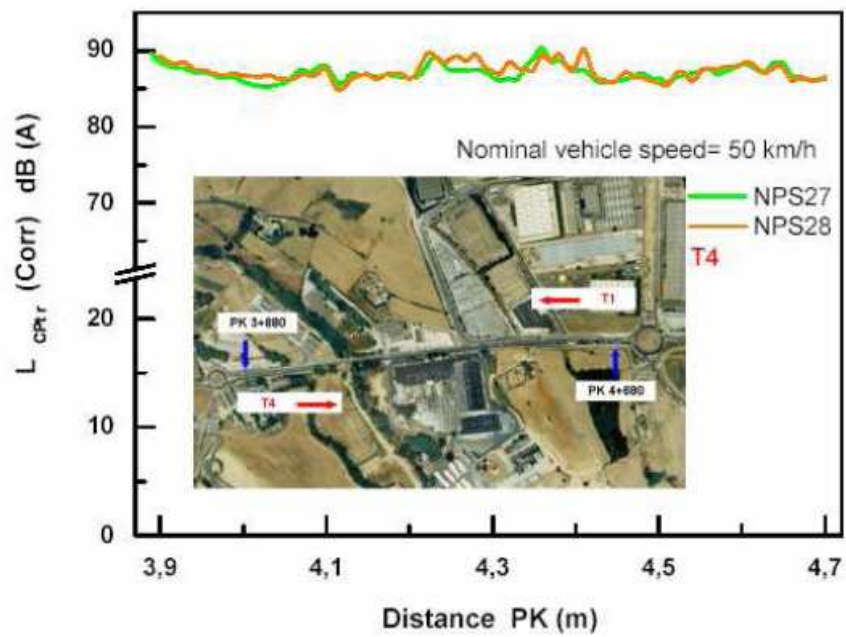
**B.1) EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL TRAMO T4**

**NEUMÁTICO AVON ENVIRO CR 322**

*Evolución de los niveles sonoros en el Tramo T4*

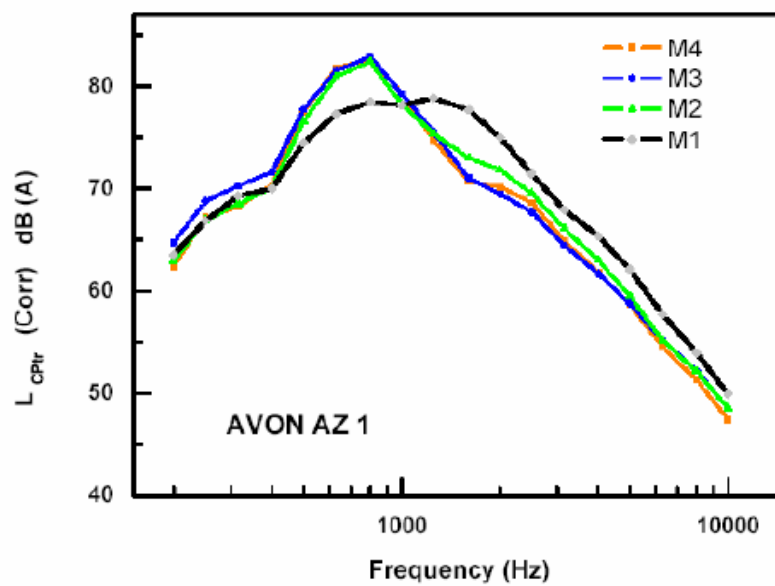
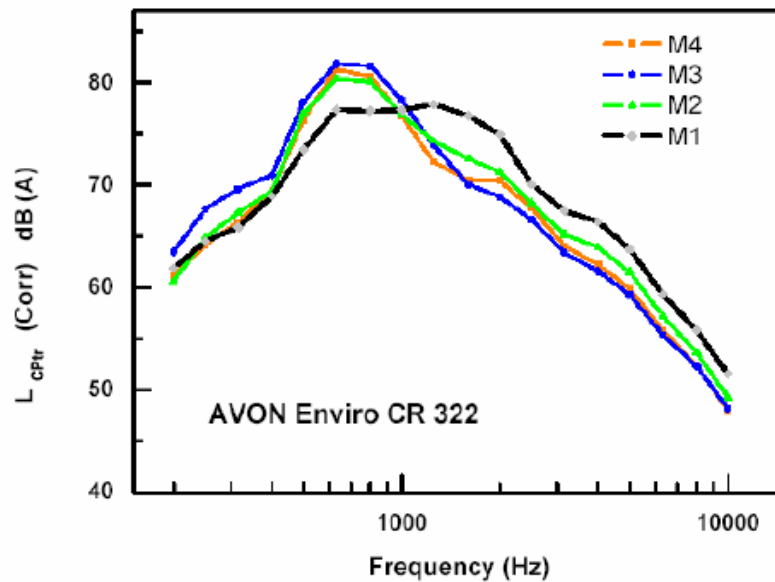


