

NOTA TÉCNICA

Capas de rodadura de sonoridad reducida



EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

LURRALDE PLANGINTZA, ETXEBIZITZA
ETA GARRAIO SAILA

DEPARTAMENTO DE PLANIFICACIÓN
TERRITORIAL, VIVIENDA Y TRANSPORTE

NOTA TÉCNICA

Capas de rodadura de sonoridad reducida

EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

**LURRALDE PLANGINTZA,
ETXEBIZITZA ETA GARRAIO SAILA**
Azpiegitura eta Garraio Sailburuordetza
Garraio Plangintzaren Zuzendaritza

**DEPARTAMENTO DE PLANIFICACIÓN
TERRITORIAL, VIVIENDA Y TRANSPORTES**
Viceconsejería de Infraestructuras y Transportes
Dirección de Planificación del Transporte

Vitoria-Gasteiz, Abril de 2024



ÍNDICE

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. | EL PROBLEMA DEL RUIDO..... | 2 |
| 3. | LEGISLACIÓN EUROPEA, ESTATAL Y AUTONÓMICA | 5 |
| 4. | MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO (MER) Y PLANES DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO (PAR)..... | 7 |
| 5. | EL RUIDO DEBIDO AL TRÁFICO DE CARRETERA | 14 |
| 6. | MEDIDA DEL RUIDO | 17 |
| 7. | GENERACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA..... | 21 |
| 8. | CAPAS DE RODADURA. TIPOS | 23 |
| 9. | PARÁMETROS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS QUE INFLUYEN EN LA REDUCCIÓN DEL RUIDO DE RODADURA | 24 |
| 10. | CAPAS DE RODADURA DE BAJA SONORIDAD..... | 25 |
| 11. | RESUMEN Y RECOMENDACIONES | 36 |
| | ANEJO 1 - ESTUDIOS DE RENTABILIDAD | 38 |
| | ANEJO 2 – MEZCLAS DRENANTES EN DOBLE CAPA EN GIPUZKOA | 45 |



1. INTRODUCCIÓN

Según la Agencia Ambiental Europea¹, la contaminación acústica es un problema que se va haciendo cada día más grave: “Los efectos adversos del ruido se muestran en la calidad de vida de las poblaciones expuestas, en la capacidad de los niños a aprender en los colegios de manera adecuada, en la salud, en la distribución de la fauna terrestre y acuática, y en el elevado precio económico que la sociedad debe pagar para reducir la contaminación acústica”. Según este informe, al menos un 20% de la población de la Unión Europea se encuentra expuesta a niveles acústicos que son perjudiciales para la salud, superiores a 55 dB durante el día, y un 15% a niveles elevados (>50 dB) durante el período nocturno.

La reducción de la contaminación acústica se ha convertido en uno de los principales objetivos estratégicos ambientales en la UE, según se expone en el Séptimo Programa de Actuaciones Ambientales y en la Directiva sobre el Ruido Ambiental. La UE se ha marcado unos objetivos ambiciosos para reducir el ruido, fijando una reducción del 30% del porcentaje de población que sufre molestias crónicas por el ruido, en 2030 respecto a 2021. Se están elaborando planes nacionales para conseguir esos objetivos y, en consecuencia, se está haciendo un gran esfuerzo para contribuir a la reducción de este impacto y mejorar así la calidad de vida y la salud de las personas afectadas.

Las carreteras son la principal causa de la contaminación sonora por el número de vehículos que circulan por ellas y la extensión de las redes. El ruido del tráfico se compone del generado por los elementos mecánicos del vehículo, lo que se simplifica como ruido del motor, y el producido por la interacción entre los neumáticos y el pavimento o ruido de rodadura.

Para velocidades de circulación medias y altas el ruido de rodadura predomina sobre el del motor y la utilización de capas de rodadura de baja sonoridad puede reducir sensiblemente el ruido del tráfico. Sin embargo, no hay prescripciones o directrices técnicas sobre el nivel de ruido generado por las rodaduras que se utilizan en España ni una propuesta de rodaduras poco sonoras.

En los planes de acción que se están redactando para el cumplimiento de los objetivos europeos, las rodaduras de baja sonoridad pueden jugar un papel importante para la reducción de ruido, bien como medidas únicas o como complementarias de otras.

Con este documento, la Mesa de Firmes del Gobierno Vasco quiere contribuir a la divulgación del estado de los conocimientos sobre pavimentos de baja sonoridad, señalando los principios básicos para reducir el ruido de la rodadura y los métodos para evaluar la efectividad de los pavimentos poco sonoros.

Se pretende facilitar la tarea de los técnicos que desarrollan los mapas de ruido o que realizan planes de actuación, poniendo a su disposición información sobre el nivel sonoro de las capas de rodadura que se utilizan en el País Vasco para facilitarles su tarea.

¹ “Environment Noise in Europe 2020”, European Environment Agency; 2020



Se quiere también dar a conocer los resultados de los tramos construidos en la Comunidad Autónoma Vasca con mezclas bituminosas especiales, que se han mostrado muy eficaces para reducir el nivel de ruido de rodadura.

2. EL PROBLEMA DEL RUIDO

La definición más generalizada del ruido es la de “sonido no deseado por el que lo recibe”. Esta definición destaca la naturaleza subjetiva del ruido.

El ruido genera contaminación acústica, entendiéndose como tal la presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones que impliquen molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, o que causen daños significativos sobre el medio ambiente. El emisor acústico es cualquier actividad, infraestructura, equipo, maquinaria o comportamiento que genere contaminación acústica. El ruido es una contaminación asociada directamente a la fuente y que desaparece cuando esta fuente no se encuentra activa.

Hay muchas actividades que producen contaminación acústica pero los principales focos del ruido ambiental son los modos de transporte y especialmente la carretera. De acuerdo la Organización Mundial de la Salud² (OMS o WHO por sus siglas en inglés), el ruido, y en particular el producido por el transporte, ocupa el segundo lugar entre las amenazas ambientales para la salud en Europa, después de la contaminación del aire.

Aunque los niveles de ruido producido por los medios de transporte son generalmente demasiado bajos para causar daños biológicos al oído, si este está expuesto durante largo tiempo y se superan ciertos niveles sonoros se pueden producir efectos negativos sobre el ser humano², como:

- Grandes molestias: considerando como tales los sentimientos negativos como falta de satisfacción, incomodidad, irritación u otras perturbaciones generales.
- Perturbaciones del sueño: el sueño facilita las funciones vitales de nuestro cuerpo y el ruido impide su continuidad y reduce su tiempo efectivo, lo que tiene consecuencias en la lucidez mental, el rendimiento en el trabajo y la calidad de vida y puede inducir cambios en el metabolismo y en la regulación del apetito, impedir la consolidación de la memoria y producir disfunciones en los vasos sanguíneos. La exposición a largo plazo puede afectar al sistema cardiovascular.
- Daños a los sistemas metabólico y cardiovascular: la exposición al ruido activa reacciones psicológicas y emocionales en el organismo que producen incrementos de la presión vascular y cambios en la frecuencia cardíaca. El aumento de la tensión produce una liberación indebida de hormonas. Los efectos crónicos pueden producir una mortalidad prematura.
- Impedimentos cognitivos en niños: el ruido en las aulas produce una serie de defectos entre los que se encuentran la reducción de la motivación y concentración y el impedimento en la audición y comprensión del lenguaje. Los niños expuestos a

² Burden of disease from environmental noise, WHO y JRC, 2011



ruido en el colegio pueden mostrar una peor capacidad de lectura, memoria y rendimiento.

Recientemente se ha sugerido que el ruido puede ser un factor en enfermedades como algunos tipos de cáncer de mama, enfermedades respiratorias, y que puede influir en la salud mental y especialmente en la depresión y ansiedad.

El ruido también afecta a la fauna, con efectos que varían según las especies.

Si no se toman las medidas oportunas los efectos del ruido se podrían agravar con el tiempo debido a las tendencias crecientes del tráfico y de la construcción de vivienda, la primera incrementando el nivel del ruido y la segunda el número de personas afectadas.

La OMS, a partir de sus estudios sobre el efecto del ruido sobre la salud, recomienda reducir los niveles de ruido por debajo de una serie de umbrales que dependen de la fuente.

Tabla 1 - Recomendaciones de la OMS para los umbrales de ruido

| Área | Ruido durante el día, tarde y noche (L_{den}) | Ruido durante la noche (L_n) |
|-------------|---|----------------------------------|
| Carretera | 53 | 45 |
| Ferrocarril | 54 | 44 |
| Aviación | 45 | 40 |

Los cálculos sobre la población afectada en Europa se basan en los datos incluidos en los mapas de ruido que están recogiendo los países europeos en cumplimiento de la Directiva Europea sobre el Ruido Ambiental (END de Environmental Noise Directive), que únicamente incluyen a la población que soporta niveles superiores a 55 dB para L_{den} y a 50 dB para L_n . Por otro lado, hay zonas fuera de las principales arterias viales y ferroviarias o de las ciudades principales, no incluidas en los datos recogidos por los países, y que pueden estar sometidas a ruidos ambientales elevados. Por esto, los cálculos que parten de estos datos resultan en cifras que son inferiores a la población realmente afectada.

Se estima que³ de los 447 millones de habitantes en Europa (E-27), 167 millones superaban los umbrales recomendados por la OMS para el tráfico de carretera, 36 millones los del ferrocarril y 15 millones los del tráfico aéreo.

Las mayores afecciones corresponden lógicamente a las áreas urbanas. Las vías fuera de ámbito urbano con mayor impacto son aquellas por las que pasan los principales corredores del transporte.

³Report from the Commission to the European parliament and the Council on the implementation of the Environmental Noise Directive in accordance with Article 11 of Directive 2002/49/EC, 2023



No todas las personas que sufren niveles de ruido que superan los umbrales señalados ven afectada su salud. El número estimado de personas² con afecciones para la salud es el que se recoge en la tabla 2.

Tabla 2 - Número estimado de personas en Europa con afecciones para la salud por el ruido

| Área | Molestias | Perturbaciones del sueño | Enfermedades cardíacas isquémicas | Mortalidad prematura |
|--------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Carretera | 14.440.000 | 3.700.000 | 33.600 | 8.900 |
| Ferrocarril | 3.100.000 | 1.600.000 | 5.600 | 1.500 |
| Aviación | 900.000 | 200.000 | 2.000 | 200 |
| Total | 18.400.500 | 5.500.000 | 41.200 | 10.600 |

El ruido tiene también un impacto económico que puede evaluarse por el coste de las enfermedades o de los días en que los afectados no están a pleno rendimiento. La Agencia Ambiental Europea⁴ estima un coste de 35.000 millones de euros por las molestias, 34.000 millones de euros por las perturbaciones del sueño, 12.000 millones de euros por enfermedades cardíacas y 5 millones de euros por impedimentos cognitivos en los niños, para todos los orígenes del ruido.

También se podría asignar un valor económico a la pérdida de valor de las viviendas afectadas por el ruido, días de trabajo perdidos y menor posibilidad de uso del terreno.

La Directiva Europea sobre el Ruido Ambiental define varios índices acústicos, que están normalizados en la ISO 1996-2. En algunos índices se diferencia la hora del día a la que se produce el ruido: Índice de ruido de día (L_d); Índice de ruido de tarde (L_e); Índice de ruido en período nocturno (L_n). En España se consideran los períodos horarios siguientes:

- Día: 07:00-19:00 (12 h)
- Tarde: 19:00-23:00 (4 h)
- Noche: 23:00-07:00 (8 h)

En el índice combinado de ruido día-tarde-noche (L_{den}) se penalizan las medidas nocturnas y de tarde sumando al nivel medio 10 dB y 5 dB, respectivamente. La penalización que supone este incremento se hace para tener en cuenta la mayor sensibilidad de las personas al ruido en esos períodos.

Los índices L_{den} , L_d , L_e y L_n se refieren al nivel medio ponderado de presión sonora y a largo plazo, que generalmente es de un año. También se denominan $LA_{eq(den,d,e,n)}$.

⁴ Environmental noise in Europe , Agencia Ambiental Europea, 2020



En ciertas ocasiones, como por ejemplo en el caso del tráfico aéreo o ferroviario, es de interés considerar, en lugar del nivel promedio, el nivel máximo $L_{A,max}$, correspondiente al paso de un único tren o aeronave.

Para las limitaciones normativas o definición de objetivos en España se suelen utilizar los indicadores L_d , L_e , L_n y $L_{A,max}$ pero los mapas europeos de ruido requieren además los L_{den} .

Los mapas estratégicos de ruido que se envían a la Comisión Europea consideran únicamente el ruido ambiental exterior, es decir el sonido incidente en las fachadas más expuestas. La normativa estatal y la del País Vasco incluyen umbrales admisibles tanto para el ruido exterior como para el interior de las viviendas. Se puede estimar que con las ventanas abiertas el ruido interior es al menos inferior en 10 dB al exterior, en 15 dB si están entreabiertas y en 25 dB si están cerradas.

3. LEGISLACIÓN EUROPEA, ESTATAL Y AUTONÓMICA

3.1 Legislación Europea

El 25 de junio de 2002 el Parlamento Europeo y el Consejo aprobaron la Directiva Europea 2002/49/CE sobre la Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental (END). El objetivo de la Directiva era “establecer un enfoque común destinado a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos, incluyendo las molestias de la exposición al ruido ambiental”.

Para ello, se establecía la necesidad de que los países miembros:

- Elaborasen mapas estratégicos de ruido según métodos comunes de evaluación para determinar la exposición al ruido ambiental
- Que la información sobre el ruido ambiental y sus efectos se pusieran a disposición de los ciudadanos
- Que a partir de los mapas estratégicos de ruido los estados adoptasen planes de acción para prevenir y reducir el ruido ambiental cuando fuese necesario y, en particular, cuando los niveles de exposición pudiesen tener efectos nocivos en la salud humana. También se debía mantener la calidad acústica del entorno cuando esta fuese satisfactoria.

Los mapas estratégicos de ruido se deben elaborar para las principales carreteras, ferrocarriles, aeropuertos y ciudades y deben incluir también el dato del número de personas expuestas.

La definición de las zonas a incluir tiene en cuenta el tráfico o el número de habitantes. Actualmente se preparan mapas para las ciudades de más de 100.000 habitantes, las carreteras con más de 3 millones de vehículos/año y las vías férreas con más de 30.000 trenes/año. También se evalúan determinadas áreas acústicas que se considera que se deben preservar del ruido.

La Directiva no establece umbrales máximos de ruido, pero requiere que los mapas estratégicos de ruido incluyan las zonas con niveles sonoros superiores a 55 dB L_{den} y 50



dB L_n, diferenciados en intervalos de 5 dB. Los países pueden tener normativas con límites u objetivos que no coincidan con los umbrales de los mapas estratégicos.

Los mapas estratégicos de ruido se presentaron por primera vez a la CE en 2007 y se vienen elaborando desde entonces con una periodicidad de 5 años, encontrándose actualmente en la cuarta fase, que tiene prevista su finalización en julio de 2024.

