

# RECOMENDACIONES SOBRE PAVIMENTOS SONO-REDUCTORES TIPO LIFE SOUNDLESS

New generation of  
eco-friendly asphalts  
with recycled materials  
and high durability  
and acoustic performance

Nueva generación de  
aglomerados asfálticos  
con materiales reciclados  
de altas prestaciones  
acústicas y durabilidad

LIFE14 ENV/ES/000708





# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>OBJETO Y ALCANCE</b>	<b>05</b>
1.1	Antecedentes .....	07
1.2	Alcance .....	09
<b>2</b>	<b>EXPERIENCIA LIFE SOUNDLESS</b>	<b>11</b>
2.1	Diagnóstico inicial .....	13
2.2	Diseño mezclas sono-reductoras LIFE SOUNDLESS .....	15
2.3	Demostrativos mezclas sono-reductoras a escala real .....	19
2.3.1	Escenario 1: Tramo de prueba en la A-8058 .....	19
2.3.2	Escenario 2: Tramo de prueba en la A-376 .....	20
<b>3</b>	<b>RECOMENDACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO PARA EL DISEÑO DE UN PAVIMENTO SONO-REDUCTOR</b>	<b>25</b>
3.1	Estudio acústico previo .....	28
3.2	Evaluación de la atenuación real conseguida .....	30
3.3	Evaluación de la durabilidad de la prestación acústica .....	33
<b>4</b>	<b>RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO Y PUESTA EN OBRA DE MEZCLAS SONO-REDUCTORAS</b>	<b>35</b>
4.1	Características generales mezclas tipo SMA .....	37
4.2	Definición mezclas sono-reductoras tipo LIFE SOUNDLESS .....	37
4.3	Aditivos en las mezclas sono-reductoras .....	38
4.4	Materiales .....	39
4.4.1	Ligante hidrocarbonado .....	39
4.4.2	Árido grueso .....	40
4.4.3	Árido fino .....	42
4.4.4	Polvo mineral .....	42
4.4.5	Aditivos .....	43
4.5	Tipo y composición de la mezcla .....	46
4.6	Equipo necesario para la ejecución de las obras .....	47

4.6.1	Central de fabricación .....	47
4.6.2	Elementos de transporte .....	47
4.6.3	Equipo de extendido .....	48
4.6.4	Equipo de compactación .....	48
4.7	Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo .....	48
4.7.1	Aspectos generales .....	49
4.7.2	Contenido de huecos .....	50
4.7.3	Resistencia a la deformación permanente .....	50
4.7.4	Sensibilidad al agua .....	50
4.7.5	Escurrimiento del ligante .....	51
4.8	Ejecución de las obras .....	51
4.9	Especificaciones de la unidad terminada .....	52
4.9.1	Densidad .....	52
4.9.2	Rasante, espesor y anchura .....	52
4.9.3	Regularidad superficial .....	52
4.9.4	Macrotextura superficial .....	52
4.10	Control de calidad .....	53
4.10.1	Control de procedencia y calidad de los materiales .....	53
4.10.2	Control de ejecución .....	53
4.11	Criterios de aceptación y rechazo .....	53
4.12	Medición y abono .....	53

## 5 REFERENCIAS 55

## 6 ANEXO: MÉTODOS DE MEDIDA DE LAS PRESTACIONES ACÚSTICAS 59

6.1	Método de proximidad (Método CPX) .....	61
6.2	Método estadístico de paso (Método SPB) .....	63
6.3	Método estadístico de paso – Variante Backing Board .....	66
	(Método SPB-BB)	

01

# OBJETIVO Y ALCANCE





## 1.1. ANTECEDENTES

La urbanización, el crecimiento económico y el transporte motorizado son algunas de las causas que determinan la continua exposición de la población urbana al ruido ambiental. La contaminación acústica es un problema ambiental de las áreas urbanas especialmente, ya que en ellas es mayor el número de personas afectadas. Hoy en día nadie cuestiona la relación entre el ruido ambiental y los efectos negativos en la salud, como los problemas cardiovasculares, trastornos en el sueño y deterioros cognitivos<sup>[1]</sup>.



Merece la pena resaltar los resultados publicados en el Proyecto EBoDE<sup>[2]</sup>, que apunta al ruido del tráfico como el segundo factor causante del estrés ambiental, con el agravante de que en Europa la exposición al ruido se ha incrementado en comparación con otros factores estresantes como pueden ser la exposición al humo, dioxinas o benceno. Por su importancia, la Comisión Europea está desarrollando un plan de acción enfocado al control de este problema, en el marco de la Directiva de ruido ambiental. Con este fin, administraciones públicas, empresas de ingeniería y organismos de investigación están trabajando en el desarrollo de nuevas herramientas para reducir los niveles de ruido, así como la población afectada por estos niveles, a la vez que se tienen en cuenta los principios de la economía circular.

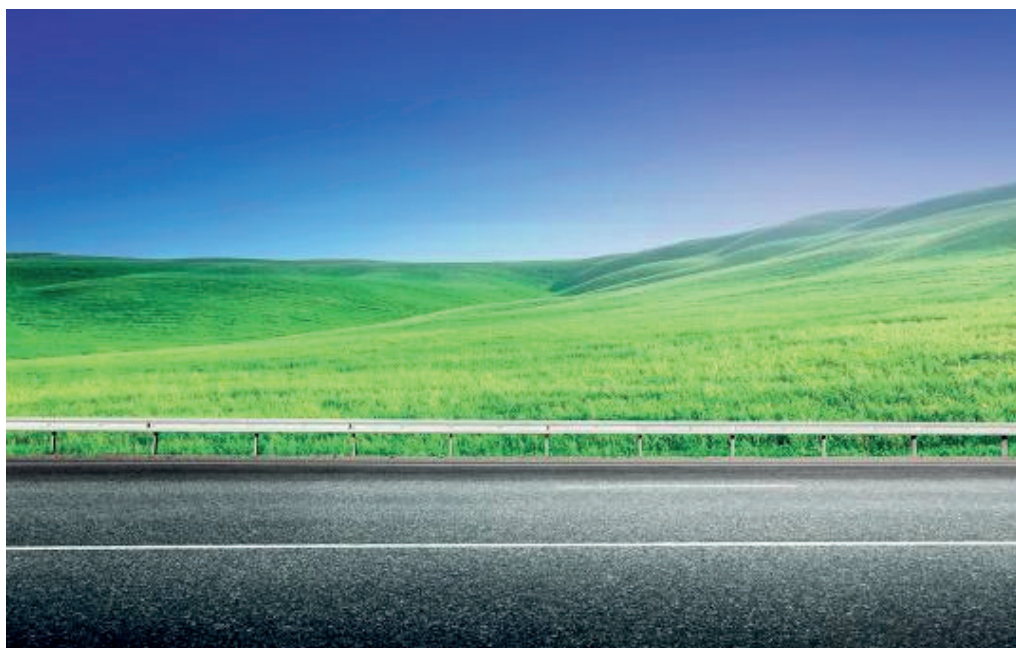
Dentro de este área prioritaria se enmarca el proyecto financiado por la Unión Europea LIFE-SOUNDLESS “Nueva generación de aglomerados asfálticos con materiales reciclados de altas prestaciones y durabilidad”, que fue seleccionado por la Comisión Europea en la convocatoria 2014 del Programa de Medio Ambiente y Acción por el Clima. Coordinado por la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía y en el que participan como socios la Fundación Cidaut especialistas en acústica medioambiental y la empresa constructora Eiffage Infraestructuras, especialista en diseño y puesta en obra de mezclas asfálticas.

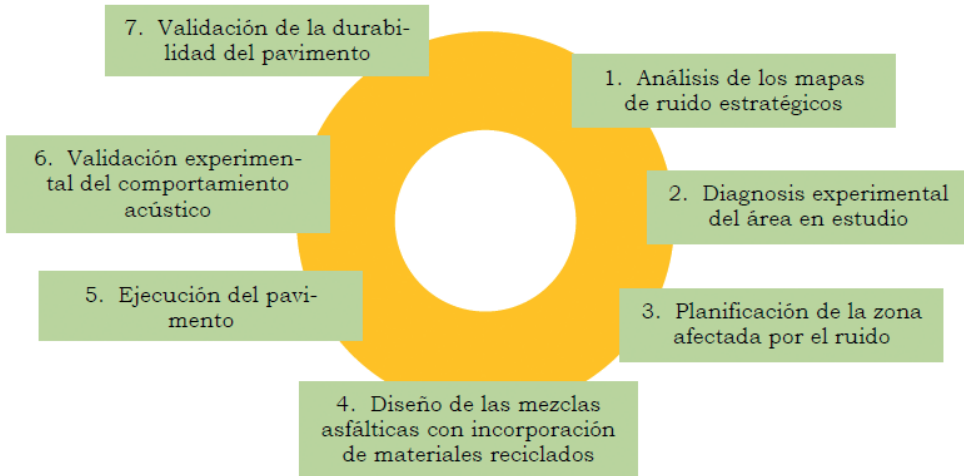


**LIFE-SOUNDLESS** persigue demostrar la efectividad y durabilidad de las mezclas sono-reductoras tipo SMA para mitigar la contaminación acústica en origen. Además, se centra en la efectividad de estas mezclas en climas mediterráneos (sur de Europa), en los que las condiciones climatológicas son muy diferentes de las de los países del norte, donde tienen

mayor experiencia en el empleo y prestaciones de mezclas porosas fonoabsorbentes. Este tipo de mezclas porosas en climas secos y cálidos no han dado el resultado esperado por colmatación de huecos o por problemas de desprendimientos de áridos en zonas de frenada y esfuerzos tangenciales severos. Además, para acentuar el carácter medioambiental de las mezclas **LIFE-SOUNDLESS**, se ha propuesto la incorporación en su composición de residuos de otras industrias cuyo efecto en la reducción de ruido se ha pretendido estudiar.

Para garantizar el éxito de los planes de acción contra el ruido debido al tráfico rodado, es importante establecer un sistema de operaciones con escalones bien diferenciados que permitan encontrar la mejor solución para cada caso concreto.





#### PASOS SEGUIDOS EN EL DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LA SOLUCIÓN LIFE SOUNDLESS

Por último, con este proyecto se pretende animar a Administraciones Públicas y a promotores privados a que tengan en cuenta aspectos medioambientales relacionados con la contaminación acústica y la economía circular en sus nuevos proyectos. Con la intención de ayudar a otros técnicos a encontrar la mejor solución en problemas relacionados con la contaminación acústica provocada por el tráfico rodado se redactan estas Recomendaciones técnicas basadas en la experiencia del Proyecto LIFE-SOUNDLESS.

## 1.2 ALCANCE

Los objetivos principales de estas Recomendaciones son tres:

- Presentar un resumen de las actividades ejecutadas en el Proyecto LIFE-SOUNDLESS que dan soporte a la experiencia en base a la cual han sido redactadas estas Recomendaciones.
- Desarrollar unas consideraciones a tener en cuenta sobre el comportamiento acústico de un pavimento sono-reductor.
- Definir unas especificaciones para el diseño, fabricación, puesta en obra y control de calidad de las mezclas bituminosas sono-reductoras desarrolladas en el marco del Proyecto LIFE-SOUNDLESS.