**NEUMÁTICO AVON ZV1**



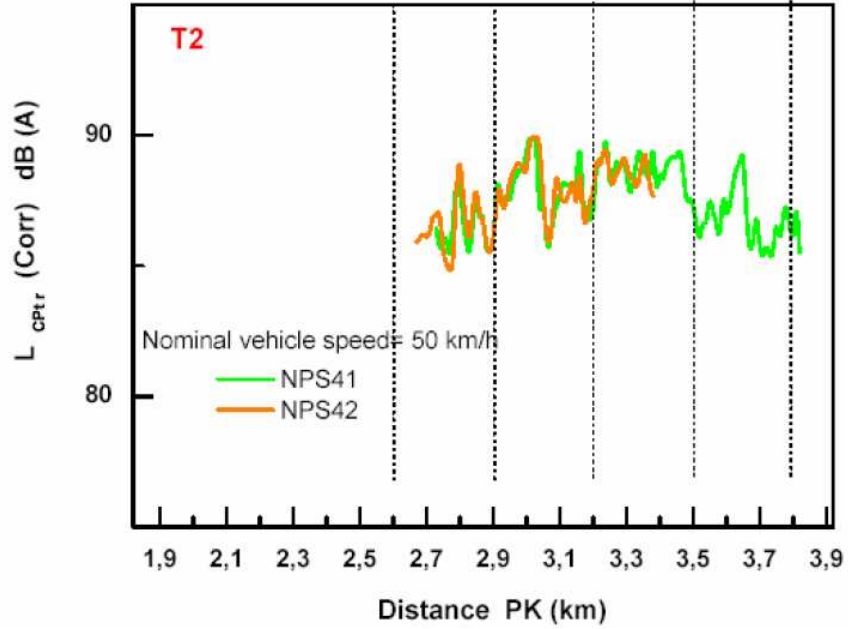


**B.2) ANÁLISIS ESPECTRAL EN EL TRAMO T4**

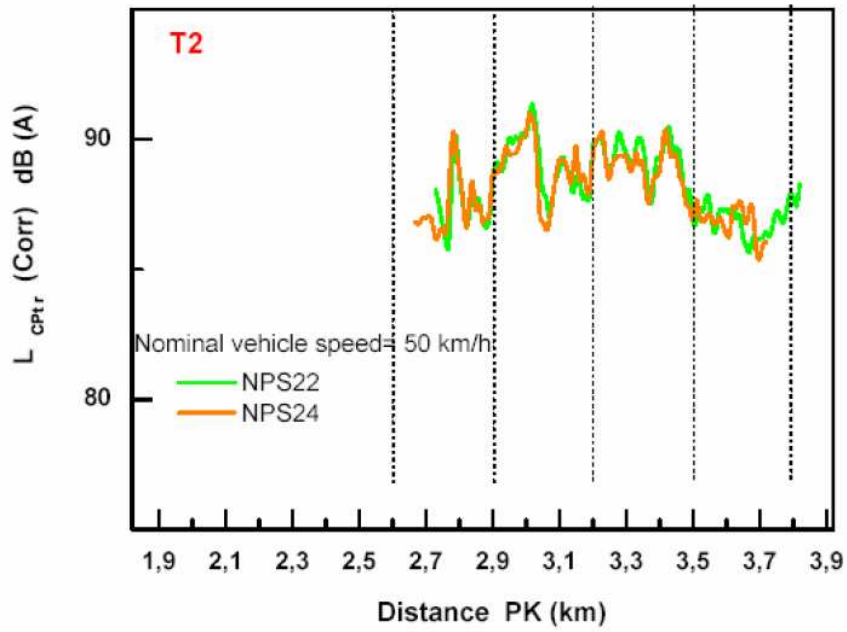


C.1) EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL TRAMO T2

NEUMÁTICO AVON ENVIRO CR 322