Recientemente se han publicado modificaciones de la Directiva END para:

- Armonizar y actualizar los métodos de evaluación de los efectos nocivos sobre la salud (Directiva 2020/367/CE, que afecta al anexo III).
- Adaptar la Directiva al progreso científico y los de evaluación del ruido (Directiva delegada 2021/1226 modificando el anexo II).

3.2 Legislación Estatal

En España el MITMA transpuso la Directiva Europea en la “Ley del Ruido”, Ley 37/2003 de 17 de noviembre, desarrollada luego por el RD 1513/2005 en lo referente a la evaluación y gestión del ruido y por el RD 1367/2007 en lo relativo a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

El alcance y contenido de esta Ley y los Reales Decretos que la desarrollan es más amplio que el de la Directiva. Entre otros aspectos se establecen los objetivos de calidad acústica para cada área acústica previamente definida, incluyéndose el espacio interior de determinadas edificaciones; se regulan los emisores acústicos fijándose valores límite de emisión o de inmisión así como los procedimientos y los métodos de evaluación de ruidos y vibraciones. Para áreas urbanizadas existentes se fijan objetivos mientras que para nuevos focos emisores acústicos se fijan límites.

Todas las mediciones y evaluaciones acústicas a que se refiere la Ley asumen la aplicación de índices acústicos homogéneos en la totalidad del territorio español respecto a cada período del día. Los valores límite, tanto de los índices de inmisión como de los índices de emisión acústica, se determinan a nivel estatal, pero las comunidades autónomas y los ayuntamientos pueden establecer valores límite más rigurosos que los fijados por el Estado.

Posteriormente se publicó el RD 1371/2007 con la aprobación del “DB-HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de la Edificación, con las modificaciones de las disposiciones transitorias del RD 1675/2008.

La trasposición de la Directiva de la UE 2020/367 se ha incorporado mediante la Orden PCM/542/2021 y la de la Directiva delegada 2021/1226 mediante la PCM/80/2022.

3.3 Legislación en el País Vasco

En el País Vasco entró en vigor el Decreto 213/2012, de 16 de octubre, de contaminación acústica, con algunas modificaciones respecto a la normativa estatal, entre las que destacan el aumento de exigencias respecto a los sujetos obligados a elaborar mapas de ruido.

Así, por ejemplo, en la ley estatal están obligados a desarrollar mapas de ruido los ayuntamientos de más de 100.000 habitantes, mientras que en el País Vasco deben hacerlo



los de más de 10.000 habitantes. Igualmente, los grandes ejes viarios para los que hay necesidad de elaborar mapas estratégicos de ruido en la ley estatal son los de más de 3 millones de vehículos por año (IMD superior a 8.220) y en el País Vasco los de IMD superior a 6.000 vehículos. Hay también otras modificaciones que afectan por ejemplo a las competencias para verificar la calidad acústica, o a los requisitos para los planes de acción.

Los límites sonoros coinciden en la legislación estatal y vasca, con algunas diferencias puntuales. Los límites L_d , L_e y L_n , dependen del área acústica de que se trate. Se fijan objetivos para las áreas existentes o límites para las de nuevo desarrollo. Por ejemplo, los objetivos de la tabla 3 se aplican a urbanizaciones existentes.

Tabla 3 - Objetivos de calidad acústica en el País Vasco para áreas urbanizadas existentes

| Tipo de área acústica | | Índices de ruido dB(A) | | |
|-----------------------|---|------------------------|-------|-------|
| | | L_d | L_e | L_n |
| E | Ámbitos/Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica | 60 | 60 | 50 |
| A | Ámbitos/Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial | 65 | 65 | 55 |
| D | Ámbitos/Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto al anterior | 70 | 70 | 65 |
| C | Ámbitos/Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y espectáculos | 73 | 73 | 63 |
| B | Ámbitos/Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial | 75 | 75 | 65 |
| F | Ámbitos/Sectores del territorio afectados a sistemas generales de Infraestructuras de transporte u otros equipamientos públicos de los reclamen | (1) | | |

(1) Serán en su límite de área los correspondientes a la tipología de zonificación del área con la que colinden.

En los nuevos (futuros) desarrollos urbanísticos que requieran licencia o en las recalificaciones de usos urbanísticos, los límites admisibles se reducen en 5 dB (A).

Hay también limitaciones de ruido en el interior de los espacios habitables. Por ejemplo, en el interior de las viviendas se distingue entre estancias y dormitorios, y el umbral de ruido se reduce 20 dB o 25 dB, respectivamente, respecto al de fachada exterior en uso residencial de la tabla anterior.

4. MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO (MER) Y PLANES DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO (PAR)

4.1 Mapas estratégicos de ruido

Un mapa de ruido (MR) es la representación gráfica de la distribución del nivel sonoro en una determinada zona y para un momento determinado.

La Comisión Europea solicita a los países que elaboren y envíen mapas estratégicos de ruido. Estos se utilizan para que se disponga de estimaciones de exposición al ruido que



permitan la elaboración de la política ambiental europea; para facilitar información a los ciudadanos y a las administraciones sobre la situación local; y para desarrollar planes de acción.

Los mapas estratégicos de ruido (MER) son mapas de ruido definidos para la evaluación global de la exposición al ruido en las áreas de estudio, debido a la existencia de distintas fuentes de ruido, o para la predicción de situaciones futuras. Se realizan para los principales corredores del transporte. Tienen que incorporar datos sobre la población afectada.

Las Diputaciones Forales elaboran mapas estratégicos de ruido para su envío a la Comisión Europea y Mapas de Ruido para el análisis del cumplimiento de la legislación vasca. Todos ellos incluyen al menos los indicadores L_d , L_e y L_n y los mapas estratégicos contienen también L_{den} .

En el País Vasco, los mapas estratégicos se realizan para ciudades con población superior a 10,000 habitantes, y para las principales carreteras, aeropuertos, líneas de ferrocarril, y centros industriales, recogiendo aquellas zonas en las que el L_{den} es igual o superior a 55 dB y el L_n es igual o superior a 50 dB. Los mapas estratégicos de ruido de los grandes corredores de transporte por carretera están publicados en las páginas web de las Diputaciones Forales, y las de las ciudades en las de cada una de ellas o en las de las Diputaciones Forales.

Para la cuarta fase ha habido modificaciones en la metodología de cálculo, formato de presentación de datos y se requiere que se aborden los efectos del ruido sobre la salud.

Como la adquisición de datos reales sería impracticable, por el número de mediciones y la necesidad de contar con valores medios anuales, se utilizan modelos de cálculo para realizar estimaciones. La modificación de la legislación europea requiere que a partir del 1 de enero de 2019 se utilice como método común el CNOSSOS-EU (Common NOise aSSessment methODS), por lo que la elaboración de los mapas de ruido de la cuarta fase tendrá que realizarse con este modelo, siguiendo además las modificaciones de los Anexos de la Directiva Europea.

El procedimiento para la elaboración de mapas de ruido se define en la referencia⁵ y en una Guía básica publicada conjuntamente por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y por el CEDEX⁶.

El CNOSSOS-EU incluye modelos de generación de ruido para la carretera, ferrocarril, tráfico aéreo y ruido industrial. La parte del modelo sobre generación de ruido en carreteras y ferrocarriles se tomó de los trabajos desarrollados en los proyectos europeos de investigación Harmonoise e Imagine. El modelo correspondiente a la generación de ruido de la navegación aérea se basa en lo contenido en la Conferencia de Aviación Civil Europea 29 y el del ruido industrial en la ISO 9613. Hay un único modelo de propagación sonora, basado

⁵ Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), EU y JRC, 2012

⁶ Guía básica de recomendaciones para la aplicación de los métodos comunes de evaluación del ruido en Europa (CNOSSOS-EU). Recomendaciones para su aplicación a la evaluación del ruido de fuentes industriales, carreteras, ferrocarriles y aglomeraciones



en el modelo francés NMPB. Las estimaciones de la exposición de la población son los de la metodología alemana.

El modelo CNOSSOS-EU considera las distintas fuentes de ruido como focos puntuales para obtener luego la línea de propagación entre el foco y el receptor, generando estimaciones punto a punto para cada línea de propagación. Este desarrollo se realiza por mallas normalizadas dentro del territorio que se analiza.

En el caso del ruido de la carretera las principales entradas del modelo son los tráficos anuales de vehículos, los tipos de vehículos que componen el tráfico (dentro de cuatro tipos normalizados) así como su proporción dentro del total, y la velocidad de circulación. El modelo define el ruido instantáneo producido por un vehículo determinado, que se describe por su tipo y velocidad. Los cálculos se repiten para varias velocidades por cada tipo de vehículo.

Hay dos modelos matemáticos, uno para el ruido de rodadura y otro para el del motor. El primero es función del logaritmo de la relación entre la velocidad considerada y la de referencia y el segundo depende linealmente de la velocidad considerada.

El tráfico se expresa como IMD por tipo de vehículo y por periodo diario (día, tarde, noche).

Las condiciones de referencia de los modelos son:

- Velocidad constante.
- Carretera horizontal, sin pendiente.
- Temperatura de 20 °C.
- Capa de rodadura de referencia que combina las características sonoras de un AC 11 denso (DAC 0/11 en el modelo) con un SMA 11, con una edad comprendida entre 2 y 7 años, y un estado de mantenimiento convencional.
- Calzada seca.

A partir de esta configuración se aplican factores de corrección al ruido de rodadura por aceleración, temperatura y tipo de pavimento y al ruido de motor por aceleración, pendiente y tipo de pavimento (absorción acústica).

Se pueden considerar entradas adicionales, como el tipo de superficie de rodadura y su edad, la pendiente longitudinal del tramo, meteorología, y los movimientos de frenado y aceleración.

Otras entradas que se utilizan en el método son el tipo de terreno, las dimensiones y posición de los edificios, y la localización de viaductos y barreras de seguridad, que influyen en la amplitud de la zona a calcular.

Los factores de corrección por el tipo de pavimento (14 tipos) se han tomado del método de cálculo de los Países Bajos, y se refieren a capas de rodadura que no son coincidentes con las que se utilizan en España. Se ha publicado una tabla que correlaciona las rodaduras de los Países Bajos con las que se definen en Alemania, Austria, Francia, UK y los países nórdicos pero las informaciones tanto en la Guía del método como en la tabla adicional no son suficientes como para deducir los coeficientes de todas las rodaduras utilizadas en España. La tabla 4 incluye algunas rodaduras del CNOSSOS-EU que se pueden asimilar a



rodaduras españolas. No se han incluido las correspondientes a pavimentos de hormigón (NL06, NL07 y NL08) o adoquines (NL10, NL11 y NL12).

Tabla 4 - Factores de corrección por tipo de pavimento en el CNOSSOS-EU

| Tipo de pavimento | | Variación de la potencia acústica del eje, dB (A) | | | |
|-------------------|---|---|---------|---------|----------|
| | | 30 km/h | 50 km/h | 90 km/h | 120 km/h |
| 0 | Superficie de referencia (AC/SMA 11) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NL01 | PA (drenante) 1-capa | -1,1 | -1,2 | -2 | -2,1 |
| NL02 | PA (drenante) 2-capas | -3,8 | -3,9 | -3,9 | -3,2 |
| NL03 | PA (drenante) 2-capas, la superior más fina | -4,7 | -5 | -4,8 | -3,8 |
| NL04 | SMA 0/5 | -0,5 | -0,8 | -1,2 | -1,2 |
| NL05 | SMA 0/8 | -0,2 | -0,3 | -0,6 | -0,6 |
| NL09 | Tratamiento superficial | 0,6 | +1,4 | +1,7 | +1,5 |
| NL13 | Capa delgada A | -1,6 | -2 | -2,5 | -2,2 |
| NL14 | Capa delgada B | -2 | -2,6 | -3,1 | -2,7 |

En esta definición de capas de rodadura que incluye el CNOSSOS-EU se debe tener en cuenta que:

- No se indican los tamaños máximos de árido de las capas drenantes o delgadas, que influyen en los resultados.
- No se aclara la clasificación A y B de las mezclas en capa delgada, aunque se deduce que se pueden equiparar a las mezclas bituminosas discontinuas BBTM A y BBTM B, respectivamente.
- No se incluyen las mezclas en capa ultrafina o los microaglomerados en frío.

El método CNOSSOS contempla que los países miembros puedan establecer sus propios factores por tipo de pavimento siempre que se obtengan a partir de medidas realizadas en carretera. El procedimiento para definir los parámetros para una rodadura determinada se presenta en el anejo 1 de la referencia⁷, indicando que se debe utilizar el método SPB (ver apartado 7.3 de este documento).

4.2 Planes de acción. Gestión del ruido

La Directiva 2002/49/CE establece en su artículo 8 que los Estados Miembros deben elaborar planes de acción (PAR) encaminados a afrontar, en su territorio, las cuestiones relativas al ruido y a sus efectos, incluida la reducción del ruido si fuese necesaria con respecto a los lugares próximos a los principales ejes viarios y ejes ferroviarios, aeropuertos y ciudades.

Al igual que en el caso de los mapas estratégicos de ruido, la Directiva END establece que los planes de acción deben revisarse y actualizarse cada 5 años.

⁷ Develop and Implement Harmonised Noise Assessment Methods Process Applied to Establish CNOSSOS-EU/National Method Equivalence for Road Source data, CIRCAB



Los planes de acción deben incluir, entre otra información, la siguiente:

- Estrategia a largo plazo.
- Actuaciones previstas por las autoridades competentes para los próximos cinco años, incluyendo medidas para proteger las zonas tranquilas.
- Información económica (si está disponible): presupuestos, evaluaciones coste-eficacia o coste-beneficio.
- Disposiciones previstas para evaluar la aplicación y los resultados del plan de acción.

Las actuaciones para la reducción del ruido se pueden agrupar en tres tipos principales: las que tratan de reducir las emisiones en su origen, actuando sobre el foco de emisión; las que pretenden reducir la exposición al ruido de los afectados mediante elementos anti-propagación en el recorrido; o las de aislamiento del receptor.

Entre las actuaciones en el origen destacan las medidas sobre la superficie de rodadura y las que actúan sobre el tráfico.

En lo relativo a la superficie de rodadura, además de la utilización de las rodaduras de baja sonoridad que se tratan en este documento, se pueden eliminar los resaltos sonoros, regularizar la superficie de rodadura, eliminar los baches u otros desperfectos y, en su caso, mejorar las juntas de dilatación en estructuras.

Las medidas que actúan sobre el tráfico se refieren a:

- Reducción de velocidad por algún medio, como la señalización de límites de velocidad o instalación de semáforos o elementos reductores de velocidad (calmado del tráfico).
- Limitaciones del paso de vehículos, que generalmente se centra en los vehículos pesados, facilitando rutas alternativas a estos o limitando su circulación nocturna.
- Reducción de la circulación de turismos por algún procedimiento, como mejora del transporte público, promoción de los viajes compartidos o limitaciones de paso por matrículas.