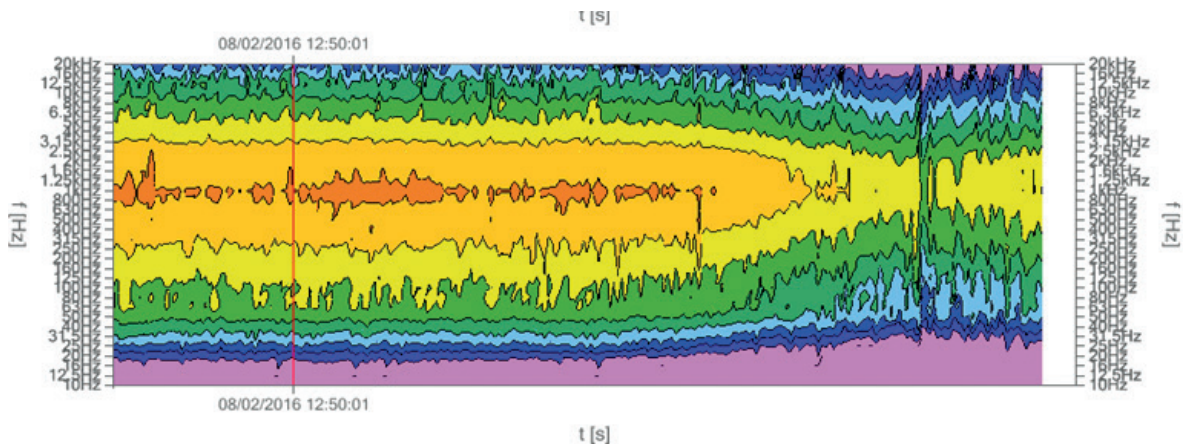
02

EXPERIENCIA  
LIFE-SOUNDLESS









Por último y con el objetivo de poder cuantificar la efectividad de las soluciones propuestas se llevó a cabo la monitorización acústica de los tramos. Para caracterizar cada tramo se midió el nivel de ruido de rodadura según el método CPX\_p<sup>[3]</sup> (Close Proximity Method) aportando un valor en el tramo cada 20m. Este parámetro permite conocer en detalle el nivel de ruido de rodadura generado por el pavimento actual. El CPX\_p es el índice CPX medido únicamente con la rueda homologada para vehículos ligeros. Igualmente se midió el nivel de ruido del tráfico actual según el método SPB<sup>[4]</sup> (Statistical Pass By noise). Este ensayo nos permite obtener un valor único para cada tramo que sin embargo responderá de manera más fiel a la molestia que el ruido de tráfico genera en el ciudadano.



ENSAYO CPX



ENSAYO SPB

Como complemento a la caracterización acústica se realizó una evaluación de la macrotextura y de la regularidad superficial de la superficie del firme. Estas características influyen en el ruido de rodadura inicial y por tanto ayudan a la interpretación de los resultados obtenidos en la evaluación acústica. Además, se comprueba si entran dentro de los criterios a partir de los cuales no se cumplen las prestaciones de confort en la rodadura de acuerdo a la reglamentación española (PG-3). La macrotextura fue evaluada mediante dos métodos: uno puntual y discontinuo (método del círculo de arena) y otro longitudinal y continuo (mediante perfilómetro laser). La regularidad de la superficie se obtuvo en continuo a través del Índice de Regularidad Superficial (IRI).



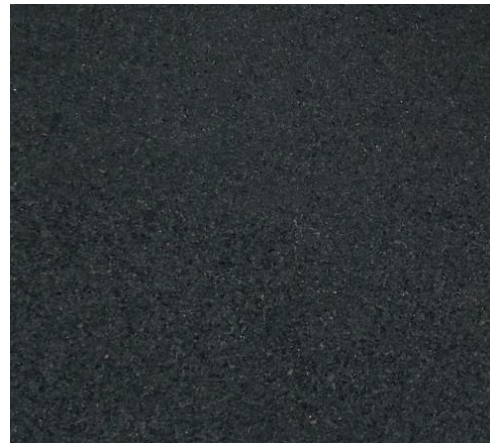
ENSAYO DE CIRCULO DE ARENA



VEHÍCULO DE AUSCULTACIÓN PARA IRI Y MACROTEXTURA

## 2.2. DISEÑO DE MEZCLAS SONO-REDUCTORAS LIFE SOUNDLESS

Esta acción se centró en el diseño de una mezcla tipo SMA de alta durabilidad incorporando materiales residuales con el objetivo de alcanzar una reducción del ruido de rodadura en origen debido a la interacción entre el neumático y el pavimento. Además, puesto que la sostenibilidad ambiental era otro objetivo de este proyecto, se han empleado materiales residuales como materia prima en el proceso. Concretamente, se han incorporado a la mezcla bituminosa residuos plásticos, polvo de caucho y fibras de nylon proveniente de los neumáticos.



POLVO DE CAUCHO

El optar por una estructura granular de mezcla tipo SMA en lugar de una mezcla porosa tipo PA, ha venido motivado por el interés de proponer un tipo de mezclas que no perdieran sus propiedades acústicas en climas mediterráneos de baja pluviometría. Es bien sabido que uno de los problemas de las mezclas porosas en este tipo de climas es la colmatación de los huecos con el polvo y suciedad del pavimento, lo que hace que pierdan sus características fonoabsorbentes en un tiempo relativamente corto. Además, también es común el fallo de este tipo de mezclas en zonas urbanas sometidas a esfuerzos tangenciales (giros en glorieta, aceleraciones y frenadas en zonas de semáforos, etc.). Estos inconvenientes se han pretendido salvar con el diseño de unas mezclas tipo SMA, que si bien no obtienen en un primer momento la reducción de ruido que se consiguen con las mezclas porosas, sí se espera que el efecto sono-reductor se mantenga durante más tiempo, al tratarse de unas mezclas con una gran cohesión a la vez que dotadas de buenas características superficiales gracias a su macrotextura negativa.



RESIDUOS PLÁSTICOS AGRICULOS

Como punto de partida para la composición granulométrica de las mezclas LIFE-SOUNDLESS se tomó referencia (Tabla 1), el huso granulométrico de la Propuesta de Normativa de Pliego de Prescripciones Técnicas de las Mezclas Tipo SMA<sup>[5]</sup>. Esta propuesta se redacta partiendo de las experiencias recogidas a lo largo del Proyecto SMA “Mezclas SMA sostenibles medioambientalmente amigables” financiado por el Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial (CDTI) y liderado por Eiffage Infraestructuras.

GRANULOMETRIA DE LAS PARTICULAS (UNE 933-1)						
TAMIZ (MM)	11,2	8	4	2	0,5	0,063
	100	90-100	30-45	25-35	12-22	7-10

TABLA 1. HUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERENCIA PARA LA MEZCLA SMA8

Para el diseño de las mezclas LIFE-SOUNDLESS, la composición granulométrica se modificó con respecto a la media del huso de referencia, buscando una curva granulométrica más abierta (mayor contenido de huecos) que favoreciera una mayor macrotextura y así disminuir el ruido de contacto del neumático con el pavimento. Se seleccionó como contenido de betún el 5,8% sobre mezcla.

Las variables en el diseño óptimo de las mezclas LIFE-SOUNDLESS fueron el porcentaje de residuos empleados y la curva granulométrica buscando huecos en mezcla en torno al 12%. Como consecuencia se estudiaron 22 composiciones de mezcla SMA como se indica en la Tabla 2.

MEZCLAS ESTUDIADAS	ENSAYOS REALIZADOS
3 de referencia (1 AC16 y 2 SMA8)	Densidad máxima, Densidad aparente
2 con plástico de invernadero (0,5%-1%)	% Huecos
4 con plástico de cableado (0,5% -1%)	Sensibilidad al agua
2 con plásticos de masterbatches (1%)	Deformación permanente
2 con nylon (0,2%-0,5%)	Pérdida de partículas
6 con NFU (0,5%-1%-1,5%-2%) variando contenido de betún	Estabilidad Marshall
1 con NFU y plástico cables (0,5%+0,5%)	Rigidez y fatiga
2 con NFU y plástico invernadero (0,5%+0,5% - 1%+0,5%)	

TABLA 2. MEZCLAS ESTUDIADAS EN EL PROYECTO LIFE-SOUNDLESS

Como resumen de todo el trabajo de laboratorio, se indica que todas las mezclas estudiadas salvo las que incorporaban residuos plásticos de cables cumplían las especificaciones españolas para capa de rodadura, salvo la especificación de huecos, ya que como se ha comentado anteriormente, se buscaba un porcentaje similar a la de las mezclas tipo BBTM B (en torno al 12%). Las mezclas con residuos de cables presentaban unas deformaciones plásticas por encima de lo permitido. El criterio definitivo para la selección de las mezclas sería el correspondiente al comportamiento acústico, una vez asegurado su cumplimiento desde el punto de vista mecánico y estructural.



RESIDUOS DE NYLON DE NFU

El comportamiento acústico de las mezclas se evaluó mediante el ensayo de absorción acústica con el tubo de Kundt (EN ISO 10354-2) y mediante el ensayo de impedancia mecánica que consiste en aplicar un impacto sobre la superficie de la probeta y registrar su respuesta vibratoria.



EVALUACIÓN ACÚSTICA DE PROBETAS. TUBO DE KUNDT (IZQUIERDA). IMPEDANCIA (CENTRO Y DERECHA)

Se pudo comprobar que ninguna de las muestras analizadas presentaba un coeficiente de absorción elevado, lo que concluye que, para este tipo de mezclas, no es una de las principales características de cara a la reducción de ruido. En cuanto al ensayo de impedancia mecánica, en el que se estima un valor de la rigidez de la mezcla y un módulo de Young equivalente, éste tiene que ver con la agresividad con la que el pavimento excita a la rueda y por tanto a los modos radiantes de la misma. Un valor alto de este módulo implicaría una mayor propensión a la generación de ruido. A menor valor de este módulo, menor capacidad de excitación de la rueda tendrá el pavimento.



RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPEDANCIA MECÁNICA

## 2.3. DEMOSTRATIVOS MEZCLAS SONO-REDUCTORAS A ESCALA REAL

En el marco del Proyecto LIFE-SOUNDLESS se llevó a cabo la implementación de dos tramos pilotos con el objetivo de estudiar el comportamiento acústico y prestacional a largo plazo de mezclas sono-reductoras diseñadas en el ámbito del proyecto.

Se eligieron dos tramos conflictivos desde un punto de vista acústico de la Red de Carreteras de Andalucía. A raíz de los resultados del ensayo de impedancia mecánica obtenidos, se seleccionaron las mezclas para los demostrativos a escala real.



### 2.3.1. ESCENARIO 1: TRAMO DE PRUEBA EN LA A-8058

La actuación se ha localizado en el término municipal de Gelves, entre los PPKK 3+350 y 3+870 de la carretera A-8058, que une la capital con Puebla del Río.

Se trata de un tramo interurbano de una carretera de doble calzada que conecta varias aglomeraciones urbanas situadas a lo largo de la carretera. Presenta una IMD en torno a 30.000 vehículos día, baja velocidad (menor a 50 km/h) y un bajo porcentaje de tráfico pesado.

Para este tramo de prueba en la carretera A-8058 se diseñó una mezcla SMA8 con aditivo de caucho procedente de Neumático Fuera de Uso.



En este tramo se extendieron dos mezclas diferentes, con porcentajes diferentes de betún y de caucho, con el objetivo de realizar un estudio a largo plazo del comportamiento acústico y prestacional de estas mezclas.

- Calzada Derecha: mezcla SMA8 con porcentaje de betún de 6% y del 1% de caucho sobre mezcla.
- Calzada Izquierda: mezcla SMA8 con porcentaje de betún de 6,5% y del 1,5% de caucho sobre mezcla.

### 2.3.2. ESCENARIO 2: TRAMO DE PRUEBA EN LA A-376

La actuación se ha localizado en el tramo urbano correspondiente a la población de Montequinto, entre los PPKK 2+100 y 3+100 de la carretera A-376, que une la capital de Sevilla con Utrera.

Se trata de un tramo urbano periférico en carretera de doble calzada con una IMD elevada (en torno a 80.000 vehículos/día), con velocidad media (entre 70-80 km/h) y con un porcentaje de tráfico pesado superior próximo al 5%.



Para este tramo de prueba se diseñó una mezcla SMA8 con adición de diferentes materiales reciclados, y abrir de esta manera el abanico de mezclas a estudiar a largo plazo. Concretamente, se optó por:

- Calzada derecha: mezcla SMA8 con un porcentaje del 1,0% de plástico reciclado.
- Calzada izquierda: mezcla SMA8 con un porcentaje de 0,5% plástico reciclado y 0,5% de polvo de caucho.
- Vía de servicio margen derecha: mezcla SMA8 con un porcentaje de 0,5% de fibras de nylon recicladas.