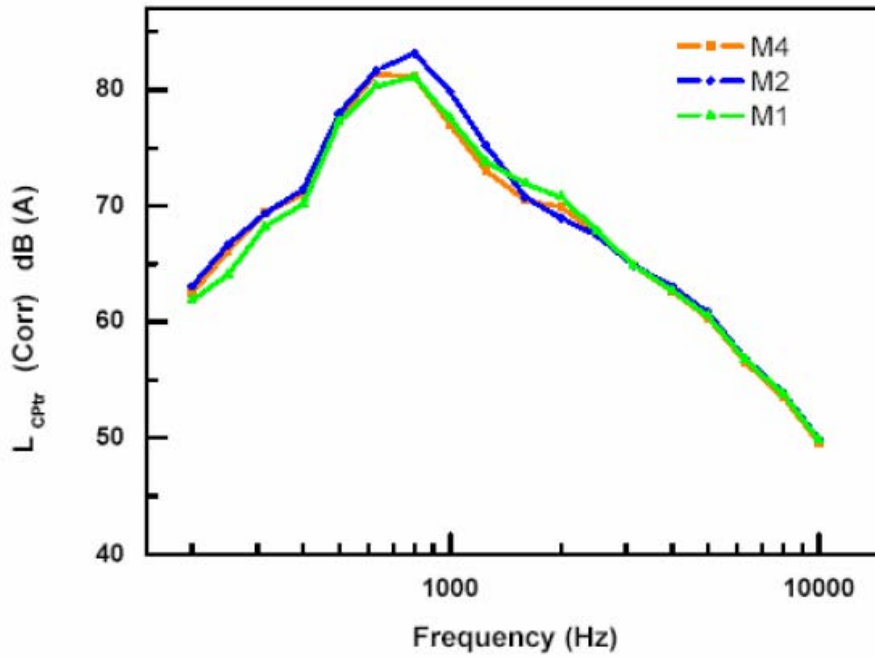


NEUMÁTICO AVON ZV1

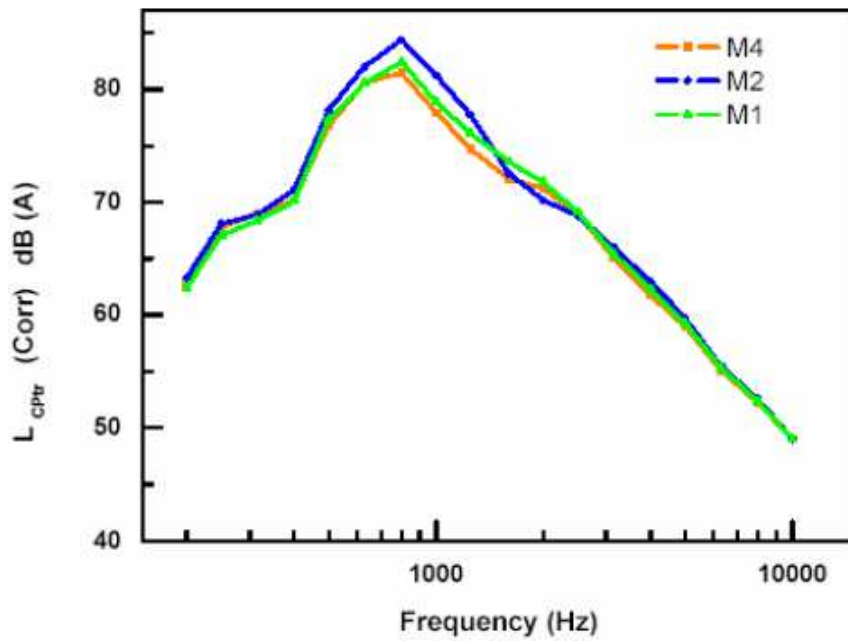


C.2) ANÁLISIS ESPECTRAL EN EL TRAMO T2

NEUMÁTICO AVON ENVIRO CR 322

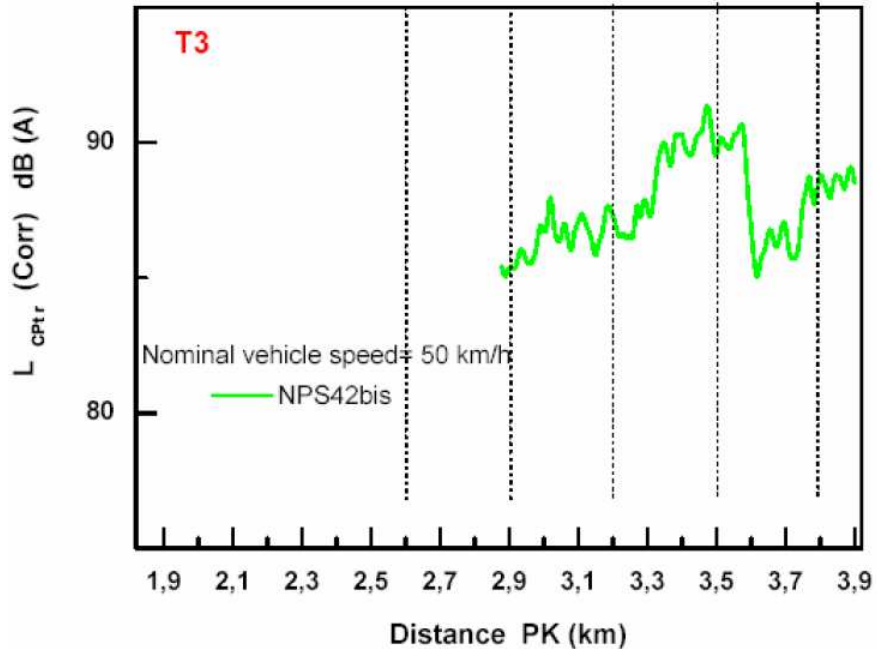


NEUMÁTICO AVON ZV1

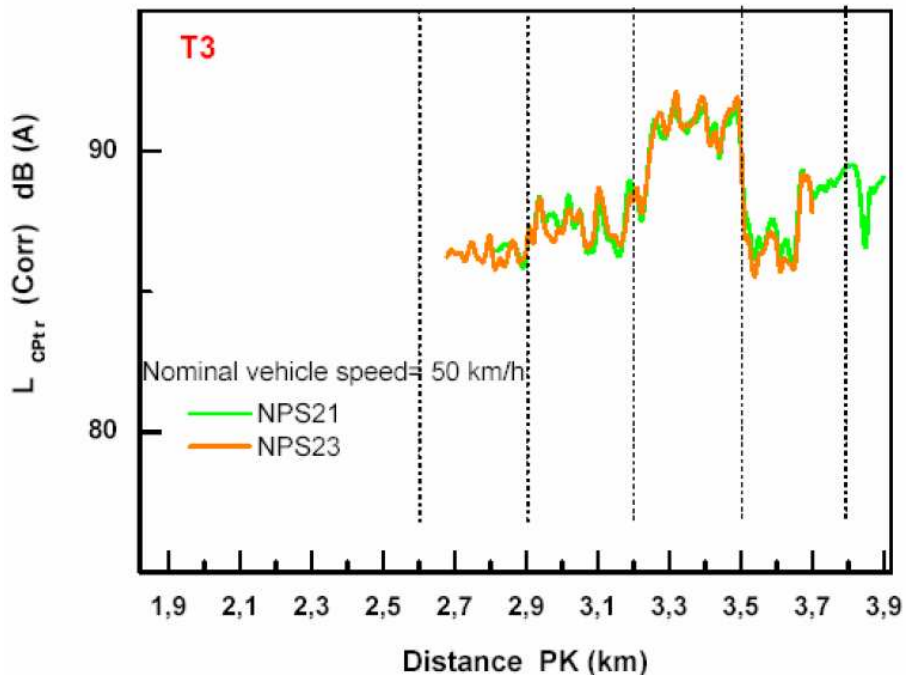