La reducción del límite de velocidad, por ejemplo, reduce el nivel sonoro en una proporción logarítmica. El efecto de la reducción de velocidad depende del tipo de rodadura, pero tomando por ejemplo $L_w = 17 \times \log(v/v_0) \times L_{w0}$, la reducción de velocidad en 20 km/h lleva a rebajar unos 4 dB el nivel sonoro. En la práctica la reducción es menor porque la modificación de la velocidad máxima no lleva a cambios de la misma magnitud en la velocidad media, y en experimentos se ha demostrado que la reducción efectiva es de unos 2 dB. El coste directo de esta medida es prácticamente nulo.

Doblar o reducir a la mitad la intensidad de tráfico reduce el nivel de ruido en unos 3 dB, independientemente de la IMD de que se trate.

Se pueden también adoptar actuaciones sobre la infraestructura como la construcción de nuevas carreteras que alejen el ruido de las zonas más afectadas o la actuación acústica sobre las nuevas urbanizaciones por implantación de parques o arboledas.



A las actuaciones en origen habría que añadir las posibles medidas sobre el diseño de los vehículos o neumáticos, que no se pueden adoptar localmente. Los neumáticos silenciosos y las modificaciones en los vehículos, y especialmente la generalización de los vehículos eléctricos pueden suponer reducciones de unos 2 – 4 dB para cada una de las mejoras.

La tabla 5 muestra la efectividad esperada para las distintas actuaciones en el origen del ruido.

Tabla 5 - Efectividad estimada de la reducción de ruido con las principales actuaciones (dB)

| | Vehículo | Neumático | Reducción de velocidad | Superficie rodadura |
|--|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------------------------|
| Soluciones actuales | 1-2 | 1-2 | 1-3 | 1-6 |
| Soluciones esperables en 10-15 años | 2-4 | 2-4 | - | 6-8 |
| Quien se hace cargo del coste | Quien contamina | Quien contamina | Quien contamina | Administración carretera/Sociedad |

Entre las medidas anti-propagación destacan las pantallas vegetales o acústicas (absorbentes o reflectantes), diques de tierra, cubriciones totales o parciales, o tratamientos absorbentes en elementos de la carretera.

La construcción de barreras, diques o pantallas tiene un coste muy elevado y, en muchos casos, un coste/beneficio reducido o incluso negativo. En otros casos no son efectivas, como por ejemplo, para viviendas situadas a una cierta altura sobre la fuente del ruido. Por ello es importante la realización de análisis coste-beneficio o la definición de criterios claros de implantación.

Las principales medidas de aislamiento del receptor son la instalación de ventanas de aislamiento acústico y el aislamiento del propio edificio. Generalmente son las de mayor coste.

La tabla 6 resume las características de algunas de las principales medidas.

Tabla 6 - Principales características de distintas medidas contra el ruido

| Capas de rodadura de baja sonoridad | Pantallas | Insonorización de edificios |
|--|--|---|
| Actúa sobre la generación del ruido (salvo drenantes) | Actúa sobre la propagación del ruido | Actúa aislando del ruido |
| Reducción moderada del ruido (generalmente de 1 a 6 dB(A)) | Elevada reducción del ruido (generalmente de 7 a 12 dB(A)) | Elevada reducción del ruido (generalmente de 10 a 20 dB(A)) |
| No intrusiva | Intrusiva | No intrusiva |
| Reduce el ruido ambiental | Reduce el ruido ambiental, pero a corta distancia de la fuente | Reduce el ruido interior únicamente. Las ventanas deben estar cerradas, |
| Relativamente económica | Caro (elemento adicional) | Muy caro |
| Vida de servicio media | La vida de servicio puede ser larga | Larga vida de servicio |



| Capas de rodadura de baja sonoridad | Pantallas | Insonorización de edificios |
|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| No vulnerable al vandalismo | Generalmente vulnerable al vandalismo | No vulnerable al vandalismo |
| Requiere mantenimiento | Requiere mantenimiento | No requiere mantenimiento |

Las actuaciones más adecuadas en cada caso dependen de que se trate de una zona urbana o interurbana. En zonas urbanas, donde las pantallas no tienen prácticamente efectividad, las actuaciones más empleadas son las de renovación de la capa de rodadura para introducir rodaduras de baja sonoridad y la gestión del tráfico para reducir su velocidad o intensidad, seguidas de la utilización de ventanas de aislamiento acústico o el aislamiento de edificios. En carreteras interurbanas predominan, junto al empleo de las rodaduras de bajo nivel sonoro, la utilización de pantallas.

La toma de decisiones sobre la actuación o conjunto de actuaciones más adecuada para cada situación debe considerar su coste, de manera que se pueda estimar si los costes de reducir el ruido están justificados por los beneficios, dentro del marco de limitación de los recursos disponibles para las administraciones de carreteras. Estos estudios de rentabilidad se pueden plantear de varias maneras, pero los más utilizados son los que comparan el coste con los beneficios sociales, expresando los beneficios como “unidades de salud”, coste de las actuaciones sanitarias derivadas del ruido o dinero que están dispuestos a pagar los ciudadanos para evitar las molestias, o simplemente determinando la reducción de ruido en dB por persona afectada. En el Anejo 1 se presenta, de manera simplificada, el desarrollo de este análisis.

El programa Phenomena⁸, financiado por la UE, analizó los planes de actuación de 21 países, redactados de acuerdo con los requerimientos de 2019. Se hizo una selección para incluir de forma equilibrada grandes y pequeños países, y del norte y sur de Europa, entre los que se encontraba España, e incluía planes de actuación del País Vasco.

Tabla 7 - Tipo de actuaciones detectadas por el proyecto Phenomena en 21 países

| Tipo de actuación | Proporción sobre el total | Actuaciones |
|---|---------------------------|--|
| Fuente | 34% | 65% Rodaduras baja sonoridad |
| | | 35% Gestión del tráfico |
| Propagación/aislamiento | 48% | 64% Pantallas o barreras |
| | | 28% Aislamiento de edificios |
| | | 8% Diseño de edificios |
| Planeamiento urbanístico y cambio de infraestructura | 13% | 64% Planes de uso del suelo |
| | | 36% Nuevas infraestructuras o cierre de las existentes |
| Otras medidas | 4% | 100% Disponibilidad zonas tranquilas |
| Educación y alerta ciudadana | 1% | Incrementar la alerta ciudadana |
| | | Promoción de la sostenibilidad |

⁸ Assessment of Potential Health Benefits of Noise Abatement Measures in the EU: Phenomena Project, Tecnalia/UAB/VVA/TNO/ANOTEC, 2021



Por otro lado, en los planes de acción desarrollados en la tercera fase en el País Vasco para las carreteras principales, las actuaciones propuestas se refieren en general a la aplicación de pantallas acústicas, cambios de trazado y aislamiento de edificios. Estas medidas se suelen acompañar de actuaciones sobre las capas de rodadura de los tramos afectados, aunque no figuren expresamente en los planes de acción.

Los resultados de los estudios de efectividad de actuaciones realizados en Europa recomiendan dar preferencia a las medidas sobre el origen del ruido frente a las barreras o aislamiento de fachadas y, como resultado, la Comisión Europea ha declarado que priorizará la reducción del ruido en su origen, en particular centrándose en el empleo de neumáticos más silenciosos, rodaduras de baja sonoridad y en la reducción de la velocidad de circulación del tráfico. Los pavimentos de baja sonoridad generalmente son los de mejor resultado en cuanto a coste-beneficio.

5. EL RUIDO DEBIDO AL TRÁFICO DE CARRETERA

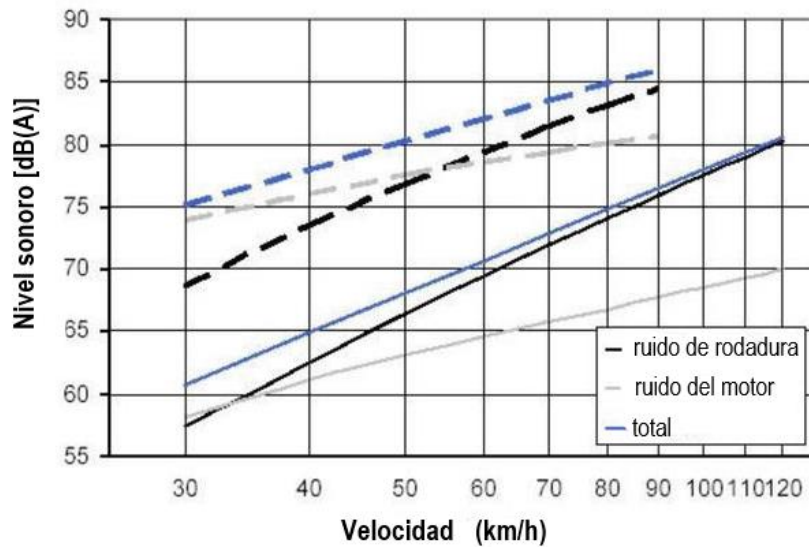
5.1 Ruido del vehículo y de rodadura

En las carreteras la generación de ruido está determinada fundamentalmente por el número, tipo y velocidad de los vehículos y por las características de la capa de rodadura. También intervienen otros factores como las aceleraciones y deceleraciones de los vehículos o la presencia de agua en la rodadura. La transmisión del ruido generado se ve afectada por la topografía de la zona, tipo de terreno, presencia de edificios u obstáculos, condiciones atmosféricas y también por el tipo de capa de rodadura.

En el ruido producido por los vehículos se distingue entre el emitido por el propio vehículo y el producido por la rodadura. Los efectos aerodinámicos, para las velocidades moderadas (inferiores a 120 km/h) y bajas que se suelen dar en las vías de circulación, no tienen un efecto de consideración.

El ruido del propio vehículo está compuesto por el del motor, transmisión, ventilador, escape, chapa y otros elementos que ayudan a la propulsión del vehículo. El ruido de rodadura se debe a la interacción de los neumáticos y la superficie del pavimento. Las características de cada uno de ellos dependen a su vez del tipo de vehículo: motocicletas, turismos, pesados de dos o más ejes, remolques, etc. Los estudios más simples de ruido distinguen al menos entre turismos y pesados, y el CNOSSOS-EU considera turismos, camiones ligeros, camiones de gran peso, ciclomotores o motocicletas, y una última categoría, abierta, para vehículos especiales.

La magnitud del ruido depende de la velocidad del vehículo y el ruido del motor aumenta de forma lineal con la velocidad y el de rodadura de manera logarítmica. La diferente forma en la que la velocidad afecta al ruido del motor o de rodadura hace que para turismos a partir de 35 km/h predomine el ruido de rodadura, y para camiones lo haga a partir de 60 km/h. Por tanto, el ruido de rodadura y la superficie de rodadura tienen más influencia en autovías y autopistas en campo abierto, cuando la velocidad de circulación supera los 55-60 km/h, y en carreteras en zonas urbanas o periurbanas a partir de los 35-40 km/h. El ruido del motor es predominante a bajas velocidades. En los coches eléctricos el ruido de propulsión es muy reducido y para ellos predomina el de rodadura en todas las situaciones. En el caso de motocicletas predomina siempre el ruido del motor.



Nota: Las líneas discontinuas son para turismos y las continuas para vehículos pesados

Figura 1: Ruido de rodadura y del motor en función de la velocidad de circulación (fuente Dijkink y Keulen 2004)

5.2 Neumáticos

El tipo de neumático, y especialmente las características de su banda de rodadura, influye en la generación de ruido. En el ejemplo de la figura⁹ se pueden ver los resultados del ruido medido en 6 rodaduras distintas con 7 tipos de neumáticos. Para el mismo pavimento se obtienen diferencias de 6 a 8 dB dependiendo del neumático. También se manifiesta que la clasificación de las rodaduras por ruido generado es siempre la misma.

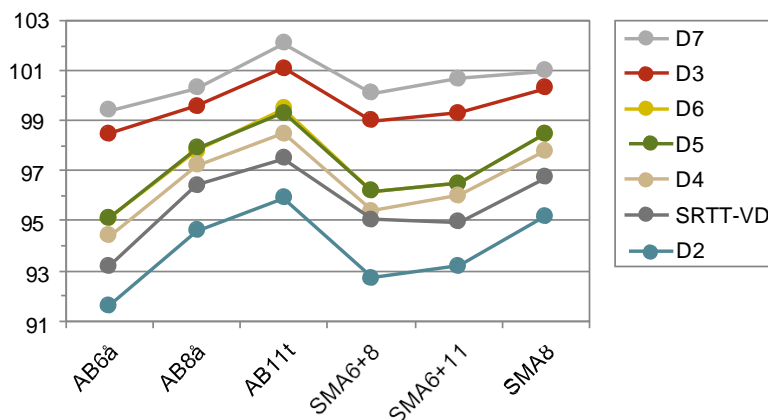


Figura 2: Ruido originado por distintos tipos de neumáticos.

⁹ State of the art in managing road traffic noise: noise-reducing pavements; CEDR; 2017



5.3 Ruido de turismos y de camiones

Tanto el ruido del vehículo como el de rodadura son muy distintos en turismos y en camiones. Para la misma velocidad, el ruido de un camión es 10 dB superior al de un turismo. Por otro lado, un tipo de capa de rodadura puede tener distinto efecto en turismos que en camiones.

5.4 Factores que afectan a la propagación del ruido

La propagación del ruido viene afectada por los efectos atmosféricos, los efectos frontera y la divergencia geométrica.

La interacción de las ondas sonoras con las moléculas gaseosas tiene como consecuencia una disipación de energía. A baja frecuencia es despreciable, pero crece rápidamente con la frecuencia. Por ejemplo, a 200 Hz es del orden de 1 dB/km y a 1.000 Hz es aproximadamente de 4 dB/km¹⁰. La distancia se comporta como un filtro de paso bajo, disipando las altas frecuencias a medida que el origen del sonido se aleja del receptor. Hay otras circunstancias atmosféricas que influyen en la medida, como, por ejemplo, el viento, cuyo efecto depende de la posición de la fuente y del receptor (a favor o en contra), o la temperatura. El ruido de rodadura cambia con la temperatura ambiente y cuando esta disminuye el nivel sonoro aumenta.

El sonido se propaga de manera directa siguiendo la línea que une el emisor con el receptor, pero también por reflexión en el terreno. Esta última forma implica una pérdida de energía y un desfase. La reflexión se puede producir en el propio pavimento, teniendo en cuenta que una rodadura drenante refleja muy poco el sonido y uno de tipo hormigón asfáltico AC refleja prácticamente todo el sonido que recibe. También se produce reflexión por efecto frontera con los objetos del entorno, como las barreras antiruido, las barreras de seguridad, los muros o el relieve del terreno. La difracción depende de la frecuencia del sonido.

La divergencia geométrica es consecuencia del principio de conservación de energía. A medida que una onda sonora se propaga en la distancia la superficie de la onda aumenta y la amplitud disminuye, disminuyendo el nivel sonoro. La disminución en este caso no depende de la frecuencia.

5.5 Durabilidad acústica del pavimento

El ruido de rodadura aumenta con el tiempo, según va envejeciendo la superficie de rodadura. El aumento es mayor para las superficies con tamaño máximo de árido pequeño que para las mismas superficies con mayor tamaño máximo. La tabla 8 presenta los resultados obtenidos en un proyecto europeo¹¹.