Tras la puesta en obra de las diferentes mezclas LIFE-SOUNDLESS en los tramos pilotos y con una frecuencia semestral hasta la finalización del proyecto, se han realizado mediciones de indicadores sonoros (CPX y SPB) con el objetivo de evaluar la durabilidad de las soluciones empleadas desde un punto de vista acústico. Además, se han realizado las mediciones de indicadores sonoros auxiliares, tales como, mediciones de macrotextura mediante el método volumétrico (MTD) y método perfilométrico (MPD). Y a su vez, se han complementado con la evaluación de la regularidad superficial.

En las tablas siguientes (3, 4 y 5), se presentan los principales resultados y conclusiones obtenidos en las diferentes campañas de monitorización realizadas durante los primeros 24 meses desde la ejecución de los tramos piloto:

VÍA		COMPOSICIÓN	ESTADO INICIAL		1ª CAMPAÑA		2ª CAMPAÑA		3ª CAMPAÑA		4ª CAMPAÑA		5ª CAMPAÑA	
ESC1	A-8058 Sevilla-Coria	SMA8 1,0% NFU	92,2		89,8		90,1		89,7		90,6		90,8	
	A-8058 Coria-Sevilla	SMA8 1,5% NFU	93,3		88,7		89,6		89,3		90,4		90,7	
ESC2	A-376 Vía de servicio	SMA8 0,5% Nylon	94,6		90,7		90,6		90,9		92,2		91,1	
	A-376 Sevilla-Utrera	SMA8 1,0% P	96,1	104,2	91,4	96,9	90,7	96,4	91,3	97,3	92,4	98,4	92	98,5
	A-376 Utrera-Sevilla	SMA8 0,5% P + 0,5% NFU	94,6	104,1	90,8	96,9	90,3	96,3	91,1	97,3	92	98,3	91,5	98,4
	A-376 Utrera-Sevilla	AC16 surf 35/50 S ref.	94,6	104,1	92,9	101,4	93,4	100,8	94,5	101,8	95,3	102,6	95,5	103,2

TABLA 3. VALORES DEL ÍNDICE CPX\_P MEDIDOS EN CADA UNA DE LAS CAMPAÑAS REALIZADAS TRAS LA PAVIMENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES SOUNDLESS.

VÍA		COMPOSICIÓN	ATENUACIÓN ACÚSTICA MEDIA (dBA)	
			50 KM/H	80 KM/H
ESC1	A-8058 Sevilla a Coria	SMA8 1,0% NFU	1,4	
	A-8058 Coria a Sevilla	SMA8 1,5% NFU	2,6	
ESC2	A-376 Vía de servicio	SMA8 0,5% Nylon	3,5	
	A-376 Sevilla a Utrera	SMA8 1,0% Plástico	4,1	5,7
	A-376 Utrera a Sevilla	SMA8 0,5% P + 0,5% NFU	3,1	5,7
	A-376 Utrera a Sevilla	AC16 surf 35/50 S ref.	-0,9	0,9

TABLA 4. ATENUACIONES ACÚSTICAS CONSEGUIDAS TRAS 24 MESES A PARTIR DEL ENSAYO CPX RESPECTO A LA SITUACIÓN INICIAL

Tras 24 meses desde la implementación de las mezclas LIFE-SOUNDLESS en los tramos pilotos y con 5 campañas de monitorización, aún se observa que se mantiene la reducción del ruido de rodadura generado por el contacto entre el neumático y el pavimento. Esa atenuación es más importante a mayor velocidad, ya que la contribución del ruido de rodadura es también más significativa a mayores velocidades.

Las mezclas LIFE-SOUNDLESS más silenciosas han resultado ser las que incorporan polvo de caucho NFU a alta tasa (por encima del 15%).

VÍA	COMPOSICIÓN	TIPO DE VEHÍCULO	ESTADO INICIAL	1ª CAMPAÑA	2ª CAMPAÑA	3ª CAMPAÑA	4ª CAMPAÑA	5ª CAMPAÑA	
			LSPB (dBA)	LSPB (dBA)	LSPB (dBA)	LSPB (dBA)	LSPB (dBA)	LSPB (dBA)	
ESC1	A-8058 Sevilla-Coria	SMA8 1,0% NFU	L	73,4	68,2	67,8	68,0	68,7	69,6
			P	78,0	76,2	78,1	77,6	77,6	79,0
ESC2	A-376 Utrera-Sevilla	SMA8 0,5% Plástico 0,5% NFU	L	77,2	68,3	68,2	68,4	68,7	69,0
			P	80,7	72,5	74,8	78,0	77,9	78,3
	A-376 Sevilla-Utrera*	SMA8 1,0% Plástico	L		64,3	66,8	63,8	63,8	62,0
			P		79,3				

Nota: \*Ensayos realizados por la noche; L: vehículo ligero; P: vehículo pesado

Las reducciones sonoras medidas con el método SPB tras 24 meses se encuentran en torno a 4 dBA en la A-8058 (Escenario 1) y de 8 dBA en la A-376 (Escenario 2).



03

RECOMENDACIONES  
SOBRE EL COMPORTAMIENTO  
ACÚSTICO PARA EL DISEÑO  
DE UN PAVIMENTO  
SONO-REDUCTOR





La contaminación acústica de las ciudades tiene como origen diferentes focos: el tráfico rodado por carretera, el tráfico ferroviario, los puertos, los aeropuertos, la actividad industrial y el ocio. Además de las diferencias en cuanto a la generación del ruido en cada uno de ellos, la propagación del ruido del foco al receptor es también muy diferente. Es entendible entonces que las soluciones al problema de la contaminación acústica no sean universales, sino que requieren en cada caso de un estudio previo individualizado con el fin de establecer la eficiencia y la eficacia de las mismas para obtener beneficios para la mayor cantidad de personas afectadas y con el menor valor en la relación coste/beneficio.

Por ello cuando se desea utilizar un pavimento sono-reductor en un punto de conflicto por contaminación acústica es necesario tener en cuenta que el ruido dominante en la zona es el ruido de rodadura. Si dominan otras fuentes las soluciones adoptadas no van a tener el rendimiento estimado. Se debe garantizar que la fuente sea el ruido del tráfico en la carretera y que dentro de estos componentes sea predominante el ruido del neumático (con frecuencias dominantes típicamente en las bandas de 800 a 1600 Hz).

En segundo lugar, es necesario poner de manifiesto que las atenuaciones conseguidas en el punto de conflicto tienen dos contribuciones principales. Una inherente al término de la fuente que más o menos será constante en función de la solución de pavimento que sea elegida. La otra que depende de la propagación del sonido donde la orografía del terreno y las características de las construcciones adyacentes van a contribuir a que el valor global de atenuación conseguido en la zona sea mayor o menor respecto del término de fuente.

Por último, debe tenerse en cuenta la durabilidad de la solución ejecutada, no solo en términos estructurales sino también en el rendimiento acústico. Por ejemplo, varias soluciones con mezclas porosas exhiben grandes atenuaciones acústicas nada más ser colocadas, pero que no se pueden mantener en el tiempo, y eventualmente empeoran conforme van envejeciendo debido a la pérdida de áridos originando problemas de textura, así como la colmatación de los huecos responsables de la absorción acústica. El envejecimiento y, por lo tanto, la pérdida de rendimiento acústico del pavimento sono-reductor deben ser comparados con los de una mezcla de referencia a lo largo de su vida útil.

Por tanto, es necesario establecer métodos que permitan determinar la viabilidad de una solución consistente en un pavimento sono-reductor así como evaluar las prestaciones acústicas de los pavimentos una vez terminada la obra y su evolución temporal.

- Estudio acústico para confirmar que el ruido de rodadura es la fuente dominante.
- Pruebas de evaluación de la atenuación real que se ha logrado con la solución existente.

- Evaluación del rendimiento acústico durante la vida. El rendimiento acústico de la solución debe ser evaluado con el tiempo. Se recomienda un periodo de evaluación bianual durante los 4 primeros años de vida para pasar luego a una evaluación anual. Este estudio permitirá saber en qué momento el pavimento sono-reductor ha dejado de serlo, aunque pueda seguir manteniendo otro tipo de prestaciones.

### 3.1. ESTUDIO ACÚSTICO PREVIO

Los pavimentos sono-reductores son medidas de control de ruido de tráfico rodado efectivas cuando la componente dominante es el ruido de rodadura. Esta afirmación no siempre está de acuerdo con la realidad de las situaciones normales de contaminación acústica. De hecho, una misma ubicación puede tener diferentes fuentes de ruido dominantes a lo largo del día. Por ello, antes de realizar cualquier toma de decisión sobre la realización de cualquier medida encaminada a la reducción de la contaminación acústica se recomienda tener datos reales acerca del contenido espectral del ruido generado en la zona.

Se recuerda que los mapas estratégicos de ruido realizados de acuerdo con el método “NMPB-Routes-96” no diferencian las diferentes contribuciones que puede tener el ruido de tráfico, por lo cual difícilmente se pueden tomar decisiones solamente con datos basados en estos estudios.

La colocación de un pavimento sono-reductor en una carretera se decide normalmente cuando se presentan quejas o ante un estudio previo de ruido donde los niveles de ruido son altos. Sin embargo, es necesario asegurar que la contribución dominante del ruido en la zona donde se quiere reducir la contaminación acústica es el ruido de rodadura.

El ruido de rodadura es un ruido de banda ancha (salvo en algunos casos de pavimentos ranurados donde aparecen frecuencias tonales dominantes), normalmente estacionario cuando la frecuencia de paso de vehículos es constante, y con un rango de frecuencias dominantes que van desde 800 Hz a 1600 Hz.

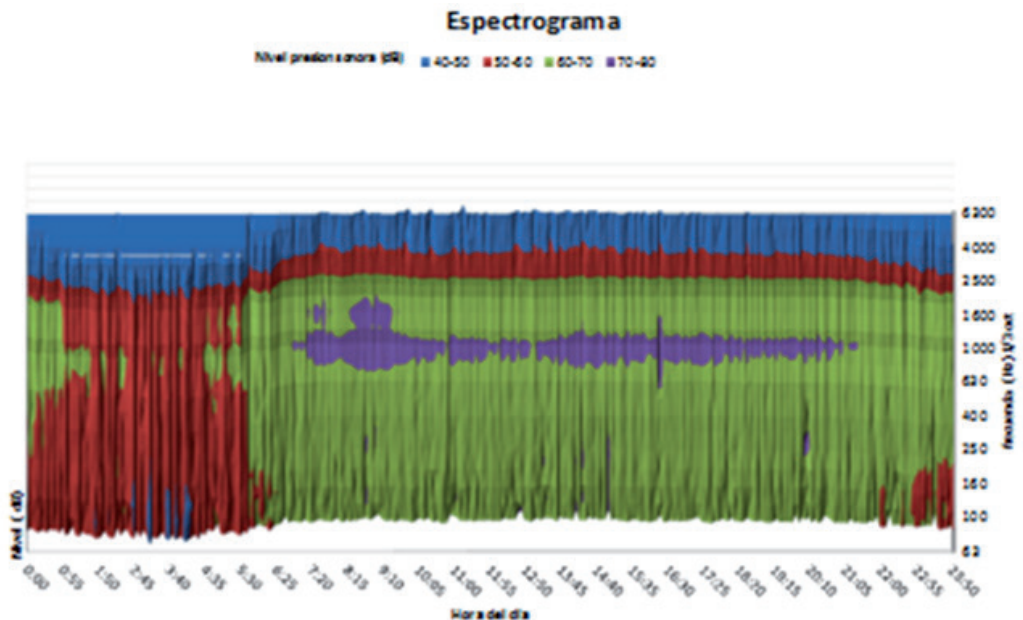
A la vez que se comprueban los niveles de presión sonora equivalentes en la zona es deseable constatar la información anterior, para lo cual es aconsejable realizar un análisis espectral al menos en tercios de octava. Hay estaciones de medida que además de medir el nivel de presión sonora equivalente permiten medir el espectro sonoro, como el equipo CESVA SC-420. Como ejemplo, se adjunta una imagen del punto donde se colocó la estación en la mediana de la carretera A-376 (Proyecto LIFE-SOUNDLESS) a 3m de altura sobre la calzada, aprovechando la farola existente para sujetarla.