**D.1) EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL TRAMO T3**

**NEUMÁTICO AVON ENVIRO CR 322**

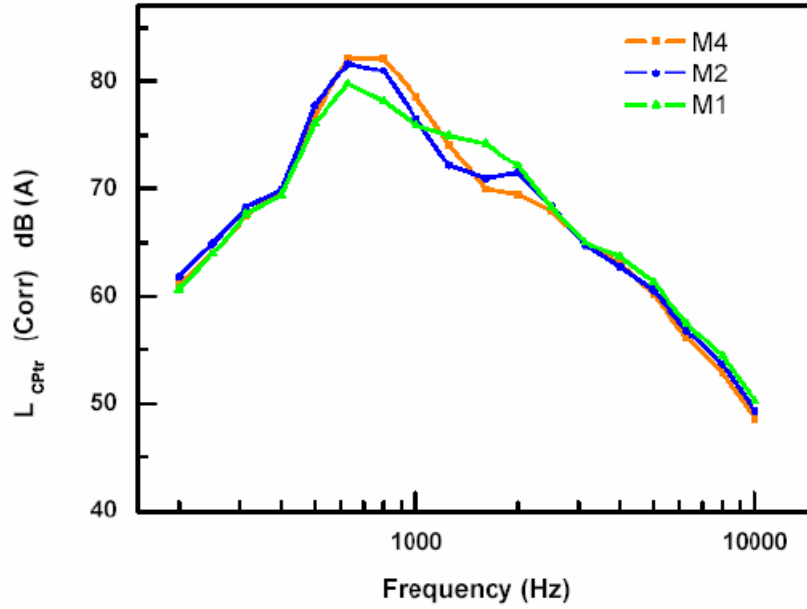


**NEUMÁTICO AVON ZV1**



D.2) ANÁLISIS ESPECTRAL EN EL TRAMO T3

NEUMÁTICO AVON ENVIRO CR 322



NEUMÁTICO AVON ZV1