¹⁰ Bruit de roulement. État de l'art et recommandations; IDRRIM; 2020

¹¹ Proyecto QUESTIM: Modelling of Acoustic Aging of Road Surfaces; CEDR; 2014



Tabla 8 - Incremento del nivel sonoro de las mezclas bituminosas con el tiempo (dB/año)

| Tipo de material | Tamaño máximo del árido | Incremento del ruido (dB/año) | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------|
| | | Velocidad ≥80 km/h | Velocidad 50-60 km/h |
| Hormigón asfáltico AC | 16 | 0,1 | - |
| | ≤11 | 0,3 – 0,4 | 0,3 – 0,4 |
| Capas delgadas BBTM | 10 | 0,2 | - |
| | ≤8 | 0,4 – 0,6 | 0,4 |
| Drenante PA, 1 capa | 16 | 0,3 | - |
| | ≤8 | 0,3 | - |
| Drenante PA, doble capa | ≤8 | - | 1,0 |

En otros estudios¹² se estima una ganancia anual de nivel sonoro de 0,1 a 0,2 dB para las superficies cerradas (Huecos ≤6%) y del 0,4 a 0,5 dB para las superficies abiertas (huecos ≥12%).

6. MEDIDA DEL RUIDO

6.1 Introducción

Para la medida del ruido se utiliza la unidad asociada a la intensidad sonora, que es el decibelio, definido por la expresión:

$$dB = 10\log_{10}(\text{Intensidad sonora medida}/\text{Intensidad sonora de referencia}).$$

La definición del dB mediante una unidad logarítmica se corresponde con la forma en que el oído humano responde a la presión sonora.

La reacción ante el ruido no depende sólo de su intensidad; el oído humano percibe, según su edad, sonidos con frecuencias entre 20 y 20.000 Hz, pero no aprecia igual los tonos bajos y altos que los de frecuencias medias comprendidos en el intervalo 1.000-5.000 Hz, para las que es más sensible. El ruido del tráfico se produce generalmente en frecuencias próximas a los 1.000 Hz. Para simular la sensibilidad del oído a las frecuencias medias se ha incorporado a los instrumentos utilizados para medir la intensidad sonora unos sistemas de ponderación, reconocidos internacionalmente y denominados “A”, “B” y “C”. Se han llevado a cabo numerosas investigaciones, en las que se comparaban las clasificaciones establecidas por un grupo de personas con las derivadas de instrumentos de medida que llevaban incorporados cada uno de los sistemas de ponderación, y las obtenidas en ensayos de carretera se aproximaban más en todos los casos a la ponderación “A”. Por ello, las medidas del ruido de carretera se dan en dB(A), aunque en ocasiones se suele obviar la referencia a la ponderación.

La medida del ruido se puede plantear para comprobar el cumplimiento de las limitaciones de contaminación acústica definidos en la legislación (medida del ruido ambiental), o puede estar dirigida específicamente al análisis del comportamiento sonoro de un determinado pavimento. Los procedimientos de medida, en uno y otro caso, son diferentes.

¹² A review of current research on road surface noise reduction techniques; TRL; 2010



6.2 Medida del nivel de ruido ambiental

En el caso de que se quiera hacer una medida directa para comprobación del nivel de ruido ambiental se deberá seguir las Normas UNE-ISO 1996-1 y 2. La medida está dirigida a determinar el nivel acústico medio o máximo en fachada o en el entorno de la carretera debido al ruido ambiental.

El Anexo IV del real decreto 1367/2007 y el Decreto 213/2012 de contaminación acústica de la Comunidad Autónoma del País Vasco exigen una serie de requisitos genéricos para la medida de acuerdo con estas Normas:

- Las mediciones se pueden realizar en continuo durante el periodo temporal de evaluación completo, o aplicando métodos de muestreo del nivel de presión sonora en intervalos temporales de medida seleccionados dentro del periodo temporal de evaluación.
- En los muestreos se deberán realizar al menos 3 series de mediciones de LAeq,Ti, con tres mediciones en cada serie, de una duración mínima de 5 minutos ($T_i = 300$ segundos), con intervalos temporales mínimos de 5 minutos, entre cada una de las series. Las medidas deben ser representativas del nivel sonoro generado por la fuente sonora objeto de evaluación. El resultado de LAeq,Ti, será el resultado promedio energético.
- Se deben realizar al menos 3 series de mediciones del LAmax. El resultado será el nivel medido más alto.
- Las medidas deberán documentarse con una descripción de las condiciones de funcionamiento del foco emisor acústico que justifiquen la metodología de medida empleada (número de muestras, intervalo entre las mismas, correcciones efectuadas, etc.) y el grado de representatividad del resultado final obtenido.

Las normas y la legislación incluyen una serie de limitaciones respecto a las condiciones de la medida y factores de corrección. La Norma UNE-ISO 1996 – 2 indica que para la medida del ruido generado por el tráfico se debe incluir al menos 30 vehículos ligeros y otros tantos pesados.

El método de las Normas UNE-ISO 1996 1 y 2 no permite aislar el ruido debido al paso de un vehículo a una velocidad determinada y por tanto sus resultados no definen adecuadamente el efecto del pavimento de la carretera. El programa CNOSSOS-EU no admite este procedimiento para determinar los coeficientes de corrección asociados a los pavimentos. Sin embargo, se pueden emplear para determinar el efecto global del cambio de una rodadura y estimar la eficacia de los pavimentos de baja sonoridad.

Para la medida del ruido de rodadura de un determinado pavimento y para caracterizar su efecto de manera cuantitativa se han elaborado dos normas específicas, distintas a la UNE-ISO 1996. Una define el método estadístico de paso, y la otra el de proximidad, que se describen someramente en los siguientes apartados.

6.3 Método estadístico de paso (SPB, Statistical Pass-By)

Se define en la norma EN-ISO 11819-1. Es el método que debe utilizarse para la determinación de los coeficientes del CNOSSOS-EU en caso de que se pretendan validar



características de rodaduras alternativas (ref. 6). El principio básico del método se basa en la medida del nivel sonoro máximo de un gran número de vehículos aislados circulando por el tramo.

Los micrófonos se sitúan a 7,5 m del eje (centro) del carril que se quiere medir y a una altura de 1,2 m.

Dentro del flujo de tráfico se seleccionan vehículos aislados (turismos, pesados de dos ejes y pesados de varios ejes), circulando a velocidades superiores a 45 km/h, para que el ruido de rodadura sea predominante. Para poder medir vehículos aislados (que pasen frente al micrófono sin otros muy próximos o en paralelo) el tráfico debe ser moderado, y no tan bajo como para que el tiempo necesario para un ensayo completo sea muy elevado.

La velocidad se mide mediante láser o radar, y se registra junto a la medida del nivel sonoro, L_{Amax} .

Según la norma debe haber un número mínimo de vehículos:

- 100 turismos
- Al menos 80 vehículos pesados, entre los que haya al menos 30 camiones de 2 ejes y 30 camiones de más de 2 ejes.

Así, se obtienen al menos 100 pares de datos (L_{Amax} , V).

A partir de los resultados se hace una regresión entre el nivel sonoro y el logaritmo de la velocidad y se estima el nivel de ruido para la velocidad de referencia que se utilice, que puede ser la velocidad máxima señalizada en el tramo o una velocidad genérica de referencia. Por ejemplo, en Francia se toma 90 km/h para turismos y 80 km/h para camiones y el L_{Amax} (90 km/h) de ligeros se toma como índice representativo para comparar pavimentos, siempre que el tráfico y las características del entorno sean parecidas.

$$L_{Amax}(V) = L_{Amax}(V_{ref}) + \log_{10}(V/V_{ref})$$

Las medidas típicas SPB de un turismo se encuentran generalmente entre 65 y 80 dB.

Con la regresión se puede calcular el nivel sonoro para cualquier velocidad incluida en el intervalo de medida. A partir de modelos se puede también estimar el ruido en fachada.

La norma de ensayo establece muchas limitaciones para la zona en la que se realiza la prueba. Para que la medida tenga validez no debe haber objetos que reflejen la onda sonora, como edificios o barreras en las proximidades de la zona de medida. No debe haber grandes desmontes o terraplenes y el perfil longitudinal y transversal no deben tener pendientes elevadas. La presencia césped u otro tipo de vegetación entre el micrófono y el carril también influye en la medida. Además, la velocidad del viento debe ser baja. El pavimento debe estar seco y en el caso de mezclas drenantes no debe haber llovido en las 48 h anteriores a la medida. Durante la medida la temperatura ambiente debe estar entre 5 °C y 30 °C y el resultado debe normalizarse a una temperatura del aire de 20 °C

Los requisitos del ensayo pueden ser muy limitantes en zonas urbanas, y se ha desarrollado un método que complementa el SPS colocando un panel totalmente reflectante, tras el



micrófono, de 0,90 m por 0,75 m. Permite medir en presencia de edificios, desmontes, barreras, etc, pero introduce una incertidumbre en el resultado, especialmente en las frecuencias entre 500 y 2.000 Hz. La onda sonora provocada por el vehículo que pasa se refleja en el panel, provocando un aumento de la presión sonora de unos 6 dB(A) que luego se restan de la medida. Se le conoce como método estadístico de paso Backing Board (SPB-BB). Se describe en la nota técnica ISO/PAS 11819-4 y está previsto que se incluya en una futura revisión de la norma EN-ISO del SPB.

El método SPB se considera muy preciso en la definición del nivel sonoro del pavimento, especialmente para la flota de vehículos que circulan sobre él, pero solo refleja las condiciones del tramo que se está midiendo, de corta longitud. Además, necesita mucho tiempo de medida.

El método de Paso Controlado (CPB) es una simplificación del SPB y utiliza un número relativamente reducido de vehículos que se utilizan específicamente para el ensayo en condiciones controladas. Generalmente se aplica cuando la carretera no está abierta al tráfico o en tramos de prueba especiales, dentro de investigaciones sobre ruido. Sus resultados se suponen equivalentes a los del SPB.

6.4 Método de proximidad (CPX, Close ProXimity)

Está recogido en la norma EN-ISO 11819-2, que se completa con la especificación técnica ISO/TS 31145-1. Se utilizan micrófonos embarcados en un vehículo, que se sitúan próximos a una rueda de medida para recoger en continuo el ruido de rodadura.

Los micrófonos se pueden instalar en el propio vehículo o más frecuentemente en un remolque, equipado con la rueda de medida. Se colocan al menos dos micrófonos próximos a la rueda, generalmente a 20 cm de la superficie lateral externa del neumático, a 230 cm del eje de la rueda y a 10 cm de altura sobre la superficie de rodadura.

Si se mide sobre el propio vehículo se utiliza una rueda normalizada cuya dureza debe estar en todo momento dentro de los límites definidos en la norma. Si se utiliza un remolque este puede estar abierto o cerrado. Con el cierre del remolque (cámara semianecóica) se consigue aislar la medida de influencias externas como las turbulencias del aire o ruidos del tráfico, del propio vehículo tractor o del propio remolque. Generalmente se instala una rueda de turismo pero algunos modelos de remolque admiten también ruedas de camión.

Como resultado se da la media, cada 20 m, de los niveles sonoros medidos por los dos micrófonos. En los resultados se incluye la velocidad del vehículo en el momento de la medida.

Las medidas se suelen hacer a velocidades de 50, 80 o 110 km/h, aunque es recomendable que se hagan a la máxima velocidad señalizada del tramo. La rueda debe circular por la rodada de los vehículos. Los niveles de ruido suelen ser elevados, en el intervalo 90 a 105 dB.

Este método no se considera adecuado para la validación de características de pavimentos para los cálculos con el CNOSSOS-EU pero permite medir de manera continua tramos largos de carretera y realizar la medida en todos los carriles. También se puede aplicar en zonas urbanas. En algunos países se utiliza como criterio de aceptación de una obra.



Un inconveniente es que el ruido en proximidad puede ser muy distinto al ruido en distancia y especialmente si se combina con otros. La diferencia entre una y otra medida depende de la velocidad del vehículo, del tipo de neumático, de la frecuencia del sonido y de la absorción (impedancia acústica del pavimento). Los remolques dan generalmente resultados con ruedas de turismo y no de camión y los resultados de la medida son muy dependientes del neumático utilizado y de su estado y antigüedad.

En el programa europeo Rosanne¹³ se han establecido relaciones entre los resultados del SPB y el CPX, aunque debe tenerse en cuenta que los dos procedimientos de ensayo no son equivalentes.

6.5 Medidas de absorción acústica en laboratorio e in situ

El coeficiente de absorción acústica es la fracción de energía sonora absorbida por el material cuando una onda sonora se refleja en su superficie. Depende de la frecuencia del sonido (o de su espectro) y del ángulo de incidencia. Generalmente se consideran incidencias planas.

Se han normalizado dos métodos para medir la absorción acústica. Uno es el recogido en la ISO 13472-1 (Método de la superficie extendida) que compara una señal sonora enviada a la superficie mediante un altavoz con la reflejada recibida por un micrófono. Se hace en carretera, cerrando el tramo al tráfico.

Como alternativa se puede hacer una medida sobre testigos colocados en tubos de Kundt o de impedancia para determinar el espectro de absorción acústica. Se basa en el principio de que cuando las dimensiones laterales de un tubo son pequeñas en comparación con la longitud de onda de la señal acústica solo se propagan ondas planas. En el ensayo se coloca una muestra del pavimento en un extremo del tubo y se emiten ondas sonoras normales a su superficie, midiendo luego el cambio en los nodos de la onda. Las normas ISO 10534-1 e ISO 10534-2 recogen dos variantes de este método.

También se pueden hacer ensayos en cámaras reverberantes, según las normas ISO 354 o EN 20354. En el ensayo se coloca una muestra del pavimento en una cámara con paredes de gran capacidad de reflexión (sin absorción) y se aplica un campo sonoro difuso, con una distribución aleatoria de ondas planas. El coeficiente de absorción se deduce de la disminución en el tiempo de reverberación, y tiene en cuenta el área relativa de la muestra respecto a las paredes de la cámara. El método no es muy práctico ya que requiere una muestra de la capa de rodadura de un cierto tamaño.

Se están desarrollando procedimientos con tubos de impedancia aplicados directamente sobre la superficie de la carretera.

7. GENERACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

En el contacto entre la banda del neumático y la rodadura se generan complejas vibraciones del neumático, efectos aerodinámicos y resonancias en las oquedades de la superficie. El diseño de mezclas bituminosas de baja sonoridad requiere un conocimiento de los

¹³ Rosanne; Harmonisation of measurement methods for skid resistance, noise emission and rolling resistance of road pavements; 2016



mecanismos de generación del ruido de rodadura del tráfico para que se pueda actuar sobre ellos. Los fenómenos que contribuyen en mayor medida al nivel sonoro de rodadura son los siguientes:

- Vibraciones en los neumáticos.

Las vibraciones se generan por el impacto entre la superficie del pavimento y los neumáticos (efecto martillo), que producen vibraciones radiales o tangenciales de la banda de rodadura del neumático que se transmiten a sus paredes. También interviene la deformación del neumático en la zona de contacto y la penetración de los bloques del neumático en la propia textura de la rodadura. Las vibraciones producen un ruido audible, en frecuencias de 500 a 1.500 Hz.