EJEMPLO DE EMPLAZAMIENTO SELECCIONADO PARA REALIZAR EL ANÁLISIS ESPECTRAL (PROYECTO LIFE-SOUNDLESS)

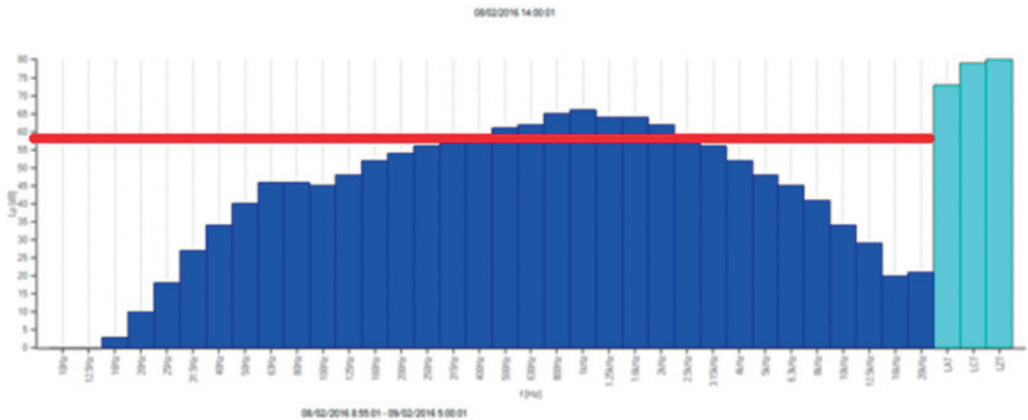
Los datos registrados cada 5 minutos se presentan en un espectrograma como el de la siguiente figura donde se aprecia como domina el ruido de rodadura entre las 6:00 y las 22:00 horas.

Se presenta también un espectro para poder evaluar mejor el rango de frecuencias.



ESPECTROGRAMA REGISTRADO EN EMPLAZAMIENTO

Otras variables que es necesario considerar en el estudio acústico previo sobre la zona será la intensidad de tráfico del eje viario en cuestión, así como conocer el número de personas afectadas por el ruido para establecer así la reducción potencial que haga que la solución sea rentable. Los resultados de este estudio establecerán una recomendación clara acerca de la solución necesaria para conseguir una reducción aceptable de personas afectadas. Como resultado de este estudio se podrá establecer el objetivo de coste por persona afectada reducida.



ESPECTRO DONDE SE CORROBORA LA PREDOMINANCIAS DEL RUIDO DE RODADURA DENTRO DEL RUIDO DE TRÁFICO

### 3.2. EVALUACIÓN DE LA ATENUACIÓN REAL CONSEGUIDA.

A la hora de evaluar la atenuación acústica real que introduce la acción de mejora planificada y definida según el punto anterior, se pueden emplear dos métodos normalizados que permiten medir el ruido de rodadura en dos escenarios diferentes. De esa manera, la atenuación acústica puede ser calculada como una resta aritmética de niveles de ruido medidos en los dos escenarios. Entendemos por escenario un tramo de carretera en un instante de tiempo determinado. En la medida que los escenarios sean equivalentes (acústicamente hablando) la estimación de las atenuaciones será más o menos realista. Es indispensable que los escenarios que se van a utilizar en el contraste para evaluar la atenuación sean debidamente justificados desde un punto de vista acústico.

Existe un método que permite evaluar el ruido global de tráfico en una vía determinada, conocido como el método SPB<sup>[4]</sup> (Statistical Pass By noise). Este método consiste en evaluar el nivel de presión máxima (dBA) medido a 7.5m del eje del carril sometido a evaluación y la velocidad de diferentes pasos aislados de vehículos. Con todos esos puntos se construye una recta de regresión  $L_{pmax}$  (dBA) frente al  $\log(v)$  que permite estimar el nivel de ruido

a la velocidad de paso de la vía. Como se puede entender, en este ensayo se tiene en cuenta además del ruido que generan los neumáticos al rodar, el ruido del escape, la admisión, el motor y otro ruido ambiente. Existe también un segundo método de ensayo donde se mide el nivel de ruido ponderado en dos micrófonos situados a 20 cm de una rueda estandarizada que es el conocido como CPX<sup>[9]</sup> (Close Proximity Method). Como mínimo se recomienda medir el índice correspondiente a la rueda normalizada para vehículos ligeros. Si la carretera tuviera una contribución importante de pesados el índice completo deberá ser medido. A diferencia del método anterior, la proximidad de los micrófonos a la rueda permite captar de manera preponderante el ruido debido en mayor medida a la rodadura. Por lo tanto, se puede decir que es un método que va a caracterizar perfectamente el ruido de rodadura.

En la imagen siguiente se muestra con un esquema advirtiéndole donde se pone el foco en cada uno de los ensayos.

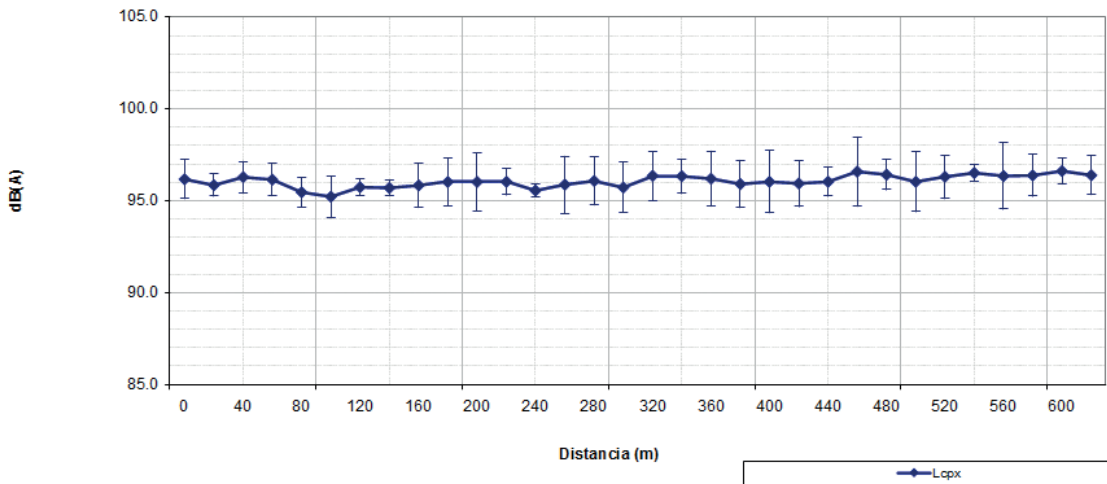


(IZDA.) MÉTODO SPB: VALORACIÓN GLOBAL DEL RUIDO DE TRÁFICO GENERADO EN UNA CARRETERA.  
(DCHA.) MÉTODO CPX: VALORACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

Por lo tanto, la evaluación de la atenuación que proporciona el pavimento sono-reductor se evalúa de manera directa con dos medidas de CPX, una sobre el pavimento elegido y otra sobre la referencia, que puede ser el instante anterior al nuevo pavimento o una mezcla de referencia como se ha elegido en el proyecto Soundless (mezcla de referencia AC16 surf S). Este tipo de evaluaciones son muy positivas para describir las prestaciones acústicas de un determinado pavimento sono-reductor. También permiten ver si la puesta en obra ha sido correcta, analizando la dispersión de la medida a lo largo de todo el tramo asfaltado. Por último, si se quisiera modelar este tipo de soluciones mediante una herramienta de cálculo predictivo (mapas estratégicos), a partir de un estudio incremental se podría llegar a estimar unos coeficientes de atenuación propios del pavimento para aplicar en futuras actuaciones y poder evaluar la eficacia de la solución en otros entornos antes de ser construida.

El índice CPX se evalúa cada 20 m promediando los valores recogidos en los dos micrófonos, en las dos rodadas y durante tres pasadas. El valor global asociado al tramo se corresponde con el valor medio registrado en el trayecto.

### A376\_SU\_50 km/h

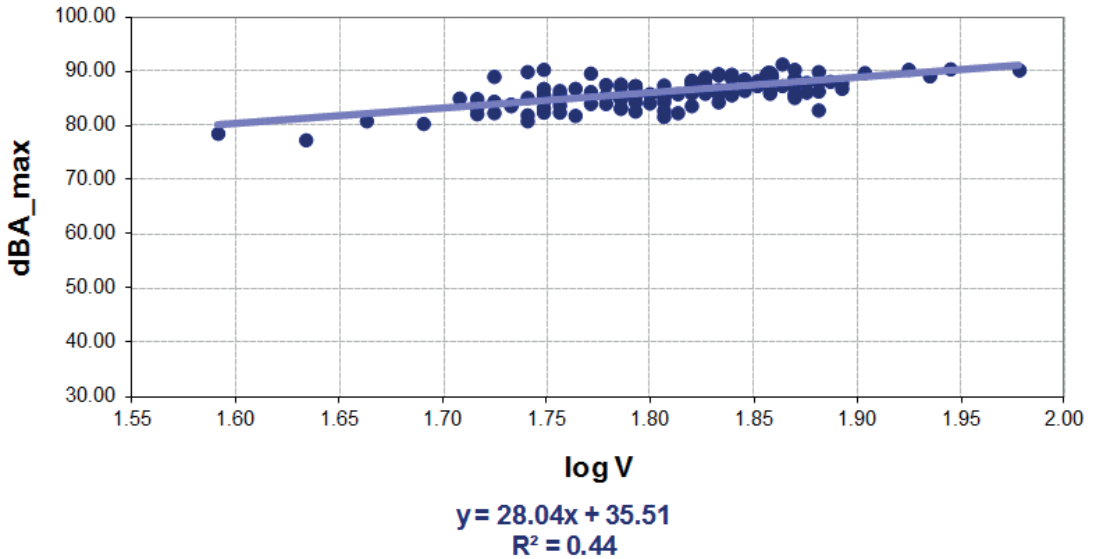


MEDIDA DEL ÍNDICE CPX. LA MEDIDA EN CADA PUNTO CORRESPONDE A LA MEDIA DE DOS MICRÓFONOS POR LAS DOS RODADAS DURANTE 3 PASADAS. SE PRESENTA EN CADA PUNTO TAMBIÉN LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR.

Aunque todavía no se ha cerrado el aspecto relativo a la variabilidad de la medida, se están barajando en las futuras normativas de producto valores de  $\pm 0.5$  dB para los tramos realizados para etiquetar un producto (200m) o de  $\pm 1$  dB para la conformidad de producción de un tramo.

Sin embargo, si se evalúa la atenuación a partir de un método SPB, se obtiene una visión real de la efectividad de la medida seleccionada tomando como referencia la zona donde se ha aplicado y el tráfico real. Muchas veces debido a una mala planificación donde no se ha realizado un correcto diagnóstico, aun habiendo ejecutado un buen pavimento sono-reductor con buena atenuación comprobada con el método CPX, la población no es capaz de contrastar las atenuaciones acústicas ya que existen otras fuentes acústicas sobre las que el pavimento no trabaja (motor, aerodinámica, otros medios o fuentes de ruido). La atenuación acústica evaluada con el método SPB viene a refrendar de manera más global la reducción de la contaminación acústica en la zona.

## SPB-A-376



MEDIDA DEL ÍNDICE SPB PARA VEHÍCULOS LIGEROS CONSIDERANDO LA VARIANTE BACKING BOARD.

Otro aspecto a tener en cuenta en la evaluación de la atenuación acústica es el momento de su realización. Las normativas que se están preparando recomiendan que los ensayos para establecer el primer valor debería ser un mes después de su puesta en obra y cuando haya circulado por ella el tráfico normal.

### 3.3. EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LA PRESTACIÓN ACÚSTICA

Un aspecto que cada vez se está controlando con mayor detalle es la evaluación de la durabilidad de la prestación acústica, sobre todo porque en el inicio de los pavimentos sono-reductores se ha apostado por conseguir grandes atenuaciones nada más finalizar la puesta en obra. Potenciar estas prestaciones acústicas a veces iba en detrimento de la integridad estructural del firme. También las soluciones basadas en mezclas abiertas se colmataban al poco de estar funcionando, perdiendo las prestaciones iniciales conseguidas. En función del objetivo que se persiga, bien esté orientado a evaluar la atenuación acústica de un pavimento sono-reductor, bien se esté evaluando la reducción de la contaminación acústica en un determinado punto conflictivo, se podrá decidir por uno de los dos o los dos métodos anteriormente explicados.

Para chequear la durabilidad de la prestación se están evaluando las atenuaciones a lo largo del tiempo de manera que se pueda ver su evolución temporal. No existe todavía una recomendación clara en la normativa internacional de cada cuanto tiempo se deberían hacer esas evaluaciones. Como una primera tentativa, y en base a los resultados obtenidos en este proyecto, se está considerando que en el tema de etiquetado de un nuevo pavimento del cual se desee evaluar la durabilidad de su atenuación, esta se evalúe al menos dos veces al año durante la mitad de su vida efectiva. En climas con oscilaciones térmicas importantes se recomienda que se elija una estación cálida y otra fría.

Si lo que se está evaluando es un caso particular (conformidad de producción) de un tramo concreto, se recomienda que la evaluación sea anualmente al menos durante la mitad de su vida efectiva.

Se considera que la prestación acústica conseguida queda fuera de servicio cuando se reduzca en 3 dB respecto de la solución original. En ese momento se podrá seguir usando el pavimento, pero rebajando su prestación acústica inicial. En caso contrario, se entiende que el tramo debería ser repavimentado con un pavimento equivalente.

RECOMENDACIONES  
TÉCNICAS PARA EL DISEÑO Y  
PUESTA EN OBRA DE  
MEZCLAS SONO-REDUCTORAS





## 4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES MEZCLAS TIPO SMA

Las mezclas tipo SMA presentan un esqueleto mineral de elevado rozamiento interno, un alto contenido de mástico rico en ligante y la presencia de un aditivo estabilizante, que reparte y evita el escurrimiento del ligante. El esqueleto mineral lo proporciona una granulometría discontinua con un alto porcentaje de áridos gruesos (>70%), lo que posibilita ese contacto directo árido-árido. Asimismo, se requiere un bajo porcentaje de la fracción fina del árido grueso. Las características del esqueleto mineral se deben al contacto árido-árido, generando un buen rozamiento interno, lo que proporciona una buena resistencia a las sollicitaciones de carga del tráfico y una elevada resistencia frente a la deformación plástica. Otra de las características de este tipo de mezcla corresponde a la incorporación de ligante, en el rango del 6-7,5% en masa total de la mezcla. Éste forma una película gruesa y homogénea alrededor de los áridos y, para prevenir su escurrimiento, se adicionan fibras que pueden ser de diferente naturaleza.

Por otro lado, la composición característica de las mezclas SMA proporciona propiedades como: estabilidad al paso del tráfico pesado, durabilidad por el elevado contenido de ligante, así como mayor cohesión de la mezcla, resistencia al deslizamiento, gracias a la macrotextura que queda en la superficie del firme proporcionada por la granulometría discontinua y mejor confort para los usuarios por la reducción del ruido de rodadura por una macrotextura negativa proporcionada por el esqueleto mineral.

A continuación, en los apartados siguientes se presentan las características de las mezclas LIFE-SOUNDLESS.

## 4.2. DEFINICIÓN MEZCLAS SONO-REDUCTORAS TIPO LIFE SOUNDLESS

A efectos de aplicación de estas Recomendaciones, se definen como mezclas sono-reductoras tipo LIFE-SOUNDLESS aquellas mezclas bituminosas de tamaño nominal 8 mm, con granulometría discontinua tipo SMA y con incorporación de aditivos estabilizantes procedentes de residuos de otras industrias.

La ejecución de estas mezclas bituminosas sono-reductoras incluye las siguientes operaciones:

- Estudio de los materiales constituyentes.

- Verificación de las instalaciones de producción.
- Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.
- Fabricación de la mezcla de acuerdo con la fórmula de trabajo.
- Transporte de la mezcla al lugar de empleo.
- Preparación de la superficie que va a recibir la mezcla.
- Extensión y compactación de la mezcla.

### 4.3. ADITIVOS EN LAS MEZCLAS SONO-REDUCTORAS

Todas las mezclas sono-reductoras desarrolladas en el Proyecto LIFE-SOUNDLESS incorporan como aditivo estabilizante productos procedentes de residuos de otras industrias (polvo de caucho y nylon procedentes de Neumático Fuera de Uso o residuos plásticos), lo que permite envolver los áridos con películas más gruesas de betún sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones.

Además, estas adiciones modifican la rigidez dinámica de las mezclas y por tanto influyen en la excitación del neumático al golpear con el pavimento bituminoso.

El sistema de incorporación de los aditivos a la mezcla se realiza por la denominada vía seca: el aditivo se incorpora directamente al mezclador de la planta de asfalto en la fase de aporte de los áridos y previamente al aporte de betún. Esta dosificación debe hacerse preferiblemente con sistemas de dosificación automático integrados en el software de la planta asfáltica.

Aunque en estas Recomendaciones se presentan las características de los tres tipos de aditivos empleados en el Proyecto LIFE-SOUNDLESS, a raíz de la experiencia obtenida se recomienda el empleo del aditivo polvo de caucho en tanto en cuanto los suministradores del resto de productos procedentes del reciclado de residuos (plásticos y fibras de nylon), no garanticen una homogeneidad y garantía del suministro en cuanto a limpieza del producto, tamaño y precio. En España, la industria del polvo de caucho procedente del reciclaje de neumáticos fuera de uso ha alcanzado un nivel óptimo de desarrollo que garantiza una calidad y homogeneidad del producto apta para su uso en mezclas bituminosas.

## 4.4. MATERIALES

No podrán emplearse materiales que no dispongan del marcado CE según el Reglamento (UE) n° 305/2011. Para el control de procedencia de los materiales, se llevará a cabo la verificación documental de que los valores declarados en los documentos que acompañan al marcado CE cumplen las especificaciones establecidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (en adelante PG-3<sup>[6]</sup>).

Los áridos se producirán o suministrarán en fracciones granulométricas diferenciadas, que se acopiarán y manejarán por separado hasta su introducción en las tolvas en frío.

Los áridos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en la zona de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras u otras capas del firme, o contaminar corrientes de agua.

### 4.4.1. LIGANTE HIDROCARBONADO

El ligante hidrocarbonado deberá cumplir las especificaciones establecidas en el artículo 211 del PG-3, para el betún 50/70 (Tabla 6).

CARACTERISTICAS		UNE-EN	UNE-EN	50/70
PENETRACIÓN A 25°C		1426	0,1 mm	50/70
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO		1427	° C	46-54
RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO UNE-EN 12607-1	CAMBIO DE MASA	12607-1	%	≤ 0,5
	PENETRACIÓN RETENIDA	1426	%	≥ 53
	INCREMENTO PUNTO REBLANDECIMIENTO	1427	° C	≤ 10
INDICE DE PENETRACIÓN		12591 13924 ANEXO A<		De -1,5 a 0,7
PUNTO DE FRAGILIDAD FRAASS		12593	° C	≤ -8
PUNTO DE INFLAMACIÓN EN VASO ABIERTO		ISO 2592	° C	≥ 230
SOLUBILIDAD		12592	%	≥ 99,0

TABLA 6. REQUISITOS DEL BETÚN ASFÁLTICO CONVENCIONAL 50/70

### 4.4.2. ÁRIDO GRUESO

#### a) Angulosidad

La proporción de partículas total y parcialmente trituradas del árido grueso, según la UNE-EN 933-5, deberá cumplir lo fijado en la Tabla 7.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 A T31	T32 Y ARCENES	T4
100	≥90	≥75

TABLA 7. PROPORCIÓN DE PARTÍCULAS TRITURADAS DEL ÁRIDOS GRUESO (% EN MASA)

Adicionalmente, la proporción de partículas totalmente redondeadas del árido grueso, según la UNE-EN 933-5, deberá cumplir lo fijado en la Tabla 8.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 A T31	T32 Y ARCENES	T4
0	≤1	≤10

TABLA 8. PROPORCIÓN DE PARTÍCULAS TOTALMENTE REDONDEADAS (% EN MASA)

#### b) Forma del árido (Índice de lajas)

El índice de lajas de las distintas fracciones del árido grueso, según la UNE-EN 933-3, deberá cumplir lo fijado en la Tabla 9.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 A T31	T32 Y ARCENES	T4
≤20	≤20	

TABLA 9. ÍNDICE DE LAJAS DEL ÁRIDOS GRUESO

*c) Resistencia a la fragmentación (Coeficiente de los Angeles)*

El coeficiente de Los Ángeles del árido grueso, según la UNE-EN 1097-2, deberá cumplir lo fijado en la Tabla 10.

TIPO DE CAPA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
	T00 A T0	T1 Y T2	T3 Y ARCENES	T4
RODADURA	≤ 15	≤ 20	≤ 25	

TABLA 10. COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES

*d) Resistencia al pulimento (Coeficiente de pulimento acelerado)*

El coeficiente de pulimento acelerado del árido grueso, según la UNE-EN 1097-8, deberá cumplir lo fijado en la Tabla 11.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 A T0	T1 Y T31	T32 Y ARCENES
≥ 56	≥ 50	≥ 44

TABLA 11. COEFICIENTE DE PULIMENTO ACELERADO

*e) Limpieza (Contenido de impurezas)*

El árido grueso deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa.

El contenido de finos del árido grueso, determinado conforme la UNE-EN 933-1 como porcentaje que pasa el tamiz 0,063 mm, será inferior al cinco por mil (0,5%) en masa. Adicionalmente el Pliego de Prescripciones Técnicas o en su defecto el Director de las Obras podrá especificar el contenido de impurezas del árido grueso, según el anexo C de la UNE 146130, al cinco por mil (0,5%) en masa.

En el caso de que no se cumplan las prescripciones establecidas respecto a la limpieza del árido grueso, el Director de las Obras podrá exigir su limpieza por lavado, aspiración u otros métodos previamente aprobados y una nueva comprobación.

### 4.4.3. ÁRIDO FINO

#### a) Limpieza

El árido fino deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa.

#### b) Resistencia a la fragmentación

El material que se triture para obtener árido fino deberá cumplir las condiciones exigidas al árido grueso en la Tabla 10. Coeficiente de los Ángeles.

Se podrá emplear árido fino de otra naturaleza que mejore alguna característica, en especial la adhesividad, pero en cualquier caso procederá de árido grueso con coeficiente de Los Ángeles inferior a veinticinco (25).

### 4.4.4. POLVO MINERAL

El polvo mineral podrá proceder de los áridos, separándose de ellos por extracción en la central de fabricación (polvo mineral de recuperación), o bien aportarse a la mezcla por separado de aquellos, como un producto comercial o especialmente preparado.

La proporción del polvo mineral de aportación a emplear en la mezcla deberá cumplir lo fijado en la Tabla 12.

#### b) Resistencia a la fragmentación

El material que se triture para obtener árido fino deberá cumplir las condiciones exigidas al árido grueso en la Tabla 10. Coeficiente de los Ángeles.

Se podrá emplear árido fino de otra naturaleza que mejore alguna característica, en especial la adhesividad, pero en cualquier caso procederá de árido grueso con coeficiente de Los Ángeles inferior a veinticinco (25).

TIPO DE CAPA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00	T0 Y T1	T2	T3 Y ARCENES	T4
RODADURA	100			≥ 50	

TABLA 12. PROPORCIÓN DE POLVO MINERAL DE APORTACIÓN (% EN MASA DEL RESTO DEL POLVO MINERAL, EXCLUIDO EL INEVITABLEMENTE ADHERIDO A LOS ÁRIDOS)

El polvo mineral que quede inevitablemente adherido a los áridos tras su paso por el secador en ningún caso podrá rebasar el dos por ciento (2%) de la masa de la mezcla. Sólo si se asegurase que el polvo mineral de recuperación cumple las condiciones exigidas al de aportación, el Director de las Obras podrá rebajar la proporción mínima de éste. En este caso, el polvo mineral de recuperación debe estar en posesión del Mercado CE.