Las características de la mezcla bituminosa que afectan a este fenómeno son la textura superficial, y especialmente el tamaño del árido de la mezcla bituminosa.

- El bombeo del aire.

Cuando el neumático entra en contacto con la superficie de rodadura una parte del aire se expulsa por las ranuras del neumático y otra parte, que queda atrapada, se comprime contra la superficie. Luego, cuando el neumático pierde contacto, se absorbe aire. Este fenómeno se produce miles de veces por segundo. Este bombeo de aire genera ruido de alta frecuencia, generalmente superior a 1.000 Hz. Los huecos de la mezcla bituminosa ayudan a reducir esta emisión.

- El efecto bocina.

La forma circular de los neumáticos y la superficie plana de la carretera hacen un efecto bocina que amplifica el ruido en el contacto entre neumático y pavimento por reflexión del aire contra las superficies limitantes. Este aumento puede alcanzar los 20 dB. Los huecos de la superficie también ayudan a reducir este efecto.

- El efecto Helmholtz.

Es similar al efecto de soplar en una botella, cuando la masa de aire vibra en el interior, amplificando algunas frecuencias.

- Absorción durante la propagación.

El ruido del motor y el de la rodadura se propagan desde los vehículos a los receptores. El ruido puede ser reflejado por la superficie. Las superficies abiertas, con huecos, pueden absorber algunas de las frecuencias durante la propagación.

- Rigidez de la superficie.

Las superficies más rígidas generan más ruido que las elásticas. La rigidez de la superficie de rodadura es mayor, en varios ordenes de magnitud, que la del



neumático. Reduciendo la rigidez del pavimento se consigue reducir el impacto de los bloques de la banda de rodadura del neumático, y por tanto sus vibraciones y la generación de ruido.

- Adherencia y despegue.

El neumático sufre fenómenos de adherencia y despegue en su contacto con el pavimento, que generan sonidos de alta frecuencia.

8. CAPAS DE RODADURA. TIPOS

El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), recoge en su Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) los siguientes materiales para capas de rodadura de los firmes de carretera:

- Artículo 540. Microaglomerados en frío (MICROF).
- Artículo 542. Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso (AC). Incluyen las mezclas de tipo denso (D) y semidenso (S) para capas de rodadura.
- Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes (PA) y discontinuas (BBTM A y B).
- Artículo 544. Mezclas bituminosas tipo SMA.
- Artículo 545. Mezclas bituminosas tipo AUTL (ultradelgadas) para capas de rodadura.
- Artículo 550. Pavimentos de hormigón.

Además, hay otras rodaduras que no se encuentran normalizadas en el PG-3:

- Tratamientos superficiales.
- Mezclas abiertas en frío.
- Pavimentos de adoquines.

De todas ellas, las rodaduras comunes en el País Vasco son las siguientes:

- Mezclas bituminosas del tipo Hormigón Asfáltico AC surf S o D (según PG-3)
- Mezclas bituminosas discontinuas del tipo BBTM A ó B (según PG-3)
- Mezclas drenantes PA (según PG-3)
- Microaglomerados en frío MICROF (según PG-3).
- Mezclas bituminosas abiertas en frío AF (según Anejo 10 de la Norma de Firmes del CAPV).
- Tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla TRG.

Las rodaduras más usuales en las vías principales de la CAPV son las BBTM A y B y en menor medida las mezclas drenantes. Para tráficos medios y bajos las más extendidas son las mezclas bituminosas AC surf S o D.

Los microaglomerados en frío se utilizan en regeneración de rodaduras, generalmente para la recuperación de la resistencia al deslizamiento o la rehabilitación de superficies envejecidas, pero también como capa superior sobre mezclas abiertas en frío en carreteras de bajo tráfico. Este diseño de mezclas abiertas en frío selladas con microaglomerados en



frío se aplica fundamentalmente en Gipuzkoa. Asimismo, los tratamientos superficiales, generalmente triples, se utilizan en Álava en vías de bajo tráfico.

Actualmente se cuenta con pocos tramos en la CAPV con las mezclas bituminosas tipo SMA y AUTL, de reciente normalización, pero se espera que su uso se amplíe en los próximos años.

No son comunes en la CAPV los pavimentos de hormigón o los firmes de adoquines, que por tanto no se incluyen en este análisis.

9. PARÁMETROS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS QUE INFLUYEN EN LA REDUCCIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

Se desprende de lo descrito en el apartado 8 que las mezclas bituminosas que constituyen las capas superficiales pueden rebajar el nivel sonoro de la rodadura mediante dos efectos.

El primero consiste en reducir la generación de ruido, para lo que se debe actuar sobre aquellas características que afectan a la vibración de los neumáticos. Para ello, se buscan:

- Superficies regulares y homogéneas.
- Macrotexturas negativas, que son las que se forman cuando las crestas del árido grueso se encuentran en superficie al mismo nivel. Se producen con mezclas bituminosas con un bajo contenido de árido fino y una compactación final con rodillos metálicos. Los microaglomerados en frío, los tratamientos superficiales y las mezclas AC (especialmente cuando están envejecidas) tienen texturas positivas, con las crestas de los áridos a distinta altura. Las mezclas drenantes, BBTM, SMA y AUTL tienen texturas negativas, presentando una superficie relativamente plana con oquedades superficiales.
- Macrotexturas superficiales suficientes, de al menos 0,5 mm, para facilitar el bombeo del aire.
- Tamaños máximos de árido reducidos. Para un mismo material de rodadura las vibraciones del neumático son tanto mayores cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido. Este tamaño máximo afecta también al bombeo del aire. Las rodaduras más adecuadas son las de tamaño máximo 8/10 mm o inferior. Por cada mm de reducción del tamaño máximo se puede conseguir una reducción de nivel sonoro¹⁰ de aproximadamente 0,25 dB.
- Hay algunas investigaciones que señalan que la introducción en las mezclas bituminosas de algunos componentes que mejoren la elasticidad de la superficie y disminuyan las vibraciones, como por ejemplo el caucho, puede reducir la vibración del neumático.

El segundo efecto para reducir el nivel sonoro de la rodadura es la absorción de parte del ruido generado. Esto se consigue mediante:

- Huecos elevados que faciliten la capacidad de absorción de ruido y además disminuyan el bombeo del aire hacia el exterior. Los huecos deben estar comunicados. También reducen la generación de ruido actuando sobre los efectos de compresión y expansión del aire atrapado entre el neumático y la rodadura. Hay



investigaciones que tratan de optimizar la forma de los huecos para maximizar su efecto.

De los conocimientos actuales se deduce que los parámetros de las mezclas bituminosas que más ayudan a reducir el nivel sonoro de la rodadura son: un contenido elevado de huecos, un tamaño máximo reducido de las partículas del árido, y una textura negativa.

Se suele considerar que las rodaduras de menor sonoridad se obtienen con contenidos de huecos superiores al 15%, tamaños máximos de partículas inferiores o iguales a 8 mm y texturas negativas. Cuanto mayor número de estos parámetros tenga la mezcla bituminosa o mayor sea la magnitud del parámetro significativo, mayor será su capacidad de reducir el ruido.

10. CAPAS DE RODADURA DE BAJA SONORIDAD

10.1 Introducción

Se consideran como rodaduras de baja sonoridad las que por sus parámetros de diseño son capaces de reducir el ruido de rodadura respecto a las mezclas tipo AC.

Las mezclas bituminosas de baja sonoridad se denominan también “fonoabsorbentes”, aunque se considera más adecuado el primer término porque no todas ellas reducen el ruido por absorción.

Algunos países cuantifican la reducción necesaria respecto a una superficie de referencia para que una capa de rodadura sea considerada de baja sonoridad.

Tabla 9 - Definición de rodaduras de baja sonoridad en distintos países

| País | Definición de rodaduras de baja sonoridad |
|--------------|--|
| Alemania | ≥2 dB (referencia SMA) |
| Dinamarca | ≥3 dB (referencia AC11 D de 8 años) |
| Países Bajos | Mezcla drenante (por definición) |
| Suecia | 2-3 dB (referencia AC16 D o SMA 16) |
| Suiza | Hay cuatro tipos estándar de mezclas de baja sonoridad |
| Reino Unido | ≥2,5 dB (referencia Hot Rolled Asphalt) |

En este documento se consideran mezclas bituminosas de baja sonoridad aquellas que son capaces de reducir al menos 2 dB el ruido de la AC16 surf S.

Las mezclas bituminosas del tipo PA, BBTM A y B, SMA y AUTL son potencialmente capaces de reducir el ruido de rodadura respecto al nivel sonoro de las mezclas bituminosas tipo AC surf S.

Los microaglomerados en frío y los tratamientos superficiales son más sonoros que las mezclas AC. El orden de magnitud del incremento sonoro¹⁰ respecto a una mezcla bituminosa AC16 surf S es de 2 dB para los microaglomerados en frío y 3 dB para los tratamientos superficiales. Las mezclas abiertas en frío, cuya superficie se cierra generalmente con microaglomerados en frío, son también más ruidosas que las AC.



La tabla 10 resume los principales parámetros que pueden influir en el nivel de ruido de las mezclas de baja sonoridad potencial y la mezcla AC-S/D, que se toma como referencia.

Tabla 10 - Definición de rodaduras de potencial baja sonoridad

| Tipo de mezcla bituminosa | Tamaño máximo (mm) | Espesor (cm) | Huecos (%) | Textura | |
|---------------------------|--------------------|--------------|------------|----------|------------------|
| | | | | Tipo | Profundidad (mm) |
| AC S (referencia) | 16 | 4-5 | 3/4-6 | Positiva | ≥0,7 |
| PA | 11 | 4-5 | ≥20 | Negativa | ≥1,5 |
| | 16 | 4-5 | ≥20 | | ≥1,5 |
| BBTM A | 8 | 2-3 | ≥4 | Negativa | ≥1,1 |
| | 11 | 2-3 | ≥4 | | ≥1,1 |
| BBTM B | 8 | 2-3 | ≥12 y ≤18 | Negativa | ≥1,5 |
| | 11 | 2-3 | ≥12 y ≤18 | | ≥1,5 |
| SMA | 8 | 2-4 | 4-6 | Negativa | ≥0,9 |
| | 11 | 3-5 | 4-6 | | ≥0,9 |
| | 16 | 4-6 | 4-7 | | ≥0,9 |
| AUTL | 5 | 1-2 | ≥8 y ≤15 | Negativa | ≥1,0 |
| | 8 | 1-2 | ≥8 y ≤15 | | ≥1,0 |
| | 11 | 1-2 | ≥8 y ≤15 | | ≥1,0 |

La experiencia en España sobre la reducción potencial de ruido de las distintas rodaduras es bastante limitada y por tanto los datos de reducción sonora se han tomado de estudios europeos, y fundamentalmente de los indicados en las referencias ^{9, 10, 12,14,15 y16}.

Los resultados presentados en los documentos referenciados hay que tomarlos con precaución ya que las mezclas bituminosas definidas en Europa por CEN ofrecen posibilidades muy variadas de diseño y cada país las ha acomodado a las condiciones de sus carreteras y a su propia experiencia. Además, hay diferencias en la superficie que se toma como referencia para definir las mejoras de sonoridad, que en unos casos es una AC-S/D pero en otros son SMA de distinto tamaño máximo y ha habido que hacer algunas hipótesis para transformarlas en las que figuran en la tabla. Por todo ello, los datos que se presentan deben considerarse como estimaciones.

Entre las referencias citadas, destaca la Guía del centro francés IDRRIM (Institut des Routes, des Rues, et des Infrastructures pour la Mobilité) por la similitud de formulaciones de mezclas bituminosas con las que se han normalizado en España y por la cantidad de datos de que dispone, ya que viene midiendo, de manera sistemática, el ruido de rodadura de tramos de su red de carreteras desde los años 1990. En 2018 contaba con registros de unos 1.200 tramos tomados con el método SPB. La tabla 11 resume la valoración que hace IDRRIM de las distintas mezclas bituminosas y los valores medios de las distribuciones

¹⁴ Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control (Silvia); FEHRL; 2006

¹⁵ Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces, FEHRL; 2006

¹⁶ Quiet pavement technologies; PIARC; 2013.



obtenidas en distintas situaciones. Se presentan las mezclas bituminosas según la terminología francesa y entre paréntesis las españolas que se consideran equivalentes.

Tabla 11 - Valoración de reducción de ruido en la base de datos de IDRIIM

| Mezcla bituminosa | Valoración | Vehículos ligeros | | Vehículos pesados | |
|-------------------------------|------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| | | 0 a 3 años | Todas las edades (0 a 15 años) | 0 a 3 años | Todas las edades (0 a 15 años) |
| BBSG 0/14 (AC surf D 12) | - | 78,1 | 78,5 | | 86,6 |
| BBSG 0/10 (AC surf D 8) | Ref. | 76,1 | 78 | 84,9 | 85,9 |
| BBTM 0/10 clase 1 (BBTM 11 A) | --a- | 77,8 | 78,1 | 85,8 | 86 |
| BBTM 0/8 | -a+ | 73,2 | 76 | 82,8 | 83,8 |
| BBTM 0/6 clase 1 | +a++ | 73,8 | 74,2 | 82,8 | 83,2 |
| BBTM 0/10 clase 2 (BBTM 11 B) | +a++ | 76,2 | 70,5 | | 83,2 |
| BBTM 0/6 clase 2 | ++ | 72,8 | 73,5 | 82,8 | 83 |
| BBTM 0/4 | ++ | 68,2 | 69 | | |
| SMA 0/10 | -a+ | | | | |
| SMA 0/4 | --a- | | | | |
| BBUM 0/10 (AUTL 11) | --a - | 77,5 | 77,9 | | 84 |
| BBUM 0/8 (AUTL 8) | -a+ | | | | |
| BBUM 0/6 (AUTL 5) | + | 73,3 | 78,8 | | |
| BBDr 0/10 | +a++ | 73,2 | 78,8 | 83,1 | 82,2 |
| BBDr 0/6 | ++ | 71,9 | 72,7 | 81,8 | 81,5 |

BBSG = Beton bitumineux semi-grenu; BBTM = Beton bitumineux tres mince; BBUM = Beton bitumineux ultra mince ; BBDr = Beton bitumineux drainant

En la tabla anterior hay casos en los que las celdas están vacías porque no se cuenta con datos representativos. Los símbolos – y + significan reducción o aumento de ruido respecto a la referencia.

Se presentan a continuación los datos de la reducción del nivel sonoro que consiguen las distintas mezclas bituminosas respecto al tipo AC S/D de referencia, deducidos del conjunto de las referencias señaladas, junto a los que considera el CNOSSOS-EU y los que se recomienda adoptar para el análisis de posibles actuaciones para la reducción de ruido en el País Vasco.