#### a) Granulometría del polvo mineral

La granulometría del polvo mineral se determinará según UNE-EN 933-10. El cien por cien (100%) de los resultados de análisis granulométricos deben quedar dentro del huso granulométrico general definido en la Tabla 13.

ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	HUSO GRANULOMÉTRICO GENERAL PARA RESULTADOS INDIVIDUALES (% EN MASA)	ANCHO MÁXIMO DEL HUSO RESTRINGIDO (% EN MASA)
2	100	
0,125	85 a 100	10
0,063	70 a 100	10

TABLA 13. ESPECIFICACIONES PARA LA GRANULOMETRÍA DEL POLVO MINERAL

Adicionalmente, el noventa por cien (90%) de los resultados de análisis granulométricos basados en los últimos veinte (20) valores obtenidos, deben quedar incluidos dentro de un huso granulométrico más estrecho, cuyo ancho máximo en los tamices correspondientes a 0,125 y 0,063 mm no supere el diez por ciento (10%).

#### b) Finura y actividad del polvo mineral

La densidad aparente del polvo mineral, según el anexo A de la norma UNE-EN 1097-3, deberá estar comprendida entre cinco y ocho decigramos por centímetro cúbico (0,5 a 0,8 g/cm<sup>3</sup>).

### 4.4.5. ADITIVOS

Los aditivos que se emplean en las mezclas sono-reductoras tipo LIFE-SOUNDLESS tienen dos funciones:

- Actuar como agentes estabilizantes para evitar problemas de escurrimiento del ligante y de segregación durante el almacenamiento, transporte y extendido de la mezcla bituminosa.

- Modificar la rigidez dinámica de la mezcla bituminosa disminuyendo su módulo y por tanto reduciendo la agresividad con la que el pavimento excita la rueda y, por tanto, la generación de ruido.

#### 4.4.5.1. Polvo de caucho

El polvo de caucho que se empleará en las mezclas sono-reductoras será de tamaño máximo 0,6 mm y tendrá que cumplir las especificaciones establecidas en el Anejo 2 del Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas del CEDEX (en adelante Manual NFU) en cuanto a las siguientes propiedades:

- Procedencia.
- Composición química.
- Características físicas: densidad relativa, contenido de agua y granulometría.
- Contenido de impurezas (materiales ferromagnéticos, textiles y otras como arena, madera, etc).

Cada partida vendrá acompañada de una hoja de características, en la que constarán al menos los siguientes datos:

- Composición química.
- Granulometría media del triturado.
- Contenido de humedad.
- Contenido de partículas metálicas.
- Contenido de fibras.
- Contenido de otros contaminantes.

#### 4.4.5.2. Fibras de Nylon

Las fibras de nylon que se emplearán en las mezclas sono-reductoras procederán de la trituración de neumáticos fuera de uso. Dada la heterogeneidad en el suministro de este residuo, se debe garantizar por el suministrador que las características de las fibras de nylon en cuanto a: longitud de la fibra y contenido de caucho se man-

tengan desde la fase de la elaboración de la fórmula de trabajo y durante todo el suministro de la obra. El suministrador debe proporcionar una hoja de características en la que constarán al menos, los siguientes datos:

- Composición química.
- Longitud media de la fibra.
- Contenido de humedad.
- Contenido de partículas metálicas.
- Contenido de residuo de caucho.

Se debe evitar el empleo de fibras de nylon que tiendan a formar madejas excesivas, ya que esto puede dificultar una homogénea distribución de este aditivo durante el proceso de fabricación de la mezcla y originar apelmazamientos de material durante el proceso de extendido de la mezcla bituminosa.

#### 4.4.5.3. Polímeros Plásticos

Los polímeros plásticos que se emplearán en las mezclas sono-reductoras provendrán preferiblemente del reciclado de residuos plásticos de invernaderos. Estos residuos deberán venir caracterizados mediante un análisis termogravimétrico y calorimétrico con el fin de detectar diferentes tipos poliméricos en el residuo. Se recomienda el empleo de residuos correspondientes a polietilenos de baja densidad (LDPE).

El suministrador debe proporcionar una hoja de características en la que constarán al menos, los siguientes datos:

- Composición química.
- Densidad.
- Granulometría.
- Contenido de humedad.
- Temperaturas de fusión y cristalización.

Los residuos plásticos deben estar exentos de toda impureza (tierra u otras materias extrañas).

## 4.5. TIPO Y COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

La designación de las mezclas sono-reductoras tipo LIFE SOUNDLESS seguirá el esquema siguiente:

SMA	8	SURF	50/70	Dotación y tipo de ADITIVO
-----	---	------	-------	----------------------------

Ejemplo:

- SMA 8 SURF 50/70 1,5 NFU.
- SMA 8 SURF 50/70 1 PLÁSTICO.
- SMA 8 SURF 50/70 0,5 NYLON.

La granulometría del árido combinado según UNE-EN 933-1 deberá estar comprendido dentro del huso de la Tabla 14:

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES (MM)					
	11,2	8	4	2	0.5	0.063
SMA 8	100	90-100	23-43	20-35	9-24	5-9

TABLA 14. HUSO GRANULOMÉTRICO. CERNIDO ACUMULADO (% EN MASA)

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el espesor de la capa del firme y la dotación mínima de ligante hidrocarbonado de la mezcla bituminosa en caliente, que en cualquier caso deberá cumplir lo indicado en la Tabla 15.

TIPO DE MEZCLA	ESPESOR (MM)	DOTACIÓN (% M/SM) Y TIPO DE ADITIVO	CONTENIDO MÍNIMO DE LIGANTE (%M/SM)
SMA 8	2-4	1,5 NFU	6,5
		1 NFU	6,0
		1 PLASTICO	5,8
		0,5 PLASTICO + 0,5 NFU	5,8
		0,5 NYLON	5,8

TABLA 15. DOTACIÓN, TIPO DE ADITIVO Y CONTENIDO MÍNIMO DE LIGANTE

En el caso de que la densidad de los áridos sea diferente de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, los contenidos mínimos de ligante de la Tabla 15 se deben corregir multiplicando por el factor:

$$\alpha = 2,65 / \rho_d$$

donde  $\rho_d$  es la densidad de las partículas del árido.

Salvo justificación en contrario, la relación ponderal recomendable entre los contenidos de polvo mineral y ligante hidrocarbonado (expresados ambos respecto a la masa total de árido seco, incluido el polvo mineral) determinada en la fórmula de trabajo, deberá estar comprendida entre doce y dieciséis décimas (1,2 a 1,6).

## 4.6. EQUIPO NECESARIO PARA LA EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

### 4.6.1. CENTRAL DE FABRICACIÓN

Las mezclas bituminosas en caliente se fabricarán por medio de centrales, capaces de manejar simultáneamente en frío el número de fracciones del árido que exija la fórmula de trabajo adoptada.

El número mínimo de tolvas para áridos en frío será función del número de fracciones de árido que exija la fórmula de trabajo adoptada.

La central deberá tener sistemas separados de almacenamiento y dosificación del polvo mineral recuperado y de aportación, los cuales deberán ser independientes de los correspondientes al resto de los áridos, y estar protegidos de la humedad.

La incorporación de aditivos estabilizantes a la mezcla se realizará directamente al mezclador mediante dispositivos adecuados para poder dosificarlos con precisión suficiente. Esta incorporación debe hacerse previamente a la inyección de betún y deberá establecerse un tiempo adicional de preamasado con los áridos en caliente para favorecer la dispersión correcta de estos aditivos (en torno al 10% del tiempo de mezcla en húmedo).

### 4.6.2. ELEMENTOS DE TRANSPORTE

Consistirán en camiones de caja lisa y estanca, perfectamente limpia y que se tratará, para evitar que la mezcla bituminosa se adhiera a ella, con un producto antiadherente que no sea perjudicial ni para la mezcla bituminosa ni para el medio ambiente. No se permitirá en ningún caso el empleo de productos derivados de la destilación del petróleo.

La forma y altura de la caja deberá ser tal que, durante el vertido en la extendedora, el camión sólo toque a ésta a través de los rodillos previstos al efecto.

Los camiones deberán siempre estar provistos de una lona o cobertor adecuado para proteger la mezcla bituminosa en caliente durante su transporte.

#### 4.6.3. EQUIPO DE EXTENDIDO

Las extendedoras serán autopropulsadas, y estarán dotadas de los dispositivos necesarios para extender la mezcla bituminosa en caliente con la configuración deseada y un mínimo de pre-compactación. La capacidad de sus elementos, así como su potencia, serán adecuadas al trabajo a realizar.

La extendedora deberá estar dotada de un dispositivo automático de nivelación y de un elemento calefactor para la ejecución de la junta longitudinal.

Si a la extendedora se pueden acoplar elementos para aumentar su anchura, éstos deberán quedar perfectamente alineados con los de aquélla y conseguir una mezcla continua y uniforme.

#### 4.6.4. EQUIPO DE COMPACTACIÓN

Se utilizarán preferentemente compactadores de rodillos metálicos que deberán ser autopropulsados, tener inversores de sentido de marcha de acción suave, y estar dotados de dispositivos para la limpieza de sus llantas durante la compactación y para mantenerlos húmedos en caso necesario. Las llantas metálicas de los compactadores no presentarán surcos ni irregularidades en ellas.

Las presiones de contacto, estáticas o dinámicas, de los compactadores deberán ser las necesarias para conseguir una compacidad adecuada y homogénea de la mezcla en todo su espesor, sin producir roturas del árido, ni arrollamientos de la mezcla a la temperatura de compactación.

### 4.7. ESTUDIO DE LA MEZCLA Y OBTENCIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO

La fabricación y puesta en obra de la mezcla no se iniciará hasta que se haya aprobado por el Director de las Obras la correspondiente fórmula de trabajo, estudiada en el laboratorio y verificada en la central de fabricación.

### 4.7.1. ASPECTOS GENERALES

Como mínimo se debe fijar las siguientes características:

- Identificación y proporción de cada fracción del árido en la alimentación y, en su caso, después de su clasificación en caliente.
- Granulometría del árido combinado incluido el polvo mineral por los tamices: 11,2; 8; 4; 2; 0,5 y 0 063 mm, expresada en porcentaje del árido total con una aproximación del uno por ciento (1%), con excepción del tamiz 0,063 que se expresará con una aproximación del uno por mil (0,1%).
- Identificación y dosificación de ligante hidrocarbonado referida a la masa total de la mezcla.
- Tipo y dotación del aditivo estabilizante, referido a la masa de la mezcla total.
- Densidad mínima a alcanzar.

También se debe señalar:

- Los tiempos de mezclado de los áridos en seco y para la mezcla de los áridos con el ligante.
- Las temperaturas máxima y mínima de calentamiento previo de los áridos y ligante.
- La temperatura de la mezcla al salir del mezclador, que no podrá ser superior a 180°C, aconsejándose que esté comprendida entre 170 y 175°C.
- La temperatura mínima de la mezcla en la descarga desde los elementos de transporte y a la salida de la extendedora, que en ningún caso será inferior a 145°C.
- La temperatura mínima de la mezcla al iniciar y terminar la compactación.
- Las prescripciones necesarias sobre la forma de incorporación y tiempo de mezclado del aditivo estabilizante para asegurar la completa dispersión del aditivo en la mezcla, estableciendo el tiempo de amasada en seco con los áridos antes de incorporar el ligante. Indicar también los tiempos estimados de amasada.

### 4.7.2. CONTENIDO DE HUECOS

El contenido de huecos en mezcla, determinado según el método de ensayo de la UNE-EN 12697-8 indicado en el anexo B de la UNE-EN 13108-20, no deberá ser inferior al 10% ( $\geq 10\%$ ).

Para la realización del ensayo se emplearán probetas compactadas según la UNE-EN 12697-30, aplicando cincuenta (50) golpes por cara.