Tabla 12 - Reducción sonora de rodaduras (dB) según diversas fuentes (v≥60 km/h)

| Mezcla bituminosa | CNOSSOS (ref. ⁶) | TRL (ref. ¹²) | SYLVIA (ref. ¹⁴) | AIPCR (ref. ¹⁶) | IDRIIM (ref. ¹⁰) | CDER (ref. ⁹) | Reducción sonora propuesta |
|-------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| AC 16 S (ref) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 |
| BBTM 11 A | 2,2 – 2,5 | 0-3 | 0-1 | 4,7 | 0-1 | 1-3 | 2,2 – 2,5 |
| BBTM 8 A | - | | | | 1-2 | | 2,5 – 3,5 |
| BBTM 11 B | 2,7 – 3,1 | 0-3 | 0-1 | 5 | 2-3 | 1-3 | 2,7 – 3,1 |
| BBTM 8 B | - | | | | 3-4 | | 3 - 4 |



| Mezcla bituminosa | CNOSSOS (ref. ⁶) | TRL (ref. ¹²) | SYLVIA (ref. ¹⁴) | AIPCR (ref. ¹⁶) | IDRIIM (ref. ¹⁰) | CDER (ref. ⁹) | Reducción sonora propuesta |
|-------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| SMA 11 | 0 | 0 | 1-2 | 4,7 | - | | 1- 2 |
| SMA 8 | | | | | | | 2-3 |
| AUTL 11 | - | | | | 0 | | 1 - 2 |
| AUTL 8 | - | | | | - | | 1 - 3 |
| AUTL 5 | - | | | | 5,5 | | 1 - 4 |
| PA 16 | | | | | | | 2 - 3 |
| PA 11 | 2 – 2,1 | 2-3 | 3-4 | 4 | 2-3 | 2-4 | 2 - 4 |
| PA Doble Capa | 3,2 – 3,9 | 3-6 | | 6 | - | 3-6 | 3 - 6 |

Debe tenerse en consideración que, aunque el comportamiento acústico es una característica importante de las capas de rodadura, hay otras funcionalidades que se deben contemplar cuando se va a seleccionar un determinado material, entre ellas las que se enumeran a continuación:

- Durabilidad de la capa.
- Coste de la capa, tanto inicial como a lo largo de la vida de servicio, incluyendo las operaciones de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción.
- Capacidad de ser reciclado y el posible empleo de materiales secundarios.
- Seguridad del tráfico, incluyendo la resistencia al deslizamiento, hidroneo, formación de neblinas y salpicaduras y visibilidad de las marcas viales.
- Comodidad para los conductores, considerando la reducción de neblinas y salpicaduras y el mayor silencio en el interior del vehículo.
- Resistencia a la rodadura, la influencia en el consumo de combustible y las emisiones de CO₂.
- Restricciones prácticas por las circunstancias del tramo.

Para cada una de las mezclas bituminosas de potencial baja sonoridad y para la de referencia se expone en los siguientes subapartados los tipos definidos y los principios de funcionamiento, así como las características funcionales y estructurales y las limitaciones en su aplicación.

10.2 Mezclas bituminosas drenantes (PA)

General sobre rodaduras drenantes

Las mezclas bituminosas drenantes se encuentran recogidas en la norma europea UN-EN 13108-7 y en el artículo 543 del PG-3.

Son mezclas muy abiertas con huecos comunicados. Esto se consigue dotándolas de un elevado contenido de áridos gruesos y reduciendo el árido fino. Pueden extenderse en una capa, que es la solución más usual, o en doble capa.

Las mezclas drenantes en capa única se utilizaron inicialmente por su gran capacidad para eliminar rápidamente el agua de la superficie de los pavimentos y mejorar las condiciones de la circulación con lluvia. Posteriormente se reconoció su capacidad para reducir



considerablemente el ruido de rodadura. Su utilización hoy en día se ve muy limitada por la necesidad de un mayor mantenimiento y por su menor durabilidad, generalmente inferior a la de otras mezclas bituminosas para capas de rodadura.

Hay dos husos granulométricos, el PA16, con tamaño máximo nominal (primer tamiz que retiene más del 5%) de 16 mm, y el PA 11, que es el más utilizado, con tamaño máximo de 11,2 mm. Algunos países utilizan mezclas drenantes con tamaño máximo de 6 mm para reducir el ruido en mayor medida.

Las mezclas drenantes se diseñan para obtener un contenido en huecos que generalmente se encuentra entre el 20 y el 22 %, aunque con diseños especiales se puede llegar al 28 - 30%.

Se utilizan en capas de rodadura de 4-5 cm de espesor y se deben colocar sobre capas intermedias relativamente impermeables y de buena regularidad longitudinal y transversal para evitar acumulaciones de agua. Se compactan exclusivamente con rodillos metálicos y tienen una textura negativa.

Por sus características mecánicas contribuyen menos que las de tipo AC en la capacidad de soporte del firme, y su papel es predominantemente el de aportar unas buenas características superficiales.

Otro inconveniente es que en su rehabilitación deben fresarse y sustituirse o, en su caso, se debe colocar otra mezcla drenante encima. Esta última operación no es aconsejable hacerla más de una vez.

La reducción de ruido se debe al elevado contenido de huecos y a su textura negativa que aumentan la absorción y generan menos ruido. La reducción del nivel sonoro es considerable respecto a las mezclas AC, estimándose en 2-4 dB en sus primeros años, reduciéndose en unos 2 dB a largo plazo. Estas mezclas bituminosas son las de mayor capacidad de reducción de ruido entre las que se utilizan habitualmente en la CAPV.

Mezclas drenantes en doble capa

Las mezclas bituminosas drenantes en doble capa no están aún normalizadas en Europa. Se introdujeron en 1996 para facilitar la descolmatación de las mezclas drenantes en capa única y reducir el ruido. Están formadas por una capa drenante inferior con árido grueso, en un espesor entre 3,5 y 6 cm y un tamaño máximo entre 11 y 16 mm (PA16), y otra capa drenante superior con un espesor de 1,5 a 3 cm y con árido de tamaño máximo más fino, inferior a 10 mm y generalmente entre 4-8 mm (PA8).

La capa superior, con árido más fino, ofrece una superficie homogénea, reduce el ruido de rodadura y actúa como filtro de los detritus que se acumulan en la superficie. La capa inferior, con huecos de gran tamaño, facilita la eliminación de las partículas que puedan filtrarse desde la capa superior evitando así la colmatación. La disposición de los huecos, pequeños en superficie y de mayor tamaño en el fondo, permite una reducción adicional del ruido por el efecto Humbolt. El elevado espesor de la capa aumenta su eficacia acústica.



El contenido de huecos en el conjunto está entre 20-30% y generalmente es del 25%. El contenido medio de betún de ambas capas es el usual en mezclas drenantes, pero en algunos países lo incrementan hasta alcanzar 5,7-6%, con incorporación de fibras y cal.

Uno de los puntos más críticos de la técnica es conseguir una buena unión entre las dos capas drenantes sin utilizar un riego de adherencia, ya que este reduciría la permeabilidad del conjunto y rebajaría también la eficacia sonora. Por tanto, se extienden y compactan separadamente, sin riego de adherencia, asegurando que el tiempo entre ambas operaciones es mínimo para mantener la capacidad adherente del betún de la capa inferior. También se han desarrollado extendedoras especiales para pavimentar y compactar ambas capas simultáneamente.

Las mezclas drenantes en doble capa son muy eficaces en la reducción del ruido de rodadura. Algunos estudios recogen, en vías rápidas con tráfico combinados, niveles de ruido de hasta 6 dB menos que en el hormigón asfáltico. A largo plazo la eficacia sonora se reduce aproximadamente en 2 dB.

La durabilidad de estos pavimentos en Europa ha sido, en media, del orden de 8-10 años, aunque ha habido casos de fallos prematuros a los 3-4 años. En Países Bajos, sin embargo, alcanzan una vida media de servicio de las mezclas drenantes en una capa es de 17 años (uno menos que para las AC) y de 13 años para las de doble capa.

Hay tres tramos construidos en la Diputación Foral de Gipuzkoa, uno en la N-1 y dos en la GI-20, que se describen en el Anejo 2.

En Europa el empleo de mezclas drenantes en capa única o doble capa es muy heterogéneo. Mientras que algunos países apenas las utilizan por su comportamiento invernal y menor durabilidad hay otros que lo consideran el pavimento de uso común en las vías principales.

El ejemplo más significativo es el de los Países Bajos, donde se ha venido utilizando desde los años 80 y que cuenta más del 90% de su red de autopistas con este tipo de mezcla bituminosa (70% con drenante en una capa y 20% en dos capas). En capa única utilizan y mezclas drenantes 0/16 en espesores de 5 cm, generalmente con ligantes convencionales. En doble capa la capa tiene un espesor de 4,5 cm y la superior de 2,5 cm.

Tabla 13 - Resumen de las características de las mezclas bituminosas drenantes

| Características | Comentarios |
|------------------------------|--|
| Resistencia al deslizamiento | Mejora considerablemente en momentos de lluvia al reducir la película superficial de agua. |
| Comodidad del conductor | Mejora drásticamente la comodidad en momentos de lluvia porque se producen menos salpicaduras y se ven mejor las marcas viales. En todo momento hay menos ruido en el interior del vehículo. |
| Durabilidad | En las carreteras en las que son de aplicación la durabilidad mecánica estimada de las mezclas drenantes en capa única es de 12 años y de 8-10 años en doble capa, frente a los 18 años de una AC-S. En otras carreteras con trazado sinuoso o incorporaciones la durabilidad puede ser bastante menor. Se |



| Características | Comentarios |
|--|--|
| | van colmatando con el tiempo, especialmente en carreteras de IMD media o baja, pero aún colmatadas mantienen una cierta drenabilidad. |
| Resistencia a la rodadura (Influencia en consumo de energía y emisiones de CO ₂) | Al tener textura negativa, la resistencia a la rodadura, y por tanto las emisiones, son menores que en las mezclas AC. |
| Capacidad de ser recicladas y empleo de materiales secundarios | En su fabricación se admite el uso de árido siderúrgico, pero actualmente no se permiten fresados. Se pueden reciclar para su empleo en otras mezclas bituminosas pero en tasas pequeñas, al tener un esqueleto mineral con pocos elementos finos. |
| Coste de la capa | Más cara que las mezclas AC-S por m ² /cm pero puede compensar por su menor espesor. La conservación es más costosa por la facilidad de desprendimientos de partículas y de daños mecánicos o por vertidos. Si se colocan en vías de bajo tráfico o circulación lenta pueden necesitar limpiezas rutinarias cada cierto tiempo. La conservación invernal también es más costosa. No admiten recarregos, salvo con mezclas drenantes y en ese caso se limita a una única actuación. Las reparaciones y bacheos se deben hacer con mezclas drenantes. |
| Restricciones prácticas | En la CAPV se permite su empleo únicamente si la IMD de la vía es superior a 2.000 vehículos y si la categoría de tráfico de proyecto es inferior a T00. Hay otras limitaciones entre las que destacan: <ul style="list-style-type: none"> • Tramos con curvas cerradas • Zonas con accesos frecuentes • Vías urbanas • Túneles |
| Nivel sonoro | Reducción a corto plazo respecto referencia. PA-11: 2-4 dB PA doble capa: 3-6 dB. Aumento a largo plazo. PA-11: 0,3 dB/año (0,1 para AC surf S) PA doble capa 0,2 dB/año |

10.3 Mezclas bituminosas discontinuas en capa muy delgada (BBTM)

Las mezclas bituminosas discontinuas BBTM (del francés Béton Bitumineux Très Mince) están definidas en la norma europea UNE-EN 13108-2 y en el artículo 543 del PG-3.

Son mezclas diseñadas para ofrecer una buena textura y poderse extender en capas delgadas, de 2 a 3 cm. Para conseguirlo, se reduce el contenido de árido fino respecto a las mezclas del tipo AC y se crea una discontinuidad en la granulometría para encajar más fácilmente el árido grueso.

El PG-3 contempla dos tipos, las denominadas BBTM A, más cerradas, con contenido de huecos superior o igual a 4%, y las BBTM B, más abiertas, con contenidos de huecos entre 12 y 18%. Cada una de ellas se subdivide en dos subtipos en función del tamaño máximo



de árido: 8 y 10 mm; el de 8 mm para capas de espesor entre 2 y 3 cm, y el de 10 mm para capas de 3 cm.

Las mezclas BBTM A son más resistentes a los esfuerzos tangenciales y más duraderas que las de tipo B. Las mezclas BBTM B tienen más textura que las A y más capacidad de eliminación del agua superficial.

Por su pequeño espesor y sus características mecánicas contribuyen menos que las de tipo AC en la capacidad de soporte del firme, y su papel predominante es aportar unas buenas características superficiales.

Ambos tipos de mezclas bituminosas se compactan exclusivamente con rodillos metálicos y tienen una textura negativa.

Sus inconvenientes están relacionados con el bajo espesor de la capa, que exige soportes de una excelente regularidad y no fisurados. En zonas con giros abruptos pueden perder partículas, especialmente las BBTM B.

La reducción de ruido se debe al pequeño tamaño de áridos (11 u 8 mm), a la textura negativa y en el caso de las BBTM B, al elevado contenido de huecos.

Tabla 14 - Resumen de las características de las mezclas bituminosas discontinuas BBTM A y B

| Características | Comentarios |
|---|--|
| Resistencia al deslizamiento | Tienen una buena resistencia al deslizamiento, favorecida por el pequeño tamaño de árido. La textura, más elevada que en las mezclas AC, hace que se mantenga mejor a velocidades elevadas. Las mezclas BBTM B, con bastantes huecos, tienen un buen comportamiento al deslizamiento con lluvia. |
| Comodidad del conductor | La comodidad mejora porque hay menos ruido en el interior del vehículo, y en el caso de las BBTM B hay menos salpicaduras. |
| Durabilidad | La durabilidad estructural estimada es de unos 15 años para las BBTM A y 14 años para las BBTM B frente a los 18 años de una AC-S. En carreteras con trazado sinuoso o incorporaciones la durabilidad puede ser algo menor. |
| Resistencia a la rodadura (Influencia en consumo de energía y emisiones de CO2) | Buenas características por su textura negativa. |
| Capacidad de ser recicladas y empleo de materiales secundarios | En su fabricación se admite el uso de escorias, pero actualmente no se permite incorporar fresados. Se pueden reciclar para su empleo en otras mezclas bituminosas, pero con tasas pequeñas o medias, al tener un esqueleto mineral con pocos elementos finos. |
| Coste de la capa | Suelen ser más caras por tonelada que las mezclas AC por su mayor contenido de betún y la necesidad de betunes modificados, pero al ponerse en menor espesor el coste de la capa resulta más reducido. La |



| Características | Comentarios |
|-------------------------|---|
| | menor durabilidad aumenta ese coste. El coste del mantenimiento es del mismo orden que con las mezclas AC. |
| Restricciones prácticas | No son adecuadas para zonas con esfuerzos tangenciales elevados, como curvas cerradas, glorietas o carreteras con numerosas incorporaciones. |
| Nivel sonoro | Reducción a corto plazo respecto referencia. BBTM 11A: 2,2-2,5 BBTM 8 A: 2,5-3,5 BBTM 11 B: 2,7-3,1 BBTM 8 B: 3-4 Aumento a largo plazo. BBTM 11A: 0,1 (0,1 para AC surf S) BBTM 8 A: 0,1 BBTM 11 B: 0,1 BBTM 8 B: 0,1 |

10.4 Mezclas bituminosas SMA

Las mezclas bituminosas SMA (del alemán Splitt Mastix Asphalt original o del adoptado en inglés Stone Mastic Asphalt) están definidas en la norma europea UNE-EN 13108-5 y en el artículo 544 del PG-3, presentado en la OC 3/2019. En Europa se han venido utilizando desde hace más de 40 años, pero en España se han incorporado recientemente a la normativa.