### 4.7.3. RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

La resistencia a las deformaciones plásticas determinada mediante el ensayo en pista de laboratorio deberá cumplir lo establecido en la Tabla 16 para capa de rodadura. Este ensayo se hará según la UNE-EN 12697-22, empleando el dispositivo pequeño, el procedimiento B en aire, a una temperatura de sesenta grados Celsius (60 °C) y con una duración de diez mil (10.000) ciclos. Las probetas se prepararán mediante compactador de placa, con el dispositivo de rodillo de acero, según la UNE-EN 12697-33, con una densidad superior al noventa y ocho por ciento (98%) de la obtenida en probetas cilíndricas preparadas según la UNE-EN 12697-30 aplicando cincuenta (50) golpes por cara.

TIPO DE CAPA	ZONA TERMICA ESTIVAL	CATEGORIA DE TRAFICO		
		T00 A T1	T2	T3, T4 Y ARCENES
RODADURA	CÁLIDA Y MEDIA	0,07		
	TEMPLADA	0,07	0,10	

TABLA 16. PENDIENTE MEDIA DE DEFORMACIÓN EN PISTA EN EL INTERVALO DE 5000 A 10000CICLOS (MM PARA 103 CICLOS D CARGA)

### 4.7.4. SENSIBILIDAD AL AGUA

En cualquier circunstancia se comprobará la adhesividad árido-ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Para ello, la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión realizado a quince grados Celsius (15° C), según la UNE-EN 12697-12, tendrá un valor mínimo del noventa por ciento (90%)

para capas de rodadura. Las probetas se compactarán según la UNE-EN 12697-30, aplicando cincuenta (50) golpes por cara.

Se podrá mejorar la adhesividad entre el árido y el ligante hidrocarbonado mediante activantes directamente incorporados al ligante.

#### 4.7.5. ESCURRIMIENTO DEL LIGANTE

Deberá comprobarse que el escurrimiento del ligante determinado mediante el método de Schelleberg, recogido en la UNE-EN 12697-18, es inferior al tres por mil (0,3%).

## 4.8. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

---

Será de aplicación en estas Recomendaciones lo establecido en los siguientes apartados del artículo 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3):

- Apartado 543.5.2: Preparación de la superficie existente.
- Apartado 543.5.3: Aprovisionamiento de áridos.
- Apartado 543.5.4: Fabricación de la mezcla.
- Apartado 543.5.5: Transporte.
- Apartado 543.5.6: Extensión.
- Apartado 543.5.7: Compactación.
- Apartado 543.5.8: Juntas transversales y longitudinales.
- Apartado 543.6: Tramo de Prueba.
- Apartado 543.8: Limitaciones de la ejecución.

## 4.9. ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD TERMINADA

### 4.9.1. DENSIDAD

La densidad no deberá ser inferior al 97% de la densidad de referencia. La densidad de referencia para la compactación se obtendrá según lo indicado en el apartado 543.9.3.2.1 del PG-3.

### 4.9.2. RASANTE, ESPESOR Y ANCHURA

Será de aplicación en estas Recomendaciones lo especificado en el apartado 543.7.2 del PG-3.

### 4.9.3. REGULARIDAD SUPERFICIAL

Será de aplicación en estas Recomendaciones lo especificado en el apartado 543.7.2 del PG-3. No obstante, hay que tener en cuenta que, en zonas urbanas con presencia de pozos de registro, puede no resultar de aplicación lo requerido en el PG-3, debido a que esos elementos afectan negativamente a la regularidad superficial.

### 4.9.4. MACROTEXTURA SUPERFICIAL

La superficie de la capa deberá presentar una textura homogénea, uniforme y exenta de segregaciones.

La macrotextura superficial, obtenida mediante el método volumétrico (norma UNE-EN 13036-1), antes de la puesta en servicio de la capa, en cinco (5) puntos del lote aleatoriamente elegidos de forma que haya al menos uno por hectómetro (1/hm), no deberá ser inferior a los valores indicados en la Tabla 17.

CARACTERISTICA	EXIGENCIA
MACROTEXTURA SUPERFICIAL Valor mínimo (mm)	0,9

TABLA 17. MACROTEXTURA SUPERFICIAL

## 4.10. CONTROL DE CALIDAD

---

### 4.10.1. CONTROL DE PROCEDENCIA Y CALIDAD DE LOS MATERIALES

Para el control de procedencia de los áridos, polvo mineral de aportación y ligante hidrocarbonado se estará a lo indicado en los apartados 543.9.1 y 543.9.2 del PG-3.

Los productos no sometidos al Mercado CE (aditivos) se controlarán mediante los albaranes de entrega de material, debiendo exigir también al suministrador las fichas de características según lo indicado en el apartado 4.4.5 de este documento. En el caso del polvo de caucho NFU se comprobará en la recepción la granulometría (UNE-EN 933-10).

### 4.10.2. CONTROL DE EJECUCIÓN

Para el control de ejecución de las mezclas sono-reductoras (fabricación y puesta en obra) se aplicará lo establecido en el apartado 543.9.3 del PG-3.

## 4.11. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO

---

Es de aplicación lo establecido en el apartado 543.10 del PG-3 para las mezclas discontinuas BBTM A.

## 4.12. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO

---

Es de aplicación lo establecido en el apartado 543.11 del PG-3.



05

REFERENCIAS





- [1] Organización Mundial de la Salud y Comisión Europea. “Burden of disease from environmental noise”. WHO Regional Office for Europe. [http://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/e94888/en/](http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888/en/). 2011.
- [2] EBoDE Project. Environmental Burden of Disease- European countries. <http://en.opasnet.org/w/EBoDE>.
- [3] Norma ISO/CD 11819-2 “Acoustics. Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise. Part 2: The close-proximity method”. 2017.
- [4] Norma ISO 11819-1. “Preview Acoustics. Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise. Part 1: Statistical Pass-By method”. 1997.
- [5] Proyecto SMA. “Propuesta de Normativa SMA para España”. <http://www.proyectos-ma.eu>. 2012.
- [6] Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Orden FOM/2523/2014 de 12 de diciembre.
- [7] Haider, M.; Sandberg U. Noise classification methods for urban road surfaces. User manual: Measurement methods – Proyecto Europeo SILENCE (Sustainable development, global change & ecosystems integrated project). Febrero 2006.



# 06

## ANEXO: MÉTODOS DE MEDIDA DE LAS PRESTACIONES ACÚSTICAS





Las prestaciones acústicas de un pavimento se pueden medir utilizando varios métodos como son: el método de proximidad o método CPX, y el método estadístico o SPB. No son métodos excluyentes ya que cada uno aporta una serie de ventajas e información que puede ser muy necesaria.

## 6.1. MÉTODO DE PROXIMIDAD (MÉTODO CPX)

Este ensayo permite la medida de ruido de rodadura, y está definido por la norma internacional ISO 11819-2<sup>[3]</sup>. El método CPX está diseñado para evaluar las propiedades acústicas de las superficies de carretera mediante la medición del ruido de rodadura utilizando unos neumáticos de referencia, montados sobre un vehículo de ensayo o remolque homologado, en dos posiciones de micrófono ubicadas en las proximidades del contacto neumático/carretera.



ENSAYO CPX CON VEHÍCULO AUTOPROPULSADO.  
FUENTE: FUNDACIÓN CIDAUT.



ENSAYO CPX CON TRAILER. FUENTE: CEDEX.

Las ventajas principales de este método de ensayo son que las medidas se pueden tomar en localizaciones arbitrarias y de forma continua a lo largo de secciones de carretera, por eso este ensayo es una opción adecuada para la conformidad de producción y la evaluación acústica de asfaltos y neumáticos. También este procedimiento se puede utilizar para comprobar el estado de mantenimiento de los asfaltos, por ejemplo, el daño de la superficie, así como la limpieza de los asfaltos porosos.

El método CPX es menos sensible a las condiciones de contorno que otros métodos. Los ensayos se pueden realizar desde situaciones sin tráfico hasta situaciones de tráfico denso (aunque con velocidades de conducción estable), obteniéndose datos relevantes sobre toda la longitud de la superficie de carretera objeto de investigación.

En el método de proximidad o método CPX, los niveles promedio de presión sonora ponderada A emitidos por dos neumáticos de referencia se miden en una posición

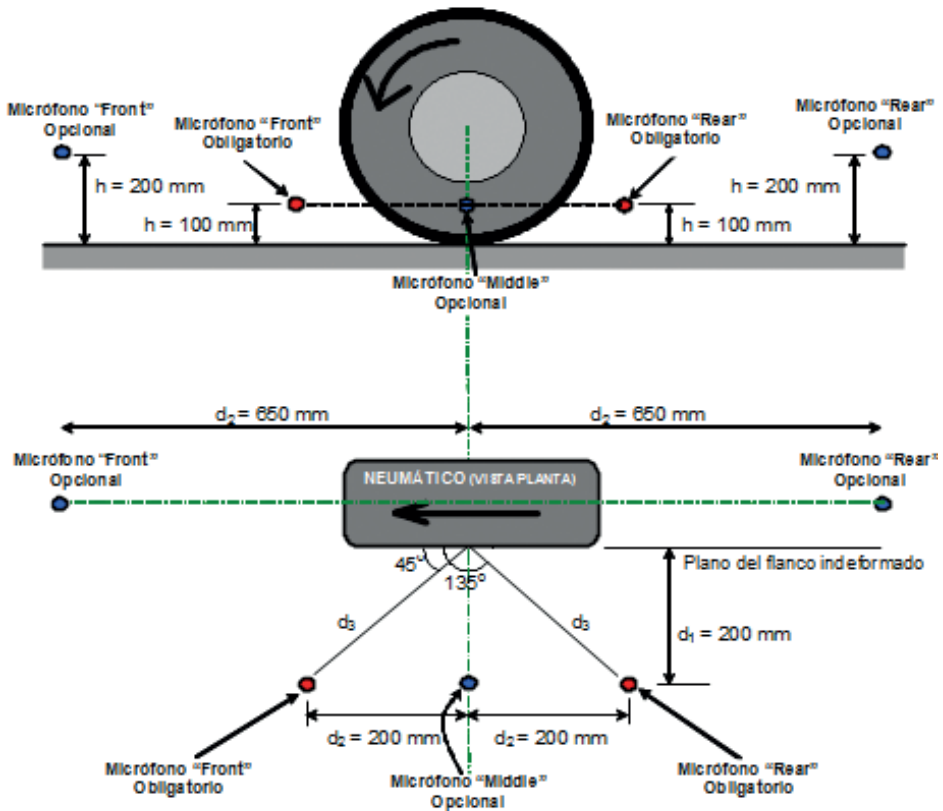
Con este fin, es necesario disponer de un vehículo de ensayo sobre el que están montados los neumáticos de referencia. Dicho vehículo de ensayo puede ser un vehículo autopulsado especialmente diseñado o un remolque que es remolcado por otro vehículo sobre la superficie de prueba. Idealmente, el remolque o sistema de vehículo tiene que cumplir con el requisito de que la influencia del ruido de fondo y la construcción del vehículo no deberán influir en el nivel de ruido medido en las posiciones de micrófono definidas en más de 1 dB. Se han definido factores de corrección para contrarrestar los efectos relacionados con el diseño del vehículo que afectan a los resultados de medición hasta un máximo de 3 dB.

Los ensayos se realizan con el objeto de determinar el “Nivel de Ruido de Rodadura”, a las velocidades de referencia (50 km/h, 80 km/h y 110 km/h), por lo tanto, los neumáticos ruedan libremente a velocidad constante sobre la superficie de carretera.

Para cada neumático de referencia y cada test individual con ese neumático, se registran los niveles de ruido promedio de los dos micrófonos durante la medición de distancias cortas (segmentos de 20 m cada uno), junto con las correspondientes velocidades del vehículo. El nivel sonoro de cada segmento se normaliza a la velocidad de referencia mediante un simple procedimiento de corrección. Para obtener resultados fiables el promedio se realice en al menos 200 m de longitud de superficie, ya sea con dos repeticiones en secciones de 100 m o diez repeticiones en secciones de 20 m. El nivel sonoro promedio resultado de los dos micrófonos obligatorios a la velocidad de referencia se denomina “Nivel de Ruido de Rodadura”.