Son el precedente de las mezclas discontinuas BBTM y se desarrollaron con la idea de conseguir mezclas bituminosas muy ricas en betún, para hacerlas muy duraderas, y a la vez resistentes a las deformaciones, lo que se consigue mediante un fuerte esqueleto mineral de áridos gruesos. También se buscó que tuviesen bastante textura y que se pudiesen compactar en pequeños espesores, para lo que se redujo el contenido de árido fino.

El PG-3 define tres granulometrías, de tamaño máximo de árido 16, 11 y 8 mm respectivamente. Son mezclas de tipo cerrado, con contenido de huecos del 4-6% para las SMA 8 y 11, y del 4-7% para las SMA 16. Según su granulometría, pueden utilizarse en capas de rodadura de espesor convencional (4 a 6 cm), o en capas delgadas (3 a 4 cm), o muy delgadas (2 a 3 cm).

Los contenidos de betún mínimos definidos en Alemania y utilizados en el norte de Europa son del 6,7% sobre mezcla. En España este contenido mínimo de betún se ha reducido a 5,8%.

Las mezclas bituminosas SMA son muy estables y duraderas, con buen comportamiento incluso en zonas con fuertes esfuerzos tangenciales. Su elevado contenido de betún hace que tengan una mayor durabilidad que otros tipos de mezclas bituminosas.

La reducción de ruido se debe a su textura negativa y, en su caso, a su menor tamaño máximo de árido respecto a las mezclas bituminosas AC16 surf S



Tabla 15 - Resumen de las características de las mezclas bituminosas SMA

| Características | Comentarios |
|---|---|
| Resistencia al deslizamiento | Tienen una buena resistencia al deslizamiento, favorecida por la textura, más elevada que en las mezclas AC aunque menor que en las BBTM, que hace que se mantenga bien a velocidades elevadas. |
| Comodidad del conductor | La comodidad mejora porque hay menos ruido en el interior del vehículo. |
| Durabilidad | La durabilidad estructural estimada es de unos 20 años frente a los 18 años de una AC-S. |
| Resistencia a la rodadura (Influencia en consumo de energía y emisiones de CO2) | Buenas características por su textura negativa. |
| Capacidad de ser recicladas y empleo de materiales secundarios | En su fabricación se admite el uso de escorias, pero actualmente no se permite incorporar fresados. Se pueden reciclar para su empleo en otras mezclas bituminosas, pero con tasas pequeñas o medias, al tener un esqueleto mineral con pocos elementos finos. |
| Coste de la capa | Son más caras por tonelada que las mezclas AC por su mayor contenido de betún, la necesidad de betunes modificados y la incorporación de fibras, pero pueden ponerse en menor espesor, lo que reduce el coste de la capa. La mayor durabilidad también reduce el coste. El coste del mantenimiento es del mismo orden que con las mezclas AC. |
| Restricciones prácticas | No tiene restricciones prácticas. |
| Nivel sonoro | Reducción a corto plazo respecto a la referencia. SMA 11: 1-2 SMA 8: 2-3 Aumento a largo plazo. SMA 11: 0,2 (0,1 para AC surf S) SMA 8: 0,2 |

10.5 Mezclas bituminosas ultradelgadas AUTL

Las mezclas ultradelgadas AUTL (Asphalt for Ultra-Thin Layers) están normalizadas en la EN 13108-9 y en el artículo 545 del PG-3. Se desarrollaron en Francia donde se vienen utilizando desde mediados de los años 90, pero en España son de reciente incorporación.

En estas mezclas bituminosas se reduce el tamaño máximo del árido y el contenido de árido fino para poder colocarlas en capas de muy poco espesor, entre 1 y 2 cm. Su composición es intermedia entre las BBTM A y B, con contenidos de huecos entre el 8 y el 15%.

Se utilizan generalmente para rehabilitar las capas de rodadura que no tienen unas características adecuadas de resistencia al deslizamiento. Su papel es fundamentalmente funcional y apenas aportan capacidad estructural.



El PG-3 contempla tres tipos de mezclas bituminosas ultrafinas en función del tamaño máximo del árido, que puede ser de 5 mm, 8 mm u 11 mm.

Las mezclas bituminosas AUTL tienen más textura que las AC y SMA, pero menos que las BBTM A y B.

Se compactan exclusivamente con rodillos metálicos y tienen una textura negativa.

Las ventajas de estas mezclas bituminosas para capas de rodadura respecto a las BBTM es que reducen el incremento de cota de la superficie y que su coste es menor, por el reducido espesor de la capa.

Sus inconvenientes están relacionados con el bajo espesor de la capa, que exige soportes de una excelente regularidad y no fisurados. Son poco resistentes a los esfuerzos transversales y en zonas con giros abruptos pueden perder partículas. Por tanto no son adecuadas en vías con incorporaciones y salidas frecuentes.

Su menor sonoridad se debe a una textura negativa, tamaño de árido pequeño y a un elevado contenido de huecos.

Tabla 16 - Resumen de las características de las mezclas bituminosas AUTL

| Características | Comentarios |
|---|--|
| Resistencia al deslizamiento | Tienen una buena resistencia al deslizamiento, favorecida por el pequeño tamaño de árido. |
| Comodidad del conductor | La comodidad mejora porque hay menos ruido en el interior del vehículo. |
| Durabilidad | La durabilidad estimada es de unos 12 años frente a los 18 años de una AC-S. En carreteras con trazado sinuoso o incorporaciones la durabilidad puede ser algo menor. |
| Resistencia a la rodadura (Influencia en consumo de energía y emisiones de CO2) | Buenas características por su textura negativa. |
| Capacidad de ser recicladas y empleo de materiales secundarios | En su fabricación se admite el uso de escorias, pero actualmente no se permite incorporar fresados. Se pueden reciclar para su empleo en otras mezclas bituminosas, pero con tasas pequeñas o medias, al tener un esqueleto mineral con pocos elementos finos. |
| Coste de la capa | Suelen ser más caras por tonelada que las mezclas AC por su mayor contenido de betún y la necesidad de betunes modificados, pero al ponerse en menor espesor el coste resulta del mismo orden. La menor durabilidad aumenta ese coste. El coste del mantenimiento es del mismo orden que con las mezclas AC. |
| Restricciones prácticas | No son adecuadas para zonas con esfuerzos tangenciales elevados, como curvas cerradas, glorietas o carreteras con numerosas incorporaciones. |
| Nivel sonoro | Reducción a corto plazo respecto referencia. AUTL 11: 1-2 |



| Características | Comentarios |
|-----------------|---|
| | AUTL 8: 1-3 AUTL 5: 1-4 Aumento a largo plazo. AUTL 11: 0,2 (0,1 para AC surf S) AUTL 8: 0,4 AUTL 5: 0,4 |

10.6 Mezclas poroelásticas

Un pavimento poroelástico (PERS de Poro-Elastic Road Surface) está formado por una mezcla drenante fabricada con áridos, caucho reciclado y un betún modificado o un poliuretano. Tiene entre un 20 y un 40% de huecos. Funciona como una superficie muy flexible que reduce el desarrollo de ruido por vibración. Se consigue reducir el nivel sonoro entre 5 y 15 dB en relación con el hormigón asfáltico convencional.

Este pavimento se encuentra aún a nivel experimental, aunque ha sido objeto de varios proyectos de investigación en Europa (Persuade) y Japón. Sus principales debilidades por el momento son la falta de adherencia al soporte, reducida resistencia al deslizamiento, mal comportamiento frente al fuego y escasa durabilidad. Hay una patente sobre el producto.

Las dosificaciones más usuales constan de un 37% de caucho 0/2, un 7,5% de ligante de poliuretano, y un 55,5% de áridos convencionales.

11. RESUMEN Y RECOMENDACIONES

El ruido del tráfico se genera por la combinación del que producen las partes mecánicas y carrocería del vehículo (ruido del motor), y el ruido de rodadura. El ruido de rodadura se origina en el contacto de los neumáticos con el pavimento, y está muy influido por el tipo de superficie. Predomina sobre el del motor para las velocidades que superan 35 km/h en turismos o 60 km/h en los camiones. Por tanto, la influencia del pavimento en la generación de ruido es fundamental en las carreteras urbanas con velocidades superiores a 35-60 km/h y en las interurbanas.

Hay una serie de capas de rodadura que tienen la capacidad de reducir el ruido de rodadura respecto a las mezclas bituminosas convencionales del tipo AC16 surf S. Las características principales que controlan el nivel de ruido de las mezclas bituminosas son el tamaño máximo de árido, los huecos y la textura.

En este documento se han expuesto los conceptos básicos sobre el ruido de rodadura, incluyendo sus efectos sobre la salud, la normativa sobre el ruido, los procedimientos de medida, los métodos de cálculo para cuantificar sus efectos y las características de las mezclas bituminosas con mayor capacidad para reducir su nivel.

La estimación del nivel sonoro de las mezclas bituminosas es de utilidad para definir los planes de actuación contra el ruido requeridos por la Unión Europea. Hasta ahora se dispone únicamente de los que se presentan en el método de cálculo CNOSSOS-EU, tomados de la práctica holandesa y para los que se desconoce su ajuste a las características de las mezclas bituminosas definidas en el PG-3 y utilizadas en el País Vasco. En este documento



se ha hecho una propuesta sobre la reducción de ruido que se puede considerar en la elaboración de los planes de actuación para cada tipo de mezcla bituminosa que se utiliza en las redes de las Diputaciones Forales.

La reducción del ruido de rodadura es uno de los objetivos principales de la política europea sobre el ruido y ya se están discutiendo los procedimientos más adecuados para regular el empleo de mezclas bituminosas de baja sonoridad. Se esperan avances en este sentido en los próximos años, y es de interés que las Diputaciones Forales, el resto de las administraciones de carreteras y las empresas del País Vasco se vayan preparando para esta situación, adquiriendo los conocimientos necesarios, realizando medidas en sus redes y haciendo pruebas con las mezclas bituminosas de mayor potencial para reducir el ruido.



ANEJO 1 - ESTUDIOS DE RENTABILIDAD

A1.1 Método coste-beneficio

El método más utilizado para la realización de estudios de rentabilidad de las actuaciones contra el ruido es el del coste-beneficio, aunque hay otros, como el de coste-eficacia, que también son de aplicación.

El análisis coste-beneficio trata de determinar si un determinado plan de actuación tiene un resultado positivo o negativo para la sociedad y permite seleccionar entre varios planes el que sea socialmente más eficaz.

Se puede encontrar directrices para la aplicación del método, entre otros, en los siguientes documentos:

- “Guide to cost benefit analysis of investment projects”, publicado por la Unión Europea en julio de 2008.
- “Decision and cost/benefit methods for noise abatement measures in Europe”, publicado por el Interest Group on Traffic Noise Abatement de la red EPA (European Networks of the Heads of Environment Protection Agencies) en febrero de 2018.
- “Nota de Servicio 3/2014 sobre prescripciones y recomendaciones técnicas relativas a los contenidos mínimos a incluir en los estudios de rentabilidad de los estudios informativos o anteproyectos de la Subdirección General de Estudios y Proyectos de Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible”.

La Diputaciones Forales del País Vasco disponen también de métodos para la toma de decisiones sobre las actuaciones de ruido, que se resumen en un apartado posterior.

La elaboración de un análisis coste-beneficio se realiza en las siguientes etapas.

- Planteamiento de la situación y de las estrategias de actuación, incluyendo la situación de partida (sin actuación).
- Identificación de impactos.
- Definición del coste de las actuaciones.
- Valoración monetaria de los beneficios (impactos).
- Cálculo de la tasa interna de retorno y del valor actual neto de los costes.
- Comparación coste-beneficio.
- Evaluación de resultados.
- Análisis de sensibilidad.

En el análisis se considera el coste de la actuación, debido a los costes de la inversión para implementar la actuación, incluyendo los de proyecto y construcción, más los debidos al mantenimiento y reposición durante el período de análisis considerado, que suele ser de 25 o 30 años. Se debe considerar también un valor residual de la inversión al final del período de análisis.

En la tabla A.1.1 se presentan los costes relativos de mezclas bituminosas de baja sonoridad en 2024, referidos al de la mezcla bituminosa AC-S. El precio puede variar considerablemente en función de las condiciones del mercado y en especial del precio de



los componentes, por lo que debe tomarse meramente a nivel indicativo. La comparación de costes puede ser distinta en función del tipo de construcción. Así, en un firme de nueva construcción una capa de poco espesor debe compensarse incrementando el espesor de las capas inferiores, y la mejora de precio únicamente se refiere a la diferencia de coste del espesor de la rodadura más delgada, mientras que en una rehabilitación superficial puede no ser así y la diferencia de coste vendrá entonces afectada por la diferencia de coste del material y el menor espesor de la capa.

Tabla A.1.1 - Precios relativos de las capas de rodadura

| Tabla | | | |
|-------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Mezcla bituminosa | Precio relativo, €/m ² /cm | Espesor capa, cm | Coste relativo capa, €/m ² |
| AC-S | 1,00 | 5 | 1,00 |
| BBTM A | 1,08 | 3 | 0,65 |
| BBTM B | 1,10 | 3 | 0,66 |
| AUTL | 1,07 | 2 | 0,43 |
| SMA | 1,44 | 3 | 0,86 |
| PA | 1,10 | 4 | 0,88 |

En el coste de la reposición debe tenerse en cuenta la durabilidad de las capas de rodadura, que en función de la experiencia en el País Vasco es la de la tabla A.1.2., excepto para las AUTL y SMA que se ha estimado mediante la bibliografía existente.

Tabla A.1.2 - Durabilidad de las capas de rodadura (años)

| Mezcla bituminosa | Autopistas y carreteras principales | Carreteras secundarias |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------|
| AC | 18 | 20 |
| BBTM A | 15 | 18 |
| BBTM B | 14 | 16 |
| AUTL | 12 | 14 |
| SMA | 20 | 22 |
| PA | 12 | 14 |

En el beneficio se consideran los impactos sociales incluyendo los costes directos para el usuario más los externos debidos a las mejoras ambientales. Puede que no todos los impactos supongan una reducción de coste y se deben sumar o restar según sea el caso.

Si las actuaciones modifican el tráfico, por ejemplo, si se reduce la velocidad máxima, se puede considerar:

- El coste del aumento de tiempo de recorrido.



- El coste del consumo de combustible.
- El coste de los accidentes.

A estos se pueden sumar otros impactos medioambientales:

- El coste de las emisiones a la atmósfera en función de la velocidad.
- El coste del impacto en el calentamiento global.
- El coste sobre la naturaleza y el paisaje.
- El coste de la modificación del nivel de ruido

En el caso de que la actuación incluya pantallas se puede considerar, junto al coste de la reducción del ruido, el efecto sobre la estética de la zona y de la eliminación de la visión del tráfico.