A efectos de presentación de las características acústicas de la calzada, opcionalmente, los niveles de ruido de rodadura para los neumáticos de referencia seleccionados se pueden promediar para proporcionar un índice único. Este índice se denomina “Close-Proximity Sound Index (CPXI)” y se puede utilizar para la comparación de superficies de carretera.

La norma ISO 11819-2<sup>[3]</sup> especifica un mínimo de dos posiciones de micrófono en las cuales se debe medir el ruido. Los micrófonos se deben colocar a 100 mm ( $\pm$  20 mm) respecto del suelo y a 200 mm ( $\pm$  20 mm) del flanco del neumático de referencia. El micrófono delantero se debe montar con un ángulo de 45° respecto de la dirección de rodadura del neumático, mientras que el micrófono trasero está situado a 135° de la dirección de rodadura. Para medir la velocidad de rotación de los neumáticos del vehículo se puede utilizar un encoder o un sistema GPS con la precisión suficiente para medir la velocidad con un 1%. Así es posible correlacionar los niveles de ruido con la velocidad del vehículo de ensayo.



#### POSICIONES DE LOS MICRÓFONOS EN EL ENSAYO CPX.

El procedimiento para la ejecución de las medidas contempla la caracterización de las condiciones ambientales (temperatura ambiental, humedad relativa...), de vehículo y de neumático (presiones de inflado, estado de los neumáticos...).

## 6.2. MÉTODO ESTADÍSTICO DE PASO (MÉTODO SPB).

El método estadístico de paso (SPB, Statistical Pass-By) es un método normalizado que viene recogido en la norma UNE-EN ISO 11819-1<sup>[4]</sup>. El SPB es un método que se ha desarrollado para ser usado con dos propósitos principales:

- Clasificación de superficies, en condiciones aceptables, dentro de una tipología de acuerdo a su influencia en el ruido de tráfico.
- Evaluación de la influencia en el ruido de tráfico de superficies diferentes en lugares específicos con independencia de sus características y edad.

Este método es aplicable a situaciones de tráfico en que la velocidad es constante, y las velocidades promedio de los vehículos en circulación son de 45 km/h y superiores. Para otras condiciones de circulación como son intersecciones, vías con regulación de semáforos, o situaciones de tráfico congestionado, este método no es aplicable para la clasificación de superficies, ya que la contribución de la superficie de carretera es inferior respecto a otras contribuciones como son el grupo motor-propulsor.

Cada vehículo se clasifica dentro de una de las tres categorías mostradas en la Tabla 18. Análogamente se definen tres categorías de velocidad en carretera, según la velocidad de circulación del tráfico. Estas categorías son baja, media y alta, cada una de las cuales lleva asociada una velocidad de referencia y que se muestran en la Tabla 19.

CATEGORÍA 1	COCHES	Coches de pasajeros excluyendo otros vehículos ligeros
CATEGORÍA 2	(A) VEHÍCULOS PESADOS DE DOS EJES	Todos los camiones, autobuses con al menos dos ejes y más de cuatro ruedas.
	(B) VEHÍCULOS PESADOS MULTIEJES	Todos los camiones, autobuses con más de dos ejes

TABLA 18 CLASIFICACIÓN POR CATEGORÍAS DE LOS VEHÍCULOS QUE COMPONEN EL TRÁFICO.

CATEGORÍA DE VELOCIDAD EN CARRETERA	VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN COMPRENDIDA ENTRE	VELOCIDAD DE REFERENCIA ASOCIADA	
		COCHES	VEHÍCULOS PESADOS (DOS EJES Y/O MULTIEJES)
Baja	45- 64 km/h	50 km/h	50 km/h
Media	65-99 km/h	80 km/h	70 km/h
Alta	100 km/h o superior	110 km/h	85 km/h

TABLA 19 CLASIFICACIÓN POR CATEGORÍAS DE LA CARRETERA DE ACUERDO A LA VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN.

Para la realización de la medida de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 11819-1 se coloca un micrófono a 7.5 m de distancia respecto de la línea central del carril. La altura respecto del suelo del micrófono es de 1.2 m, aunque otras alturas de micrófono adicionales y que no están normalizadas, son recomendables. Así por ejemplo en la normativa holandesa, la altura del micrófono está fijada a 4m, con el objetivo de eliminar efectos de propagación no deseados.

Durante cada paso de vehículo acústicamente identificable, se registra el máximo nivel de presión sonora en A (LAmax) usando la ponderación Fast junto con su velocidad de circulación.

Para el análisis de los datos se realiza una regresión lineal entre los valores LAmax de cada vehículo y el logaritmo decimal de la velocidad asociada a dicho vehículo. La regresión lineal se hará para cada categoría de vehículos individualmente, usando el método de mínimos cuadrados. En la figura siguiente se muestra un diagrama típico de resultados para la categoría de vehículos ligeros.

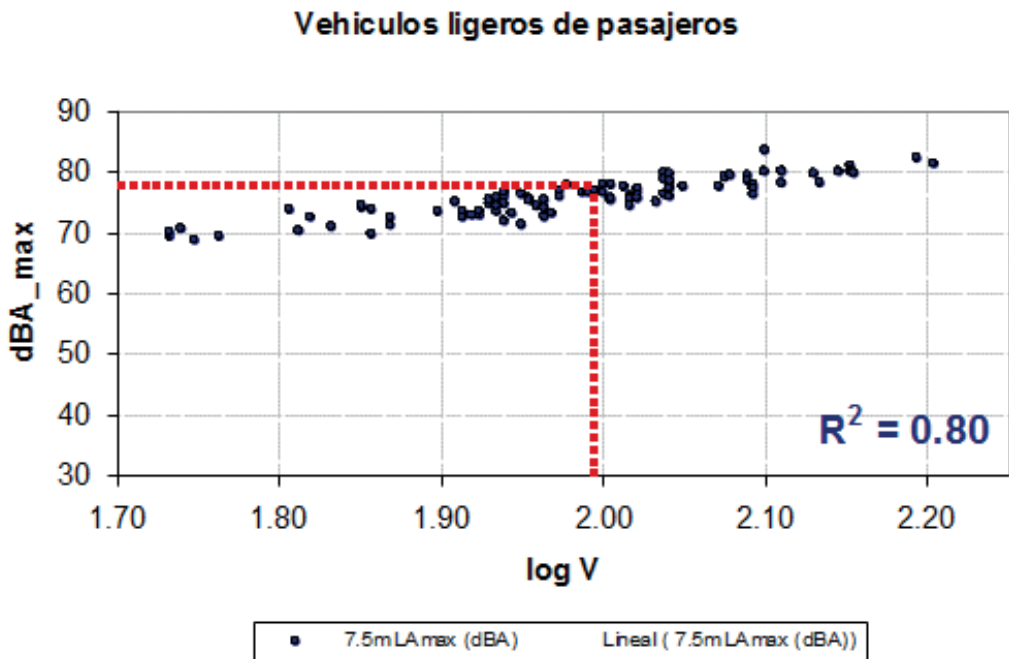


DIAGRAMA DE PUNTOS Y RECTA DE REGRESIÓN RESULTADO DE UN ENSAYO DE SPB. FUENTE: FUNDACIÓN CIDAUT.

A partir de la recta de regresión obtenida para cada categoría de vehículos y para la correspondiente velocidad de referencia para vehículos pesados, y para vehículos ligeros de pasajeros, se adopta como Nivel Sonoro del Vehículo Lveh. El nivel sonoro de vehículo se toma del eje de ordenadas que corresponde a la velocidad de referencia para cada categoría, según la recta de regresión ajustada para cada categoría de vehículos. De esta forma, para un determinado lugar de carretera se obtienen tres valores de Lveh: para coches, vehículos pesados de dos ejes y vehículos pesados multi-ejes. En la actualidad se está evaluando la posibilidad de considerar de manera conjunta todos los vehículos pesados.

Con el fin de obtener el nivel global de la influencia de la superficie de la carretera en el ruido del tráfico para una combinación de vehículos, se debe calcular el Índice Estadístico del Paso (SPBI Statistical Pass By Index) tal y como se define en la norma UNE-EN ISO 11819-1<sup>[4]</sup>. Este índice SPBI es el valor utilizado para la clasificación de la superficie de carretera entre sí.

Son varias las restricciones o limitaciones del método SPB. Una de las más importantes es que solo caracteriza la superficie de pavimento en un punto, por lo que para que los resultados de este ensayo sean representativos de la superficie es necesario verificar que la superficie es homogénea o bien realizar medidas en varios puntos diferentes a lo largo de la carretera.

Otro de las limitaciones del método SPB es que es muy restrictivo en cuanto a la elección del lugar de ensayo. Así por ejemplo establece como requisito que el lugar de la prueba debe extenderse al menos 30 m a ambos lados de la posición del micrófono, incrementándose esta distancia hasta 50 m para la categoría de velocidad en carretera alta. En estos tramos de ensayo la carretera ha de ser recta, plana y sin desnivel (inferior al 1%). Además, el método SPB requiere que en lugar de ensayo se garanticen una serie de condiciones relativas a las condiciones de circulación del tráfico.

Una de las más importantes es asegurar la distancia necesaria entre el paso de dos vehículos, de modo que se cumpla que en los instantes antes y después del paso del vehículo el nivel sonoro haya caído 6 dB(A) respecto al paso del vehículo anterior. Así mismo, la densidad del tráfico debe tener el suficiente número de vehículo de cada una de las categorías para poder realizar el análisis completo, un mínimo de 100 vehículos ligeros, 30 de dos ejes y 30 multi-ejes, siendo la suma de vehículos de dos ejes y multi-ejes 80 como mínimo.

Otro de los requerimientos más difícil de cumplir es el relativo a la posición del micrófono que debe ser colocado en condiciones de campo libre, asegurando que no existen superficies reflectantes dentro de dos bandas de 10 m de ancho situadas a ambos lados de la posición del micrófono perpendicularmente a la vía.

### 6.3. MÉTODO ESTADÍSTICO DE PASO – VARIANTE BACKING BOARD (MÉTODO SPB-BB)

Esta metodología de ensayo es una variante del método SPB, basado en utilizar un micrófono incorporado en un panel rígido y reflectante al sonido con el fin de llevar a cabo mediciones de ruido en las cercanías de la carretera.



MÉTODO DE MEDIDA SPB-BB VARIANTE BACKING BOARD.

Un micrófono integrado en un plano infinito totalmente reflectante al sonido con la membrana al nivel de la superficie teóricamente debería experimentar un incremento del doble de la amplitud de la presión sonora de la onda sonora incidente, lo que conduce a un aumento de 6 dB en comparación con la situación de campo libre<sup>[7]</sup>.

La principal ventaja de esta variante (que introduce el incremento del nivel de presión acústica) es el completo blindaje del micrófono para cada fuente sonora y la reflexión situada en la parte posterior del plano. El conocido aumento de 6 dB se puede deducir de los niveles de ruido medidos, lo que es comparable con las mediciones en campo libre. Así, se puede descartar la influencia de las fuentes de ruido perturbadoras o las reflexiones del sonido en los objetos, como los edificios o las barreras acústicas que a menudo se encuentran detrás del micrófono.

En la práctica se deben tener en cuenta algunas precauciones al aplicar el método SPB-BB. En primer lugar, el plano reflectante no puede ser infinito como en la teoría. En la mayoría de los casos, se utiliza un tablero de madera rectangular cuyos lados poseen una longitud de 0.5 a 1.5 m. Los bordes de esta placa producen difracciones de la onda sonora incidente, lo que puede provocar aumentos de nivel sonoro en distintos puntos de la superficie del tablero. Además, el tablero no será un perfecto escudo para el resto de las fuentes de ruido o reflexiones desde detrás del micrófono.

Sin embargo, se puede alcanzar un rendimiento adecuado mediante la selección de un mínimo de difracción espacialmente situado en una posición específica sobre la superficie del tablero (posición definida por Fégeant, 1997)<sup>[7]</sup>.