En las actuaciones con capas de rodadura de baja sonoridad se pueden incluir las congestiones o pérdidas de tiempo debidas a las obras más frecuentes de rehabilitación, si es este el caso.

Los costes debidos a las molestias del ruido y a sus enfermedades derivadas se pueden tomar de los valores recomendados para la Europa de los 28¹⁷, que se resumen en la tabla A.1.2, como suma de los costes de las molestias más los costes sanitarios. Los costes de las molestias se obtienen de la disponibilidad de una persona a pagar para que se reduzca el ruido (se obtiene mediante encuestas). El coste sanitario se toma de un estudio europeo¹⁸. Estos costes por persona se multiplican por las personas afectadas para obtener un coste total.

Tabla A.1.3 - Coste ambiental del ruido del tráfico de carretera, EU28 (€2016/dB/persona/año)

| Lden (dB(A)) | Molestias | Salud | Total |
|--------------|-----------|-------|-------|
| 50-54 | 14 | 3 | 17 |
| 55-59 | 28 | 3 | 31 |
| 60-64 | 28 | 6 | 34 |
| 65-69 | 54 | 9 | 63 |
| 70-74 | 54 | 13 | 67 |
| ≥75 | 54 | 18 | 72 |

Sobre estos precios se deben aplicar las correcciones señaladas para España en el citado manual y, si se utiliza la edición referida (2019) en la que los precios son de 2016, el incremento debido al IPC entre 2016 y el año de cálculo.

El manual contiene también costes de referencia para otros impactos, como accidentes, contaminación ambiental o tiempos de circulación, que pueden utilizarse en los análisis.

¹⁷ Handbook on the external costs of transport; European Commission, 2019.

¹⁸ Environmental Noise: Valuing impacts on: sleep disturbance, annoyance, hypertension, productivity and quiet; Department for Environment, Food&Rural Affairs (DEFRA), 2014.



En ocasiones, no se puede asignar directamente un valor monetario a todos los impactos anteriores, y cuando se dé esta circunstancia se puede optar por un análisis multicriterio asignando valores dentro de una escala y aplicando pesos ponderados a cada uno de ellos.

Los costes anuales futuros hay que tomarlos en cada año del período de análisis reduciéndolos con la tasa de descuento considerada. El coste total se debe considerar en su Valor Actual Neto.

Se presenta a continuación un ejemplo simplificado del método coste-beneficio, tomado de la publicación de la EPA citada anteriormente

En este ejemplo se considera una carretera de 5 km de longitud, con 2x2 carriles, con una anchura total de plataforma de 25 m. La carretera atraviesa un vecindario de 400 viviendas que están sometidas a un nivel elevado de ruido.

Se consideran varias actuaciones:

- Aplicación de capas de rodaduras de bajo nivel sonoro:
 - 1 mezcla bituminosa delgada tipo BBTM B (capa 1) que reduce el nivel sonoro en 3,5 dB.
 - 1 mezcla bituminosa drenante en doble capa (capa 2) que reduce el nivel sonoro en 6 dB.

Colocación de una barrera acústica de 3 m, que reduce el ruido en 10 dB a la mitad de los edificios que está más próxima a la carretera y en 5 dB a la otra mitad.

- Combinación de la colocación de la barrera de 3 m y la aplicación de la capa de rodadura tipo 2.
- La combinación de la colocación de una barrera de 6 m y la aplicación de la capa de rodadura de tipo 2.

Los costes directos de las actuaciones están tomados de la norma holandesa sobre estimación de costes (costes de 2009). Incluyen los costes de primera instalación y los de mantenimiento durante 30 años. La reducción de ruido es la suma de la que se consigue para cada edificio medido en dB*vivienda (dB*v). El nivel de ruido objetivo es 50 dB.

En este ejemplo se supone que para conseguir cumplir el objetivo de ruido en las 400 viviendas se precisan 3.500 dB*vivienda. La reducción de nivel de ruido conseguida con cada actuación se obtendría mediante un modelo de cálculo.

Tabla A.1.3 -Análisis de las actuaciones

| Actuación | Costes (M€) | Reducción total (dB*v) | Reducción necesaria (dB*v) | Eficacia |
|-----------------------------------|-------------|------------------------|----------------------------|----------|
| A. No se actúa | 0 | 0 | 3.500 | 0% |
| B. Capa 1 | 4,9 | 1.200 | 3.500 | 45% |
| C. Capa 2 | 9,9 | 2.600 | 3.500 | 77% |
| D. Barrera de 3 m | 20,7 | 3.400 | 3.500 | 97% |
| E. Barrera de 3 m + capa 2 | 30,5 | 5.800 | 3.500 | 161% |
| F. Barrera de 6 m + capa 2 | 48,2 | 6.800 | 3.500 | 200% |



Se ha cuantificado económicamente los beneficios debidos a la reducción del ruido. En este ejemplo se supone que son los de las molestias producidas por el ruido, considerando 25€/persona/año (disposición a pagar, EU 2001) y un período de análisis de 30 años. Esta cifra únicamente incluye el coste por molestias. Los costes sanitarios se suponen que son el 50% de los considerados por las molestias.

Para la cuantificación económica de los beneficios totales se procede de la siguiente manera:

- Se calcula en $L_{den, v}$ para cada vivienda.
- Se determina el número de personas en cada vivienda $N_{p,v}$ o se utiliza una estimación genérica (por ejemplo, 2,1).
- Se calcula los costes externos totales sumando los de cada vivienda, que son:

$$\text{Costes totales} = \sum 25\text{€} * N_{p,v} * (L_{den,v} - 50) * 30 \text{ años.}$$

Aplicando estas cifras al ejemplo, saldría un coste total de 14,2 millones de € para el caso en que no se actúa.

En este ejemplo los costes se han sumado directamente, aunque se deberían haber tomado los valores anuales netos actualizados.

A partir de los resultados para las distintas actuaciones se puede comparar los beneficios con los costes. Si la diferencia es positiva (los costes son inferiores a los beneficios) se puede considerar la actuación. Si fuese negativa, la actuación sería costosa para la sociedad. También se puede utilizar la relación coste/beneficio para la comparación.

Haciendo los cálculos correspondientes en el ejemplo expuesto, la actuación C sería la mejor.

Este ejemplo muestra el desarrollo del método de una forma muy simplificada. En el apartado siguiente se exponen procedimientos detallados para el análisis de la población afectada y el análisis de la eficacia de la medida.

A1.2 Procedimientos de las Diputaciones Forales

En Bizkaia y Gipuzkoa se analiza la proporcionalidad económica de la actuación mediante el indicador IPES (Indicador de Proporcionalidad Económica de la Solución).

Este indicador combina la eficacia y eficiencia de la actuación, de la siguiente manera:

$$\text{Bizkaia: IPES} = \text{Eficacia} \times \text{Eficiencia} \times 40;$$

Si $\text{IPES} < 0,5$ la actuación es económicamente desproporcionada;

Si $\text{IPES} \geq 0,5$ la actuación es viable.

$$\text{Gipuzkoa: IPES} = (\text{Eficacia} \times \text{Eficiencia})/25$$

La valoración de actuaciones es la siguiente:



IPES > 4,0: Muy buena

IPES >2,0: Buena

IPES >1,0: Suficiente

IPES <1,0: Insuficiente

IPES <0,5: Mala

La eficacia se define en ambos procedimientos como el efecto de la medida sobre el conjunto afectado, y se obtiene dividiendo la población que dejará de estar expuesta a niveles que superan los Objetivos de Calidad Acústica (OCA) una vez se implante la solución por la población actualmente expuesta a niveles que superan la OCA en esa zona, en %. En Bizkaia se evalúa por número de personas y en Gipuzkoa por número de edificios.

Por ejemplo, para Bizkaia, si en una urbanización hay 80 personas expuestas a niveles que superan la OCA (en período nocturno, que es el indicador más sensible) y se estima que tras la actuación únicamente quedan 20 afectados, la eficacia es de $100 \times (80-20)/80 = 75\%$.

El número de personas asignadas a cada edificio se basa en lo expuesto en la Orden PCI/1319/2018, imputando a cada edificio el número de personas resultante del producto del número total de personas de la sección censal por el cociente entre el volumen del edificio y el volumen total de los edificios residenciales de la sección censal, a menos que se cuente con datos que permitan hacer una estimación más ajustada.

Lo anterior se completa con la distribución de receptores, desarrollada según la Orden PCI/1319/2018. En las fachadas de más de 5 m de longitud se distribuyen los receptores separados regularmente la máxima longitud posible hasta alcanzar un máximo de 5 m de separación. A cada receptor se le asigna la población ponderada en función de la longitud de fachada. La suma de población de todos los receptores en un edificio corresponderá a la población total del edificio. En el cálculo del IPES se consideran todos los receptores que superen los OCA. Los niveles de ruido de cada receptor, en la situación actual y la que haya tras la actuación, se obtienen mediante el CNOSSOS-EU. Los casos particulares de lo anterior se desarrollan en una nota interna de la Diputación Foral.

En un ejemplo para Gipuzkoa, una eficacia del 100% implica que la actuación corrige el nivel sonoro de la totalidad de los edificios y una eficacia del 50% de la mitad de los edificios.

La eficiencia compara el beneficio acústico de la actuación con el coste de esta.

En Bizkaia, el beneficio acústico se determina mediante el Índice de Gestión de Ruido en Carreteras (IGRC) que valora la población que excede los OCA en la zona de estudio y la severidad con la que se excede. Para obtener el IGRC, se suma el resultado, para cada receptor, de los habitantes asociados a ese receptor multiplicado por la diferencia entre el nivel en el receptor y el OCA. La eficiencia se obtiene mediante la diferencia entre el IGRC inicial y el IGRC futuro dividida por el coste de la actuación.

En Gipuzkoa el beneficio acústico de la actuación se valora en euros, considerando el coste asociado a la molestia o DAP (obtenido mediante la Disponibilidad A Pagar de la población



por evitar la molestia) y el debido a los daños sobre la salud. Los costes se toman de datos europeos ajustados por renta en el País Vasco. Para la evaluación del beneficio de las actuaciones se incluyen todos los receptores de la zona estudiada y se valoran las molestias considerando un umbral nocturno de 40 dB y diurno de 50 dB, inferiores a los de los OCA, y que es el que distintos estudios europeos señalan como umbral a partir del cual los ciudadanos pagarían por reducir el nivel de ruido. Se valora como beneficioso el que en receptores que se encuentran por debajo de los OCA puedan descender los niveles de ruido para lograr una situación más tranquila. Para el desarrollo de la metodología se asigna un número de habitantes a cada punto receptor de los mapas de ruido. Se reparte la población de cada edificio proporcionalmente a la longitud de fachada en cada punto de cálculo. Con ese número de personas, el nivel sonoro y el DAP por persona y año se puede calcular la eficiencia.



ANEJO 2 – MEZCLAS DRENANTES EN DOBLE CAPA EN GIPUZKOA

La Diputación Foral de Gipuzkoa ha ejecutado varios tramos con mezcla drenante en doble capa como parte de sus actuaciones para reducir el ruido de rodadura.

Dos de ellos se encuentran en la GI-20, entre los puntos kilométricos 7+850 y 8+250, en el barrio de Loiola de San Sebastián, cada uno en una calzada, y se construyeron con un desfase de un año. El tramo de la N-I se encuentra entre el p.k. 452+760 y el p.k. 453+572 en Lasarte Oria, dirección Irún.

Tabla A.2.1 - Tramos con mezcla drenante en doble capa en la red de la DFG

| Tramo | Año puesta servicio | Pkini | PKfin | Longitud (m) | Categoría Tráfico |
|-------------------|---------------------|---------|---------|--------------|-------------------|
| GI-20, Creciente | 2018 | 7+850 | 8+250 | 400 | T1 |
| GI-20 Decreciente | 2019 | 8+250 | 7+850 | 400 | T1 |
| N-I Lasarte | 2021 | 452+760 | 453+572 | 812 | T0 |

En ambos casos se trataba de complementar el efecto de las pantallas acústicas para cumplir los objetivos de reducción sonora en las edificaciones colindantes.

En las dos actuaciones se fresó la rodadura existente para colocar luego una capa intermedia y la rodadura drenante en doble capa.

En el tramo de la N-I la capa inferior drenante era del tipo PA16, con un espesor de 4,7 cm, y la drenante superior una PA11 de 3,5 cm de espesor. En los tramos de la GI-20 la capa superior era del tipo PA8 (en realidad PA11, pero pasando el 100% del árido por el tamiz 11 mm). Los contenidos medios de betún fueron del 4,5% en la N-I y del 4,7% en la GI-20, y el contenido de huecos de diseño en ambas capas era del orden del 20%.

La puesta en obra se hizo con dos extendedoras desfasadas unos 250 m, de manera que la primera colocaba la capa inferior y la segunda la superior una vez que la primera capa había reducido su temperatura a 80 °C. No había riego de adherencia entre ambas capas.

Las compactaciones consiguieron compacidades superiores al 98% en todos los puntos medidos. La macrotextura media fue de 2,6 mm y la permeabilidad media fue de 28 s, equivalente a un contenido de huecos de 21,2%.

Las medidas de niveles sonoros fueron realizadas antes de la colocación de la nueva capa, inmediatamente después y tras transcurrir una serie de meses. Todas las medidas se hicieron de acuerdo con la norma UNE-ISO 1996.

En la GI-20 el nivel sonoro LAeq inicial, antes de la actuación, era del orden de 78-80 dB. Tras la puesta en servicio de la mezcla drenante en doble capa la reducción lograda fue de aproximadamente 12 dB respecto a los valores de la rodadura anterior. Dos años después se midió una reducción de aproximadamente 9 dB y 4 años después, en 2023 se volvió a medir una reducción aproximada de 11 dB. Estas reducciones se refieren a las mezclas



bituminosas sustituidas, que se encontraban envejecidas y por tanto no se puede deducir directamente la reducción sonora respecto a mezclas convencionales nuevas.

En la N-I el nivel sonoro de la mezcla antigua era ligeramente más bajo que en la GI-20, y se encontraba entre 76-78 dB. Tras la colocación del pavimento drenante en doble capa en el año 2021 la disminución sonora fue de aproximadamente 7,2 dB, y dos años después se mantenía una reducción similar, de aproximadamente 7,6 dB.



COMPONENTES DE LA MESA DE FIRMES

Diputación Foral de Araba

Miguel Ángel Ortiz de Landaluce Martínez de Rituerto

Jefe del Servicio de Carreteras

Diputación Foral de Bizkaia

Felipe Cobo Sánchez

Subdirector General de Gestión de la Red Viaria

José Miguel De La Fuente Casado

Subdirector General de Desarrollo de Infraestructuras

Diputación Foral de Gipuzkoa

Susana Luzuriaga Mocoeroa

Jefa del Servicio de Rehabilitación de Infraestructuras Viarias y Oficina Técnica

Gobierno Vasco

Luis Ignacio López de Aguilera Salazar

Responsable de Infraestructuras de Transporte

REDACCIÓN

Aurelio Ruiz Rubio

Director de CIESM-INTEVIA